密级：

中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

# 博士学位论文

## 基于遥感、气象和通量数据的萨瓦纳植被物候研究


作者姓名：马轩龙

指导教师：于强 研究员 中国科学院地理科学与资源研究所

Alfredo Huete 教授 澳大利亚悉尼科技大学


学位类别：理学博士

学科专业：生态学

培养单位：中国科学院地理科学与资源研究所

二〇一四年五月

# Integrating Remote Sensing, Meteorology, and Eddy Flux Data to Study the Savanna Vegetation Phenology

**By**

**Ma Xuanlong**

**A Dissertation Submitted to**

**University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of Doctor of Science**

**Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research,**

**Chinese Academy of Sciences**

**May, 2014**

# 致 谢

光阴似箭，五年的求学生涯即将划上一个句号，而对于我的漫漫人生却还只是一个逗号，我将面对又一次征程的开始。博士阶段的学习虽然辛苦，却终生受益无穷，不仅在学习和研究方面取得了一定的进步，更重要的是，个人素质和综合能力方面也得到的全面的提高。在此向所有帮助过我的老师、同学和亲人表示最衷心的感谢。

本论文是在导师于强研究员的悉心指导下完成的。于强研究员在专业方面渊博的知识、严谨的治学态度、精益求精的工作作风，以及在生活方面平易近人、朴实无华的人格魅力对我影响深远。在研究组学习期间，于强研究员始终对论文工作给予耐心且细致的指导，同时在研究中鼓励充分的沟通以及师生之间就学术问题进行自由的讨论，这些对于我的科研生涯都具有非常重要的帮助。

同时感谢我的国外导师 Alfredo Huete 教授对论文的指导和帮助。在澳大利亚悉尼科技大学留学期间，Huete 教授在工作以及生活等各个方面都对我提供了诸多帮助。Huete 教授在学术上追求高标准以及在工作中严谨求实的作风给我留下了深刻印象。在 Huete 教授研究组两年的留学生涯是我非常宝贵的一段求学经历。另外，在学术论文写作以及修改过程中 Huete 教授均给予了重要的帮助。

本论文的工作得到了诸多国内外老师的指导和帮助。感谢所内吕昌河研究员、莫兴国研究员、刘荣高研究员、李俊副研究员在论文开题阶段对论文的选题和研究方向提出的宝贵意见和建议。感谢论文中期评审以及盲审阶段诸位评审老师对论文提出的修改意见。感谢留学期间悉尼科技大学 Derek Eamus 教授、Natalia Restrepo Coupe 博士、Kevin Davies 博士、Mark Broich 博士、James Cleverly 博士、Nicolas Boulain 博士对研究工作的帮助。特别感谢许守华研究助理在科研过程中给予的帮助。

感谢研究生部陈力老师、王淑强老师、储小红老师、黄文力老师、陈晨老师，以及图书馆和医疗室的各位老师在生活和工作中提供的便利和帮助。感谢同学邢洪涛、李晓炜、杨晓亚、赵刚、郭利平、何亮、庄伟和靳宁等在生活和工作中给予的帮助。同时感谢博士学习期间好友张灿强、陈朝、孙甲霞、徐永新、Stephen Fujiwara 等在生活和学习中对我的帮助和支持。

最后，感谢我的父母对我学业始终如一的支持和鼓励。

马轩龙

2014 年 5 月于北京

# 摘 要

物候学主要研究动植物的生长季节性及其与环境要素之间的关系。在气候变化背景下，物候作为生态系统对环境变化响应的直接体现方式，日益受到学界关注。对植被物候的准确表达，能够提高模型对全球陆地生态系统碳、水、能量循环的模拟精度。然而，目前对于植被物候的研究主要集中在北半球中高纬度地区，对占全球陆地面积八分之一，同时占全球陆地生态系统总初级生产力 30%的热带萨瓦纳植被物候及其与环境要素之间的关系尚未认识清楚。热带萨瓦纳，亦即热带稀树草原，是一种在连续草地上稀疏生长着树木，且年内降水存在明显雨季-旱季差异的生物群系。萨瓦纳作为全球重要生物群系之一，其复杂性主要体现在由不同植被功能型构成的树-草分层结构，且每一层均有其独特的生理生态特征及对环境要素的响应方式。

北澳热带降水样带 NATT（Northern Australian Tropical Transect）作为国际地圈-生物圈计划（International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP）的一部分，位于澳大利亚北部热带地区（12°S-23°S, 128°E-138°E），南北跨度达 1100 公里，年平均降水量从北部湿润地区的 1800 毫米递减到南部干旱地区的 200 毫米左右。NATT 研究区内人类活动干扰程度较小，是一个理想的对萨瓦纳植被物候和生态系统功能进行研究的“天然实验室”。本论文结合遥感、涡度相关和气象三种观测方法和数据源，在不同时空尺度上对北澳典型热带降水样带（NATT）上萨瓦纳植被物候和初级生产力的时空变异模式及其与环境要素之间的关系进行了研究，得到的主要结论如下：

1. 发展了一种新的基于奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis）的遥感物候反演方法，来从 MODIS（中分辨率成像光谱仪，Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,）增强型植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）时间序列中提取多种萨瓦纳植被物候参数。该方法具有适应性好且结果客观等优点，适应于生长曲线不规则、数据噪音大、且物候年际变率较高的热带萨瓦纳地区；

2. 在研究区多个萨瓦纳涡度相关通量塔站点上，使用碳通量数据对遥感观测植被生长及物候信息进行了比较和验证。结果显示遥感反演物候在北部由桉树建群的湿润萨瓦纳地区的误差较小，但是在南部由合金欢树建群的干旱萨瓦纳地区，遥感反演物候的不确定性增加；

3. 研究发现萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水量空间差异非常大，且生长季开始所需累积降水和站点年平均降水量之间存在显著负相关。北部湿润萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水量较小，通常在 25 毫米以内。而南部干旱和半干旱萨瓦纳植被生长季开始所需累积降水量则达到 50 毫米；

4. 通过对遥感反演物候的分析，发现 NATT 地区植被物候随纬度梯度（亦即降水梯度）的变化不是线性的，而是由于受不同气候类型控制而在南北两部分呈现出截然不同的时

空变异模式。整个研究区植被生长季在北部萨瓦纳地区开始和结束的较早，然后向南逐渐推迟。在南部干旱萨瓦纳地区，植被物候的年际变率呈现出明显增加的趋势。同时发现在不同植被类型上，植被生长季长度的年际变率和降水量年际变率之间具有较强的相关性（$R^2$ = 0.80, $p < 0.0001$）；

5. 在使用地面通量数据对遥感物候进行验证的过程中，发现 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间存在较强的相关性。在此基础上，本论文发展了一种新的热带萨瓦纳总初级生产力遥感反演模型。该模型通过将 MODIS EVI 和大气层之上太阳辐射 $R_{TOA}$（top-of-atmosphere solar radiation）进行结合，可以在不需要地面气象资料的情况下完全使用遥感数据在区域尺度上对萨瓦纳 GPP 进行估算；

6. 基于澳洲萨瓦纳树木和林下草之间在生长季节性（亦即物候特征）上的显著差异，发现遥感估算的 GPP 在像元尺度内可以通过时间序列数学模型分解为来自树木和来自林下草两部分。将树-草分解模型应用到整个 NATT 研究区之后，发现北澳萨瓦纳树-草比例在总体上呈现出从北到南的递减趋势。同时发现萨瓦纳植被生产力在雨量充沛年份的增加，或是在干旱年份的减少,主要是因为林下草 GPP 在雨年的增加或在旱年的减少。而树木则因为具有较长的根系，能够在干旱期汲取地下水以维持生长所需，因此对降水量的年际变化并不敏感。

**关键字：**萨瓦纳，物候，涡度相关，遥感，植被指数

# Abstract

Phenology is the study and analysis of the life cycles of flora and fauna and their interactions with climate and other seasonal environmental drivers. As an integrative indicator of climate variability and vegetation growth responses to climate change, phenology has received increasing attentions in global change research. The correct representation of phenology is central to the accurate simulation of carbon, water and energy exchange between the land surface and atmosphere. Whereas biogeographic phenological patterns and shifts have received much attention in mid- and high- latitude zones of the northern hemisphere, much less is known about the phenology of tropical savannas, despite their coverage of approximately one eighth of the global land surface, and their contribution of 30% of terrestrial ecosystem gross primary production. Tropical savannas are ecosystems that contain a discontinuous tree canopy with a substantial grass understorey.

The Northern Australian Tropical Transect (NATT) was conceptualized in the mid-1990s as part of the International Geosphere Biosphere Programme (IGBP), encompassed an area of 1.30 million $km^2$ between 12°S to 13°S and 128°E to 138°E. The NATT region is characterized as having a classic monsoon climate, with mean annual precipitation decreases from 1800 mm to about 200 mm. Savannas in the NATT region are largely ecologically intact with relatively low levels of disturbances from human activities, therefore was recognized as an ideal "living laboratory" to investigate the phenology and ecosystem functions of savannas. In this study we investigate the spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology over the NATT study area through the coupling of the independent data sources from satellite remote sensing, landscape eddy covariance flux tower and meteorology stations. The major conclusions of this study are:

1. We developed a new method for retrieving a series of savanna phenological metrics from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Enhanced Vegetation Index (EVI) time series based on Singular Spectrum Analysis. This method is robust and can provide fairly objective results, thereby suit for vegetation types with irregular seasonal growth curves, or satellite observations contains significant noises, and is particularly suited for the tropical savannas where vegetation phenology has considerable inter-annual variations;

2. We compared the satellite-based phenology results with tower-derived measures of Gross Primary Production (GPP) fluxes at three sites over the study area. We found good convergence between MODIS EVI and tower calibrated GPP at northern *Eucalyptus* dominated mesic savannas, but uncertainty increased at southern *Acacia* dominated xeric savannas ;

3. The amount of cumulative rainfall required by vegetation for starting the greening season was found varied considerably across space. There was significant negative correlation between the amount of cumulative rainfall required by vegetation for green-up and mean annual precipitation. The cumulative rainfall requirements for green-up at north mesic savannas were generally below 25 mm, but increased significantly to more than 50 mm at south xeric savannas;

4. By analyzing the remote sensing derived regional phenological patterns, we found that the variation in phenology along the latitude was nonlinear, and resulted two distinct biogeographical patterns in phenology across the northern and southern NATT study area that were controlled by different climate systems. Both the start and the end of the greening (enhanced vegetation activity) season occurred earlier in the north tropical savannas but were progressively delayed towards south. Phenology of southern xeric savannas displayed a much greater overall responsiveness to hydroclimatic variability. The variance in annual precipitation alone could explain 80% of the variances in the length of greening season across major vegetation groups;

5. Based on the strong correlation between MODIS EVI and EC tower derived GPP, we proposed a new remote sensing based savanna GPP model. By incorporations of MODIS EVI and top-of-atmosphere solar radiation ($R_{TOA}$), this new model can be applied for the estimation of savanna GPP based entirely on remote sensing observations, without dependency on ground interpolated meteorological input;

6. We found that savanna GPP can be partitioned into $C_3$ trees and $C_4$ grasses components using time series based decomposition model, by utilizing the distinct phenological characteristics between trees and grasses. We applied the tree-grass decomposition model over the NATT study area and found total annual GPP, as well as the tree and grass component GPP and the tree-grass ratio to decrease dramatically from northern humid coast to southern xeric inland. We found that the pulse or reduction of annual GPP in response to wet and drought extremes were primarily due to the changes in grass component GPP. In contrast, the tree component GPP exhibited a much less sensitivity to inter-annual variations in rainfall, primarily due to their lengthy root system enable the extrapolation of deep soil/ground water in the extended dry and drought period.

**Keywords:** savanna, phenology, remote sensing, eddy covariance, vegetation indices

# 目 录


致 谢 ..... I
摘 要 ..... II
Abstract ..... IV
目 录 ..... VI
第一章 引 言 ..... 1
1.1 选题背景和意义 ..... 1
1.1.1 物候学的研究范畴及其重要性 ..... 1
1.1.2 萨瓦纳的定义 ..... 2
1.1.3 萨瓦纳的分布范围 ..... 2
1.1.4 对于萨瓦纳植被物候和生态系统功能等方面的认识尚不完善 ..... 3
1.2 国内外相关研究成果述评 ..... 4
1.2.1 传统地面物候观测方法 ..... 4
1.2.2 遥感反演区域植被物候信息 ..... 4
1.2.3 基于遥感观测对萨瓦纳植被物候的研究 ..... 5
1.2.3 遥感物候的地面验证 ..... 6
1.3 本论文要解决的问题 ..... 8
1.3.1 发展适合于萨瓦纳植被生长特点的遥感物候反演方法 ..... 8
1.3.2 利用地面通量观测对遥感反演植被生长及物候信息进行验证 ..... 8
1.3.3 分析热带萨瓦纳植被物候和环境要素之间的关系 ..... 8
1.3.4 利用气象观测资料对萨瓦纳的物候进行模拟 ..... 8
1.3.5 从遥感观测中反演关于萨瓦纳植被生产力和植被结构方面的信息 ..... 8
1.4 所运用的主要理论和方法 ..... 9
1.4.1 遥感反演植被生物物理信息 ..... 9
1.4.2 涡度相关技术对生态系统和大气之间碳、水通量的测量 ..... 11
1.4.3 利用奇异波谱分析对遥感观测数据进行噪音过滤和时间序列重建 ..... 11
1.5 基本思路和论文结构 ..... 11
第二章 研究区介绍 ..... 14
2.1 研究区的空间界定 ..... 14
2.2 研究区的植被类型 ..... 19
2.3 研究区的降水 ..... 20
2.4 主要地面通量站点的气候特征 ..... 26
第三章 基于奇异波谱分析的萨瓦纳植被物候遥感反演方法 ..... 29
摘 要 ..... 29
关键字 ..... 29
3.1 引 言 ..... 29
3.2 数据和方法 ..... 31
3.2.1 遥感数据 ..... 31
3.2.2 基于奇异波谱分析的物候指数反演方法 ..... 32

3.3 结 果.....37
3.3.1 研究区主要站点的植被物候特征.....37
3.3.2 减少遥感反演物候指数在干旱萨瓦纳地区的不确定性.....44
3.3.3 萨瓦纳植被物候对极端降水和极端干旱的响应.....47
3.3.4 站点尺度上萨瓦纳植被物候的年际变化规律.....50
3.4 讨 论.....52
3.4.1 基于奇异波谱分析的萨瓦纳植被物候遥感反演方法.....52
3.4.2 遥感反演植被物候在萨瓦纳地区的生物学含义.....52
3.5 结 论.....54
第四章 使用地面通量观测对遥感反演植被生长和物候期信息进行验证.....55
摘 要.....55
关键字.....55
4.1 引 言.....55
4.2 数据和方法.....56
4.2.1 通量站点介绍.....56
4.2.2 物候指数提取方法.....57
4.2.3 数理统计方法.....58
4.3 结 果.....58
4.3.1 MODIS EVI 和通量 GPP 时间序列以及提取物候指数的比较.....58
4.3.2 生长季不同阶段 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间关系的差异.....61
4.4 讨 论.....64
4.5 结 论.....65
第五章 利用累积降水模拟萨瓦纳植被生长季开始时间.....66
摘要.....66
关键字.....66
5.1 引 言.....66
5.2 数据和方法.....67
5.2.1 遥感数据.....67
5.2.2 降水插值数据.....68
5.2.3 植被类型数据.....68
5.2.4 遥感物候提取方法.....69
5.2.5 判定旱季的时间范围.....69
5.2.6 基于累积降水来预测萨瓦纳植被生长季开始的时间.....71
5.2.7 在区域尺度应用累积降水模型.....71
5.3 结 果.....71
5.3.1 在站点尺度上基于累积降水量判定生长季开始时间.....71
5.3.2 计算区域尺度上逐像元植被生长季开始所需累积降水量大小.....76
5.3.4 利用累积降水模型模拟 2011-2012 年区域尺度上植被生长季开始时间.....77
5.4 讨 论.....80
5.5 结 论.....80
第六章 萨瓦纳植被物候的时空变化规律及与降水之间的关系.....82
摘 要.....82

关键字.....82
6.1 引 言.....82
6.2 数据和方法.....83
6.2.1 遥感数据.....83
6.2.2 遥感物候提取方法.....84
6.2.3 统计方法.....84
6.3 结 果.....84
6.3.1 萨瓦纳植被物候的时空变化规律.....84
6.3.2 萨瓦纳植被物候沿 NATT 降水样带的纬度变化趋势.....87
6.3.3 不同萨瓦纳植被类型之间植被物候和降水之间的关系.....89
6.4 讨 论.....90
6.4.1 萨瓦纳植被物候的空间变化规律.....90
6.4.2 萨瓦纳的植被物候和气候变化.....91
6.5 结 论.....92
第七章 基于 MODIS EVI 和太阳辐射的萨瓦纳植被总初级生产力遥感反演模型.....93
摘 要.....93
关键字.....94
7.1 引 言.....94
7.2 数据和方法.....97
7.2.1 研究区和通量站点介绍.....97
7.2.2 遥感数据.....97
7.2.3 基于 EVI 的几种 GPP 模型.....99
7.3 结 果.....101
7.3.1 MODIS 产品和通量塔 GPP 之间的关系.....101
7.3.2 基于 EVI 的 GPP 反演模型对通量塔 GPP 的预测效果.....110
7.3.3 遥感计算 GPP 和通量测量 GPP 之间时间序列的比较.....116
7.3.4 遥感反演萨瓦纳区域 GPP 的空间分布.....118
7.4 讨 论.....120
7.4.1 使用遥感观测对通量塔 GPP 进行区域上的尺度拓展.....120
7.4.2 EVI 作为反映植被生产力简单有效的遥感光谱指数.....121
7.5 结 论.....122
第八章 基于遥感观测将萨瓦纳 GPP 在像元尺度上分解为树和草.....123
摘 要.....123
关键字.....123
8.1 引 言.....124
8.2 数据和方法.....126
8.2.1 研究区介绍.....126
8.2.2 遥感数据.....127
8.2.3 降水数据.....127
8.2.5 植被类型数据.....127
8.2.6 基于 EVI 和太阳辐射的萨瓦纳 GPP 模型.....127
8.2.7 树-草分解模型.....127

8.2.8 地面验证.....131
8.3 结 果.....132
8.3.1 萨瓦纳植被树-草生长的年内季节性.....132
8.3.2 萨瓦纳 GPP 和树-草比例的空间模式在雨季和旱季的差异.....135
8.3.3 萨瓦纳植被生产力与降水和植被结构类型之间的关系.....140
8.3.4 萨瓦纳 GPP 和树-草比例对极端干旱和极端湿润年份的响应...142
8.3.5 与地面测量数据之间的比较.....144
8.4 讨 论.....146
8.5 结 论.....149
第九章 结论与展望.....150
9.1 主要结论.....150
9.2 讨论和展望.....152
参考文献.....155
作者简历.....167
期刊论文（发表/投稿）.....167
会议论文和摘要.....167
会议报告.....168

# 第一章 引 言

## 1.1 选题背景和意义

### 1.1.1 物候学的研究范畴及其重要性

春去秋来，花落花开，大自然的节奏造就了地球上万物生灵生长的“韵律” 。物候学，即是一门传统的以研究这种“韵律”——即植物和动物的生活周期——以及这种周期如何受到季节和年际环境要素变化影响为目的的学科（竺可桢和宛敏渭，1963；White et al., 1997）。物候不仅反映动植物自身的季节变化，同时也是生态系统对气候变化响应程度的一种直观体现（竺可桢和宛敏渭，1973），在目前全球变化的背景下日益受到科学界的关注（Running & Hunt, 1993; Linderholm, 2006; Badeck et al., 2004）。在诸如粮食安全 (袁婧薇和倪健, 2007; Lobell et al., 2008)、霜冻灾害 (Hanninen, 2006; Ge et al., 2013；戴君虎等, 2013)、干旱 (Brown & de Beurs, 2008；牟成香等, 2013)、森林火灾风险 (Westerling et al., 2006)、生态系统碳平衡以及水分和能量交换 (Running & Hunt, 1993; Xiao et al., 2009) 等研究领域中，物候学都有非常重要的作用。在整个气候系统中，植被是气候变化的重要调控因子，对植被物候期的长期观测和准确描述，能够显著提高全球陆地生态模型对碳、水、能量循环的模拟精度（White & Nemani, 2006; Zhang et al., 2003）。植被物候信息还可以作为全球动态植被模型（Dynamic Global Vegetation Models, DVGMs）和全球循环模型（Global Circulation Models，GCMs）重要的输入参数（Running et al., 1993；温刚和符淙斌, 2000）。

目前对于植被物候的研究通常集中在北半球中高纬度地区。这些地区植被物候期的开始、结束时间以及生长季的长度主要受温度的控制（de Beurs et al., 2005；Zhang et al., 2004）。譬如 Piao 等（2006）利用 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)遥感影像发现中国温带地区植被生长季开始时间和之前两到三个月的平均温度关系最密切，但是生长季开始时间对降水年际变化的响应却因植被类型不同而不同。葛全胜等（2003）根据中国近 40 年逐日气候和物候观测资料，发现 20 世纪 80 年代以后中国东北、华北、西北、长江下游地区与云南南部等地区春季物候期出现提前，而西南地区东部东部、长江中游地区春季物候期推迟，且这些变化趋势与生长期期间的温度变化趋势相对应。Zhang 等（2004）利用 MODIS 遥感观测发现，北半球中高纬度的物候期具有较强的纬度梯度性，且森林植被的物候期长度和年平均地表温度之间存在非常强的相关性。Ge 等（2014）利用历史资料和现代物候观测资料重构了中国东部地区自 1834 到 2009 年 170 年间的春季物候指数（spring phenology index），并发现在最近 30 年中，三种植物的平均始花期以每十年 4.1 天的速率提前，并且春季物候指数与研究区二月至四月之间的温度显著相关。结合地面物候观测网络的数据和遥感卫星观测，Chen 等（2005）发现中国东部温带地区植被生长季结束时间的推

迟和晚春至夏天之间温度的降低有关，而物候期开始时间的提前和晚冬至早春之间的温度有一定关系。Dai 等（2013）利用中国 47 个物候观测网络站点的长期观测资料，对中国四种木本植物的物候期研究发现从 1960 年至 2009 年期间这些植物的生长季长度增加了 10 天。

虽然到目前为止对北半球中高纬度地区的植被物候已经进行了相当多的观测和研究，且已经建立起了比较好的植被物候参数和环境要素（主要是温度）之间的关系。这些研究结果对于我们认识气候变化对这些地区植被的影响以及植被自身的反馈等提供了非常好的资料。然而，到目前为止无论是基于地面观测还是基于遥感卫星观测，对热带萨瓦纳地区植被物候的研究都比较少。更为重要的是，对于萨瓦纳植被物候和降水及其它环境要素之间的关系尚未完全认识清楚。这在很大程度上限制了我们对于未来气候变化背景之下热带萨瓦纳的植被物候和生态系统功能所可能发生的改变的预测能力。

### 1.1.2 萨瓦纳的定义

热带萨瓦纳（tropical savanna，又称热带稀树草原）作为一个生物地理学词汇因研究侧重和地区不同存在多种定义（Gillison，1981；Walker et al., 1982；Frost et al.,1986；Scholes et al., 1993；Eamus et al., 2001）。在本次研究中，我们采用 Walker 等人的定义：萨瓦纳是一种在树木冠层下存在多年生或一年生草地覆被，且降水具有较强季节性（亦即雨季-旱季分明）的植被类型（Walker 等，1982）。在澳大利亚的特殊地理环境下，萨瓦纳的范畴被进一步扩展为包括林地萨瓦纳以及灌木林萨瓦纳（Walker et al., 1982）。由于萨瓦纳植被特殊的树-草分层结构，因此萨瓦纳可以看做是介于森林和草原之间植被类型（Hill et al., 2010）。

### 1.1.3 萨瓦纳的分布范围

萨瓦纳主要分布在热带和亚热带地区，既有在湿润地区的分布，也有在干旱地区的分布（图 1.1）（Eamus et al., 2001；Frost et al., 1986）。萨瓦纳在气候上的主要特点是其降水非常显著的年内季节性和较高的年际变率，并且伴随频繁发生的火灾以及高强度的人类活动干扰，这些使得萨瓦纳成为全球变化最为剧烈的植被类型之一（Frost et al., 1986）。同时，由于明显的干-湿季差异，使得萨瓦纳对于气候变化所导致的降水年内分布模式的改变非常敏感（Field et al., 2007）。由于萨瓦纳自身结构的复杂性以及萨瓦纳地区环境要素的高度时空变异，因而使得准确模拟萨瓦纳植被和大气之间的物质和能量交换过程成为当前面临的重大挑战（Kanniah et al., 2011；Whitley et al., 2011）。

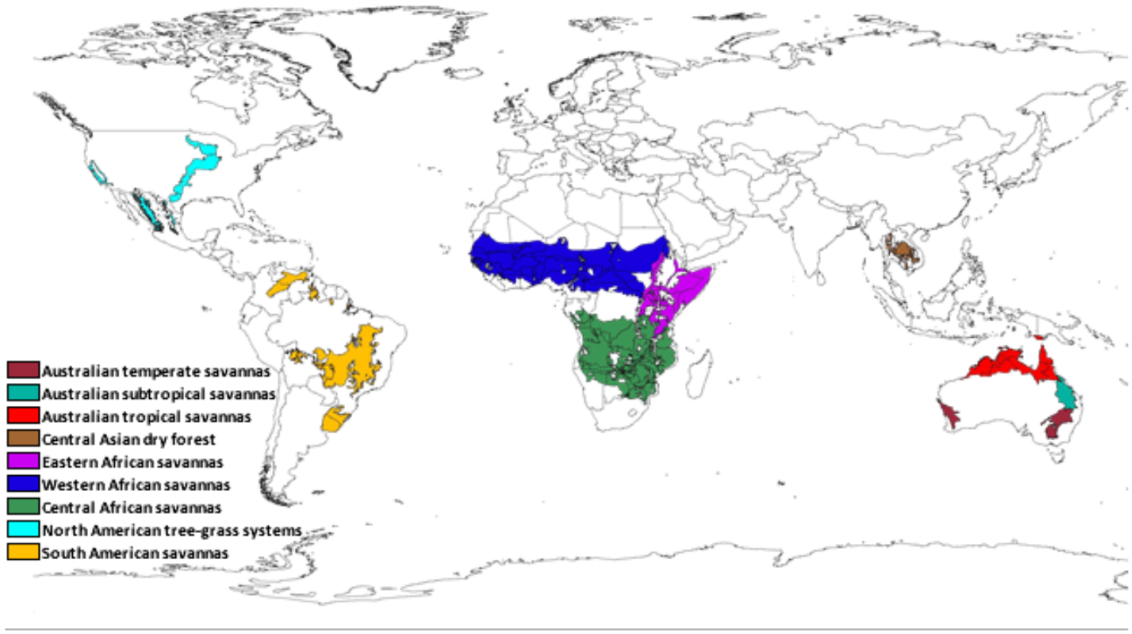


图 1.1 全球萨瓦纳的分布。图片来源于 NASA 陆地生态全球萨瓦纳项目研究网站：

http://www.nrel.colostate.edu/projects/srs/

Figure 1.1 Distribution of global savannas. Image credit: NASA Terrestrial Ecology global savanna program website: http://www.nrel.colostate.edu/projects/srs/

全球萨瓦纳的面积大约为 160 亿公顷，约占全球陆地面积的八分之一（Scholes et al., 1997）（图 1.1）。除了广泛分布之外，萨瓦纳贡献了全球陆地生态系统约 30%的总初级生产力（Gross Primary Production, GPP）（House et al., 2001）。目前全球萨瓦纳正在经历急剧的土地利用变化和大量人类活动的干扰（Walker, 1982；Hill et al., 2013），譬如说高强度的放牧和频繁发生的火灾（Russell-Smith et al., 2013），这些都使得全球萨瓦纳在植被结构和生态系统功能等方面经历着快速的变化（Asner et al., 1998）。全球萨瓦纳的土地退化已经导致了生态系统生产力的减少和生物多样性的降低，这些使得萨瓦纳在未来气候变化情景之下的生态系统功能和面对干扰时的适应力具有很大的不确定性（Williams et al., 1996；Scheiter et al., 2012），并对其支持生物多样性和人类生计方面的能力提出了疑问和挑战（Frost et al., 1986；Scholes et al., 1997；Hill et al., 2013）。

### 1.1.4 对于萨瓦纳植被物候和生态系统功能等方面的认识尚不完善

萨瓦纳作为全球重要生物群系之一，其复杂性主要体现在由不同植被功能型(Plant Functional Types, PFTs)构成的树-草分层结构,且每一层均有其独特的生理生态特征及对环境要素的响应方式（Scholes et al., 1997; Eamus et al., 2001）。同时，萨瓦纳植被的树-草比例无论是在空间上还是在时间尺度上都处于连续的变化之中（Asner

et al., 1998），这无疑增加了对萨瓦纳植被物候和其它生态系统功能进行研究，以及在模型中准确参数化萨瓦纳植被结构及功能参数的难度。

尽管萨瓦纳在全球变化中具有非常重要的作用，其对人类活动和气候变化也非常敏感，但是对于其植被物候、生态系统功能和植被结构等方面的认识尚不完善。尤其是在区域尺度上，其植被物候所具有的空间分布模式、年际变异程度、与降水等环境要素之间的关系、以及对未来气候变化的敏感性等，对这些方面的研究不足。这在很大程度上限制了我们对萨瓦纳生态系统的完整认识。目前已有研究预测全球萨瓦纳生态系统功能将会受到气候变化的显著影响（Scholes et al., 1997；Bond et al., 2003；Bowman et al., 2010；Hill et al., 2013），但是尚未有足够的观测和数据来支持和证明这些正在发生的、或将会发生的萨瓦纳生态系统的变化。本次研究所发展的方法以及得到的结论可以被应用到全球其它萨瓦纳地区，譬如南美洲萨瓦纳和非洲萨瓦纳地区，以增加我们对于热带萨瓦纳这一全球重要生物群系的认识。

## 1.2 国内外相关研究成果述评

### 1.2.1 传统地面物候观测方法

传统地面物候观测主要关注单个植株尺度上的物候现象，譬如发芽、开花、展叶等（宛敏渭和刘秀珍, 1979; Menzel et al., 2006; Williams et al., 1997）。在澳大利亚北部热带萨瓦纳地区靠近 Darwin 的一个地点，对于树木生长季的观测发现占群落主导的常绿树种在整个旱季都在持续不断的长出新的叶子，而半落叶树种（semi-deciduous）的新叶也在雨季到来之前生长出来（Williams et al., 1997）。而全落叶树种（fully-deciduous）则表现出了两种截然不同的物候模式：某些植株的展叶期在雨季第一场雨到来之前，而另一些植株的展叶期则在大约 25 毫米降水之后才开始（Williams et al., 1997）。在南非 Kruger 国家公园（植被类型为萨瓦纳），Higgins 等人的研究发现树木的展叶期通常在雨季来临之前，而林下草的生长则在雨季开始才之后（Higgins et al., 2011）。

### 1.2.2 遥感反演区域植被物候信息

虽然地面物候观测可以提供植株尺度上对于物候事件较为准确的记录，但是在整个区域、大陆、甚至全球尺度上，遥感提供了无可比拟的对于植被生长的连续观测和对物候事件的反演能力（张学霞等, 2003; Zhang et al., 2003；Ahl et al., 2006；Glenn et al., 2008；Huete et al., 2002）。由卫星搭载的光学传感器，譬如美国海洋局（NOAA）的先进型甚高分辨率辐射仪（Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR）以及美国航天局（NASA）的中等分辨率光谱仪（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS）等，能够在全球尺度上提供非常丰富的地表生物物理和生态系统功能参数，譬如地表反射率（surface reflectances）（Friedl et al., 2002），植被指

数（Vegetation Indices）（Huete et al., 2002），地表温度（Land Surface Temperature）（Wan et al., 2005），叶面积指数（Leaf Area Index）（Myneni et al., 2002），初级生产力（NPP/GPP）（Running et al., 2004）和陆面蒸散（Evapotranspiration, ET）（Mu et al., 2011）等。从这些基于卫星遥感观测的植被指数（或叶面积指数）时间序列中可以提取出许多植被物候指数，譬如生长季的开始时间、峰值时间、结束时间以及生长季的长度等（Zhang et al., 2003）。不同于传统地面物候观测主要关注单个植株尺度上的物候事件，遥感物候观测更侧重于对整个像元或区域尺度上物候事件的反演能力及物候的时空变化规律等。

### 1.2.3 基于遥感观测对萨瓦纳植被物候的研究

到目前为止利用遥感在区域尺度上对萨瓦纳植被物候研究的相对较少。在南非萨瓦纳，Archibald 等（2007）利用 AVHRR 和 MODIS 观测数据与地面观测结合，使用日照长度作为变量能够预测 86%的树木生长季开始日期，加入土壤水分变量之后对 73%的林下草生长季开始时间也可以进行预测，且预测精度均在一个月之内。但是，Seghieri 等（2009）在 Sahelian 地区的研究发现大多数树木的生长季开始时间与温度而不是与降水有关。在巴西中部萨瓦纳（在南美称作 cerrado），Ratana 等（2005）发现遥感植被指数在雨季和旱季之间的差距非常大，且年内植被指数变化的变化幅度（amplitude）与树木覆盖度（woody cover）之间存在着显著的负相关。Hill 等（2011）的研究发现利用 MODIS 植被指数的年平均物候曲线（annual phenological profile）可以将全球萨瓦纳分成不同的生态区（ecoregion）。结合地面测量和遥感观测得到的物候指数，Huttich 等（2009）将南非的萨瓦纳进行了不同类别的划分。在澳大利亚，Donohue 等（2009）进一步认识到树和草之间在物候特征上的显著差异，并基于这种差异使用 AVHRR NDVI 数据和时间序列分解模型将澳大利亚的萨瓦纳分解为常绿的树木冠层（evergreen trees）和只在雨季生长的草本植被（rain-green grasses）。

但是，在区域尺度上从遥感观测中来准确反演萨瓦纳植被的物候指数尚存在挑战。譬如在非洲萨瓦纳，Hmimina 等（2013）发现 NDVI 时间序列很难被 S 型模型（sigmoidal models）拟合，而 S 型模型，包括双逻辑斯蒂模型（double logistic model）和非对称高斯模型（asymmetric gaussian model）等是目前北半球温带地区物候研究中常用的对遥感植被指数生长曲线拟合进而提取物候指数所用的数学模型（Zhang et al., 2003；Soudani et al., 2008）。这主要是因为在热带萨瓦纳地区，降水的年际和年内变率都非常大，因此植被的生长模式，或者说季节物候曲线（seasonal phenological profile）很不规则，很难被 S 型函数来拟合。因此 Hmimina 等（2013）转而使用三次样条函数（cubic spline）这种无参方法（non-parametric method）来平滑 NDVI 时间序列，并从平滑后的时间序列中提取物候指数。利用涡度相关通量观测数据和 MODIS 植被指数数据，Jin 等（2013）发现现有的遥感物候参数提取方法在萨瓦纳存在非常大的不

确定性。因为不同萨瓦纳地区在植被结构和降水模式上存在非常大的差异，因此利用阈值方法（threshold method）来提取到的生长季开始或者结束时间在萨瓦纳地区并不准确，且由于需要对不同地区应用不同的阈值，造成提取出的物候指数在空间上缺乏可比性（Jin et al., 2013）。

### 1.2.3 遥感物候的地面验证

如何对遥感反演得到的物候期信息进行地面验证也是目前存在的一个主要挑战。因为遥感反演得到的通常是整个像元尺度上植被生长和物候期信息，而传统的地面物候观测记录的则是单个植株尺度上的物候信息，譬如始花期和展叶期等。由于如何从单个植株上的物候观测拓展到整个像元（通常在数百平方米到数千平方米之间）尚存在很大的挑战，因此很多传统地面物候观测所得到的数据并无法被直接用来对遥感反演得到的物候指数进行验证。快速发展的物候相机网络（pheno-camera network）或可成为验证遥感物候的非常好的手段。但是在热带萨瓦纳地区，由于经济发展及人口分布等因素，地面物候观测网络（包括传统肉眼观测和相机观测）的发展尚存在很大欠缺。因而寻找可以替代的用来对遥感反演物候进行验证和比较的地面观测数据源也是本次研究的重点之一。

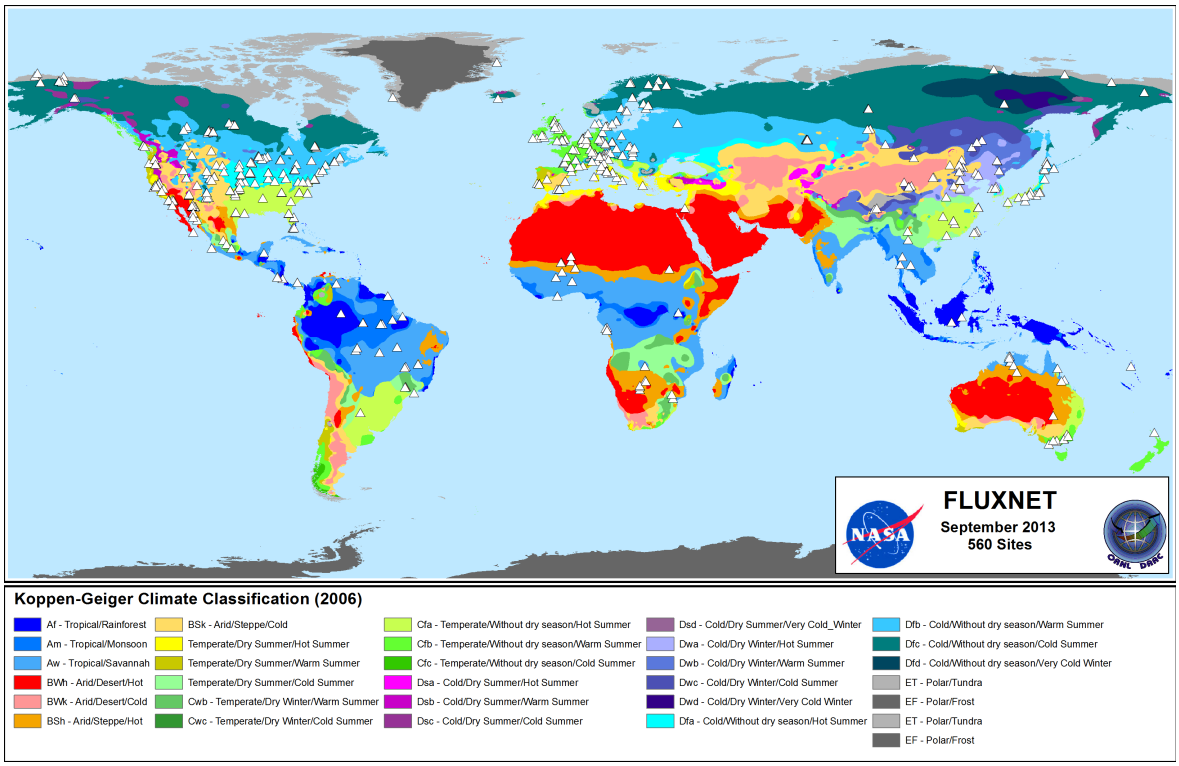


图 1.2 全球通量网络（Fluxnet）站点分布。背景为 Koppen-Geiger 气候类型图。截止 2013 年 9 月，全球共有 560 个站点加入全球通量网络。数据来源 Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC). 2013.

Figure 1.2 FLUXNET Sites and Climate (Koppen-Geiger Classification). Until September 2013, totally 560 sites

have joined the Fluxnet network. Data source: Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC). 2013.

目前发展迅速的全球涡度相关（Eddy Covariance）通量网络（Fluxnet）(Baldocchi et al., 2001）所提供的对碳通量的连续观测数据或可用来对遥感观测到的植被生长和物候指数进行验证。涡度相关通量观测以较高的时间分辨率（通常为 30 分钟）对生态系统和大气之间的二氧化碳（$CO_2$）、水分和能量交换进行连续测量，提供了对生态系统新陈代谢的精确测量数据（Baldocchi et al., 2001；Leuning et al., 2005）。依植被类型、地形和局地气象条件的差异，涡度相关通量塔的测量尺度通常在数百平方米到数平方公里之间，这与目前几种主要中等分辨率卫星传感器（MODIS，SPOT，MERIS）的空间分辨率大约一致，譬如 MODIS 不同波段的分辨率在 250 米到 1 公里之间。因此全球涡度相关通量网络的数据可以作为非常好的对遥感反演生态系统参数（物候、生产力、蒸散等）的地面验证手段。由于通量观测在时间上是高度连续的，因此可以反映出植被生长季的起止，进而对遥感反演得到的生长季物候信息进行地面验证。

自上世纪 90 年代以来，全球已经建立起了超过 500 个涡度相关通量塔，覆盖了几乎所有主要的植被和气候类型。这些通量塔组成了许多区域网络，譬如美洲通量网络（AmeriFlux），欧洲通量网络（EuroFlux），中国通量网络（ChinaFlux）和澳洲通量网络（OzFlux）等，为从生态-生理水平上去研究全球植被的生长提供了非常好的途径。图 1.2 和图 1.3 分别为全球通量网络（Fluxnet）和澳洲通量网络（OzFlux）的站点分布。

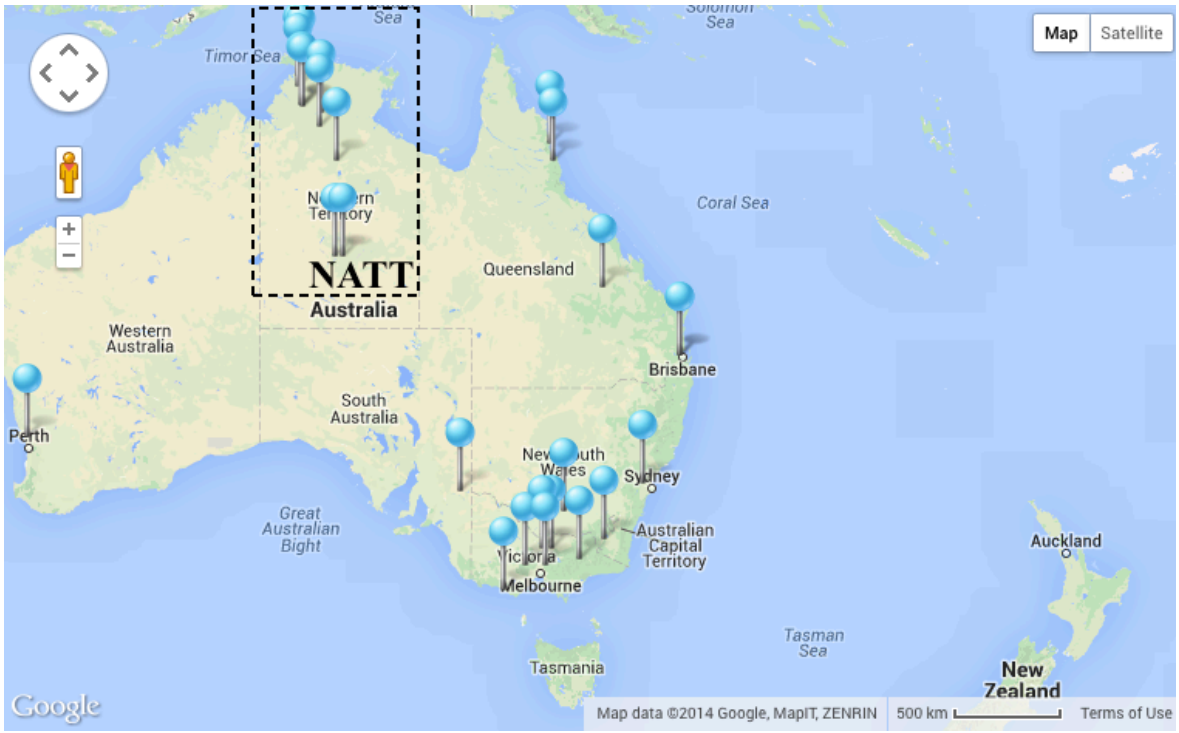

图 1.3 澳洲通量网络（OzFlux）站点分布。截止 2013 年底，共有 33 个站点加入澳洲通量网络。图上的黑色虚线框标示出了本次研究区（NATT）的大致空间范围。地图来源： http://ozflux.its.monash.edu.au。

Figure 1.3 Locations of the OzFlux (Australian and New Zealand Flux Research and Monitoring Network) sites. Until the end of 2013, totally 33 sites have joined the OzFlux network. The black dashed rectangle indicate the location of the NATT study area. Data source: http://ozflux.its.monash.edu.au.

## 1.3 本论文要解决的问题

### 1.3.1 发展适合于萨瓦纳植被生长特点的遥感物候反演方法

鉴于现有遥感物候方法在热带萨瓦纳地区的局限性，本次研究将发展一种新的更加适合热带萨瓦纳植被生长特点的遥感物候反演方法。这种方法应该能够稳定的提取整个区域上逐像元的物候信息，并且标准客观，得到的结果准确，能够反映植被物候的年际变异规律。

### 1.3.2 利用地面通量观测对遥感反演植被生长及物候信息进行验证

由于热带萨瓦纳地区传统地面物候观测数据的缺乏，本次研究将探索使用通量数据对遥感物候进行独立验证的可能性。验证应不仅包括对遥感反演物候指数的验证，还应包括对遥感所反映的整个植被生长季节曲线的验证，以检验遥感在研究热带萨瓦纳植被生长和物候方面的可用性。

### 1.3.3 分析热带萨瓦纳植被物候和环境要素之间的关系

分析遥感反演得到的物候信息和环境要素之间的关系，包括单个站点上的分析以及区域尺度上的分析。拟通过分析了解区域尺度上决定萨瓦纳植被物候空间模式变异的原因，在年际尺度上影响萨瓦纳物候年际变率的因素，以及萨瓦纳植被结构对其物候模式的影响等。

### 1.3.4 利用气象观测资料对萨瓦纳的物候进行模拟

在分析萨瓦纳物候和环境要素关系的基础之上，探索使用气象观测资料对萨瓦纳植被生长季开始时间进行模拟的方法。然后利用站点气象观测数据和区域气象格网数据分别计算站点尺度上和区域尺度上生长季开始时间，并和遥感观测到的结果进行比较，以确定模拟方法可行性以及相应的误差大小。

### 1.3.5 从遥感观测中反演关于萨瓦纳植被生产力和植被结构方面的信息

基于澳大利亚萨瓦纳树和草之间在物候特征上的显著差异，探索从遥感观测得到的物候指数中提取出更多的关于萨瓦纳植被生产力以及树-草比例等方面的信息，并和地面测量数据进行比较验证。

## 1.4 所运用的主要理论和方法

### 1.4.1 遥感反演植被生物物理信息

遥感反演植被物候主要使用的是植被指数（Vegetation Indices）（或其它产品譬如叶面积指数等）时间序列数据。植被指数最在在 1970 年代提出，到现在已经被广泛应用到对植被生长状况、叶面积、物候以及植被生产力和陆面蒸散计算等研究中（Tucker et al., 1985; Zhang et al., 2003; Huete et al., 2002; Sims et al., 2008; Nagler et al., 2009）。植被指数在本质上反映的是冠层的“绿度”（greenness）大小。植被指数中包含了叶绿素含量、叶面积和冠层结构等多方面的信息（Glenn et al., 2008; Huete et al., 2002）。

植被指数的理论和实验基础主要是基于叶片中的叶绿素 a（chlorophyll-a）和叶绿素 b（chlorophyll-b）对光谱中的红光区域有较强烈的吸收（最大吸收波长在 690 纳米左右），同时叶片的细胞壁对于近红外光（near-infrared, NIR）（850 纳米）有着强烈的反射（reflectance）和传导（transmittance）（Tucker et al., 1979）。这一特点使得植物叶片的吸收谱在 650-850 纳米这一区间存在着显著的吸收-反射对比，而植被指数正是基于此来反映植被的生长状况（Glenn et al., 2008）。植被吸收谱（或反射谱）在红光-近红外波段的对比可以通过不同的数学公式来描述，譬如最简单的比例植被指数（Simple Ration, SR）：

$$\mathrm{SR} = \frac{\rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{red}}} \tag{1.1}$$

其中 $\rho_{\mathrm{Red}}$ 和 $\rho_{\mathrm{NIR}}$ 是光谱仪在地表或大气层之上（top-of-atmosphere）测量得到的目标物体在红光（Red）和近红外波段（NIR）上的反射率（reflectance）。像元内绿色植被的数量越多（亦即叶绿素含量越高），那么红光-近红外波段的对比就越为强烈，因此植被指数的数值也就越大。

图 1.4 以澳大利亚北部萨瓦纳研究区 Howard Springs 站点为例，提取了该站点 MODIS 七个波段在生长季不同时刻的反射率。从图上可以看到，在生长季最高峰的时刻（maximum），植被在近红外波段（841-876 纳米）具有强烈的反射，而在可见光，尤其是红光波段（620-670 纳米）具有一个较明显的吸收谷（图 1.4）。而随着从雨季进入旱季，植被的生长达到了一个低值（minimum），而此时随着叶面积的减少，植被在近红外波段的反射率下降非常明显，反映在植被指数上就是近红外波段反射率和红光反射率的比例降低，亦即植被指数的减少（图 1.4）。

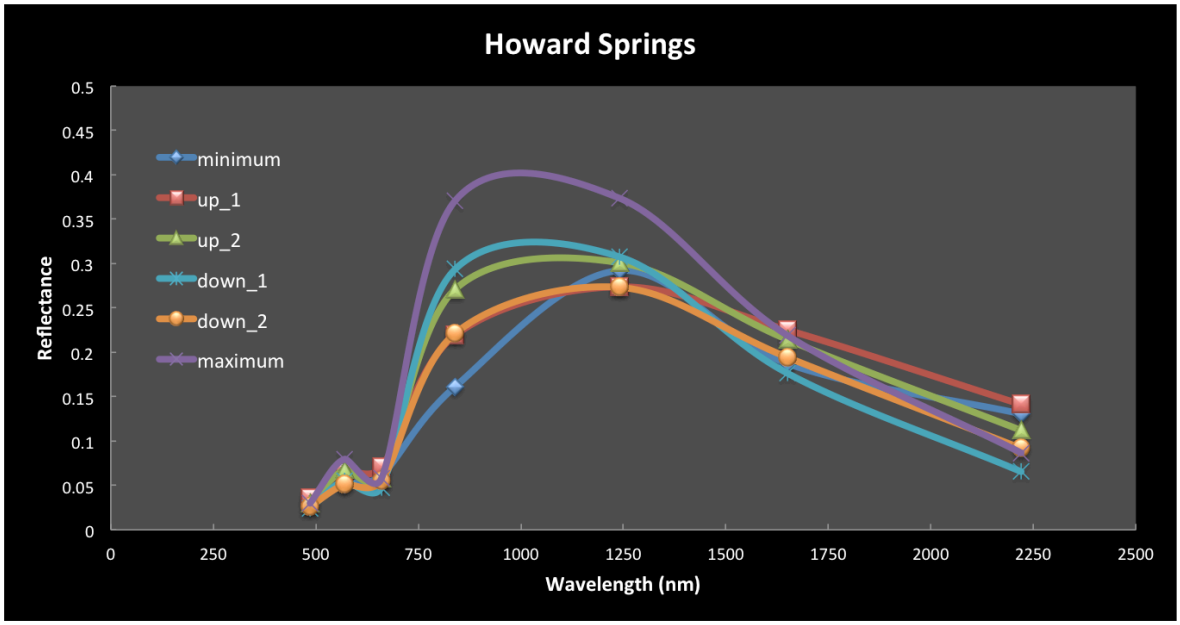


图 1.4 MODIS 七个波段在年内的季节变化，以北澳热带萨瓦纳研究区 Howard Springs 站点为例。波段反射率信息提取自 MOD09A1 数据。2000 年 7 月至 2001 年 6 月。图上标注说明：minimum 表示在旱季是植被生长达到最小时的光谱反射率；up_1 和 up_2 表示在生长季开始阶段的光谱反射率；down_1 和 down_2 表示在生长季结束阶段的光谱反射率；maximum 表示在生长季植被绿度达到最大值时的光谱反射率。

Fig.1.4 Seasonal variations in reflectance of 7 MODIS bands, a sample from Howard Springs that located at north Australian tropical savannas. The reflectance was sampled from MOD09A1 from July 2000 to June 2001.

其它植被指数，譬如目前常用的归一化植被指数（Normalised Difference Vegetation Index, NDVI）和增强型指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）都可以看做是对于 SR 植被指数的扩展和加强（Huete et al., 2002）。譬如 SR 植被指数的变化范围可以达到 0~∞，而 NDVI 通过归一化之后将数值变换范围调整为-1~+1，从而方便了实际使用。而 EVI 作为对 NDVI 的增强和发展，对于蓝光、红光和近红外波段进行了优化组合，从而有效的减轻了土壤背景和大气噪音对于植被指数的影响（Huete et al., 2002）。植被指数作为一种“无缝”（seamless）的遥感生物物理指数，在时间上和空间上的计算均保持一致，不需要对特定植被类型和土壤类型进行调整，这使得植被指数可以作为一种对全球不同区域植被进行比较、并在长时间序列上对植被生长状况进行连续观测的光学遥感指数（Glenn et al., 2008）。

Tucker 等比较了草地生物量、水分含量、叶绿素含量和不同波段之间的关系，发现 NDVI 和叶绿素含量之间存在很强的关系，而叶绿素含量和生物量以及水分含量之间又具有较强联系（Tucker et al., 1979）。Monteith（1972）发现植被指数和植被冠层光吸收之间存在较强的关系，而冠层光吸收和植被的初级生产力之间存在紧密联系（McKee, 1972）。同时，研究发现植被指数和植被吸收光合有效辐射（absorbed photosynthetically active radiation, APAR）之间存在接近线性的关系（Sellers, 1987; Glenn et al., 2008），因此和与光吸收相关的植物生理过程譬如光合和蒸散之间有较好

的关系（Rahman et al., 2005; Huete et al., 2006; Sims et al., 2008）。这些都说明植被指数可以作为一种可靠的、且具有一定生物物理意义的遥感指数来对植被的生长、物候和生态系统功能等进行区域或全球尺度上的研究。

### 1.4.2 涡度相关技术对生态系统和大气之间碳、水通量的测量

为了对遥感反演的到的植被生长状况和物候信息进行地面验证，本次研究使用多个热带萨瓦纳站点上由涡度相关技术测量得到的长时间序列碳通量数据。利用涡度相关技术对水平同质地表和大气之间物质和能量之间交换的测量最早由 Montgomery (1948), Swinband (1951)和 Obukhov(1951)等人提出。然而连续的涡度相关测量直到上世纪 90 年代在新一代的声学风速表（sonic anemometer）和近红外气体分析仪（infrared gas analyser）等新技术的提出之后才得到了快速的发展和广泛的应用。涡度相关技术的理论基础在于大气中向上和向下两个方向上的湍流运动（turbulent motions）中包含了微量气体譬如 $CO_2$ 的传输（Baldocchi et al., 2003）。而涡度相关技术正是对于这些湍流中 $CO_2$ 和水汽进行高频率采样和分析以确定在植被冠层和大气界面上发生的净气体和能量交换的大小（Baldocchi et al., 2003）。关于本论文中使用到的涡度相关观测数据的介绍和预处理方法请参见第四章第二小节数据和方法部分。

### 1.4.3 利用奇异波谱分析对遥感观测数据进行噪音过滤和时间序列重建

由于受到大气中水汽、气溶胶和云层的多种干扰，卫星遥感传感器在大气层之上所直接观测得到的数据需要通过一定的处理来滤除掉数据中的噪音，以增加数据的可用性。本次研究采用奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis, SSA）这种数学方法对遥感观测数据进行降噪和时间序列重建。奇异波谱分析（以下简称 SSA）是一种非常适合对非线性的时间序列数据进行分析的方法（Buermann, 2002; Elsner & Tsonis, 1996; Ghil et al., 2002; Kondrashov & Ghil, 2006; Wang & Liang, 2008）。SSA 方法的基础是将一个时间序列嵌入到一个高维度的欧几里得空间（Euclid space）中并选择包含原始时间序列主要信息的几个子空间来对时间序列进行重构（类似主成分分析），从而滤除掉掉原始数据中所包含的随机噪音（Alexandrov，2009）。关于 SSA 方法的详细介绍请参见第三章第二小节数据和方法部分。

## 1.5 基本思路和论文结构

论文的总体目标是在澳大利亚北部一个典型降水样带上，结合遥感、涡度相关和气象三种观测方法和数据源，在不同时空尺度上对萨瓦纳植被物候和初级生产力的时空变异模式及其与环境要素之间的关系进行研究。具体目标包括：

1. 开发出一种适用于热带萨瓦纳植被生长特点的遥感物候指数反演方法，以实现对区域尺度上逐像元逐年多种植被物候指数的有效提取；

2. 在研究区的多个站点上使用碳通量数据对遥感反演物候结果进行地面验证，

以检验 MODIS EVI 对萨瓦纳植被生长季节性的捕捉能力；

3. 分析遥感反演得到的萨瓦纳植被物候在南北跨度 1100 公里生态-降水样带上的空间变化趋势，以及从 2000 年到 2013 年之间的年际变化规律。并研究萨瓦纳植被物候和降水以及植被结构类型之间的关系；

4. 研究使用气象观测资料对萨瓦纳植被生长季开始时间进行模拟的方法，并在区域尺度上使用气象插值数据计算逐格点的生长季开始时间。通过和遥感观测结果之间进行比较，以确定使用气象数据模拟萨瓦纳植被生长季开始时间的可行性；

5. 探索从遥感观测到的萨瓦纳植被物候信息中提取出更丰富的生态系统参数，包括初级生产力、植被结构以及树-草比例等，并结合地面测量数据来对遥感反演结果进行验证。

论文的第二章为研究区简介，主要介绍了研究区的空间范围、气候条件和植被类型等信息。同时对研究中使用到的六个地面通量站点的情况进行了介绍。

论文的第三章发展了一套新的适应于热带萨瓦纳植被生长特点的遥感物候反演方法。该方法首先利用奇异波谱分析对 MODIS 植被指数进行降噪处理和时间序列重构，然后对时间序列进行一阶差分得到植被生长速率，并进一步从生长速率中提取植被生长的关键物候节点。

论文的第四章在澳大利亚北部萨瓦纳地区的三个通量站点上将 MODIS 观测到的植被生长信息和物候指数与通量塔 GPP 反映出的植被生长和物候期信息之间进行了比较，并探讨了在干旱萨瓦纳地区遥感反演物候信息不确定性增加的原因。

论文的第五章中通过将遥感反演植被生长季开始时间与插值格网降水数据结合，计算出了区域上逐像元萨瓦纳植被生长季开始所需累积降水量的大小。并使用 2011-2012 年的逐日降水数据对植被生长季开始时间进行了模拟并进行了误差分析。

论文的第六章中使用基于奇异波谱分析的遥感物候反演方法从 13 年的 MODIS EVI 数据中计算了整个研究区多个植被物候参数。并在 1100 公里的萨瓦纳生态降水样带上分析了植被物候的空间和年际变化规律等。并通过使用降水数据和植被类型数据，分析了不同植被类型的物候和降水之间的关系。

论文的第七章在研究区的六个通量站点上比较了多种遥感产品和 GPP 反演模型与涡度相关通量塔测量得到的 GPP 之间的关系，并在此基础上提出了一种新的完全基于遥感数据的热带萨瓦纳区域 GPP 反演模型。

论文的第八章基于澳洲萨瓦纳树木和林下草之间在生长季节性（亦即物候特征）上的显著差异，将遥感估算的 GPP 在像元尺度上通过时间序列模型分解为来自树木和来自林下草两部分。并对北澳典型降水将带上萨瓦纳植被生产力和树-草比例的时

空变化模式进行了分析。

论文的第九章对整个研究进行了总结并概括了主要的研究结论和研究中的不足，并对未来的研究进行了展望。

# 第二章 研究区介绍

## 2.1 研究区的空间界定

论文的研究区域设定在澳大利亚北部一个南北长约1100公里的生态-降水样带上，简称为北澳热带样带（Northern Australian Tropical Transect, NATT）（Koch et al., 1995）（图 2.1）。北澳热带样带（以下简称为NATT）研究区的面积大约为 138 万平方公里，纬度界限为 12°S 到 23°S，经度界限为 128°E 到 138°E（图 2.1）。NATT 最早在上世纪 90 年代中期提出，作为国际地圈-生物圈计划（International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP）的一部分（Koch et al., 1995），和南非的 Kalahari 样带以及西非的 SALT 样带（Savanne a Long Terme），一起成为国际上研究热带萨瓦纳比较集中的几个典型研究区（Beringer et al., 2011; Bowman et al., 1988; Cook et al., 2001; Eamus et al., 2013; Cleverly et al., 2013; Walker et al., 1999; Williams et al., 1997）。相比较全球其它萨瓦纳地区，澳大利亚北部萨瓦纳由于人类活动的干扰非常小，因此在生态上具有较高的完整性（ecologically intact），使得我们更有可能认识清楚萨瓦纳植被物候和生产力与环境要素之间的关系（Beringer et al., 2011）。因此，北澳热带降水样带（NATT）是一个理想的研究热带萨瓦纳植被的 “天然实验室”（living laboratory）（Williams et al., 1996; Hutley et al., 2011）。

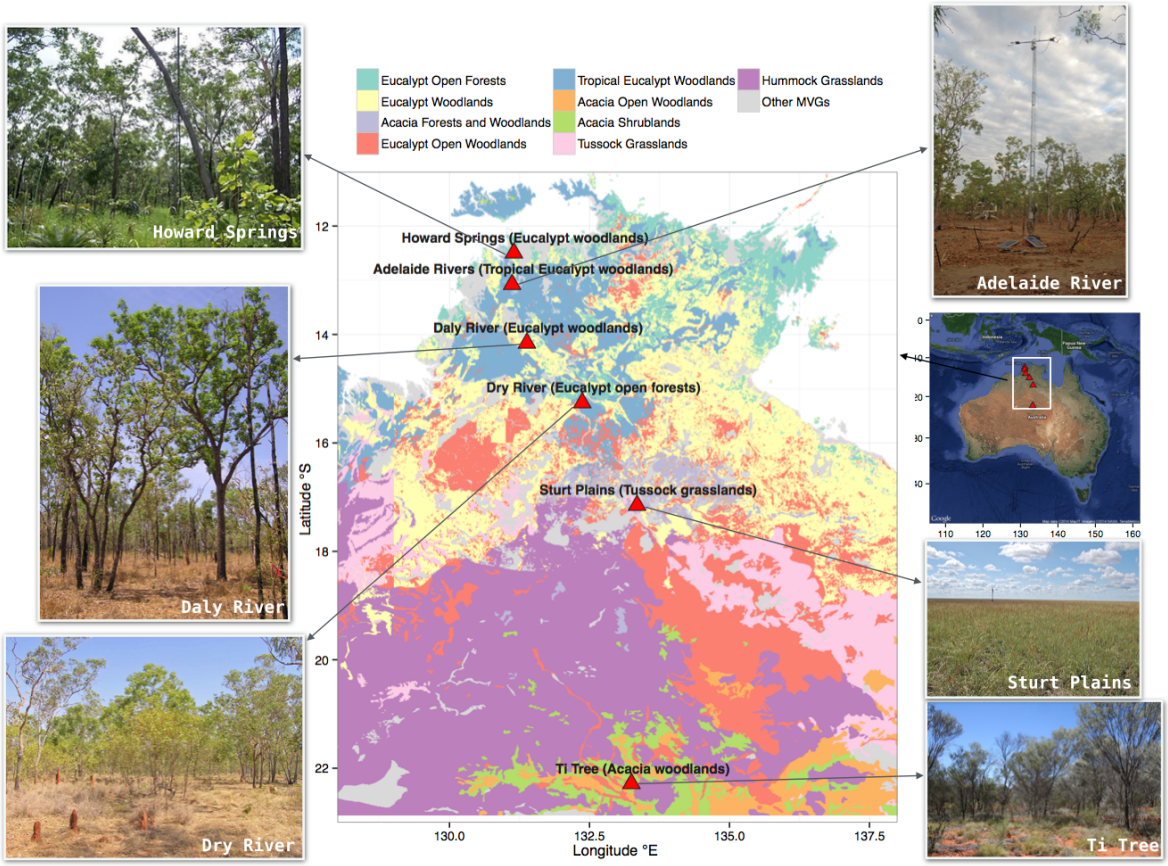


图 2.1 北澳热带样带（Northern Australian Tropical Transect, NATT）研究区的空间范围和主要植被类型分布。图上同时标注了六个通量塔观测站的位置。植被类型数据来自于澳大利亚国家植被信息系统（National Vegetation Information System, NVIS）中提供的主要植被组（Major Vegetation Groups, MVGs）数据。右侧的小图显示了研究区在澳大利亚大陆上的具体位置，图像背景来源于 Google Earth 数据。六个地面通量站点分别为：Howard Springs (Eucalypt woodlands，桉树林地)；Adelaide River (tropical Eucalypt woodlands，热带桉树林地)；Daly River (Eucalypt woodlands，桉树林地)；Dry River (Eucalypt open forests，桉树疏林)；Sturt Plains (Tussock grasslands，丛生草地)；Ti Tree (*Acacia* woodlands，合金欢树林地)。

Figure 2.1 Spatial extent of the North Australian Tropical Transect (NATT) study area. Six EC flux sites have been labelled on the figure. White solid squares show the 100 pixel samples (sized-up for visualisation) from Howard Springs (131.150°E, 12.495°S) to Ti Tree (133.249°E, 22.283°S) along the NATT. Background is the Australian Major Vegetation Groups map. The six flux tower sites are: Howard Springs (Eucalypt woodlands); Adelaide River (tropical Eucalypt woodlands); Daly River (Eucalypt woodlands); Dry River (Eucalypt open forests); Sturt Plains (Tussock grasslands); Ti Tree (*Acacia* woodlands).

表 2.1 NATT 研究区内主要植被类型的覆盖面积、物种信息和降水量。

Table 2.1 Summary of major vegetation groups in the NATT study area.

| **英文名称** | 中文名称 | **占研究区面积比例 (%)** | 年**平均降水量±标准差 (mm)** | 年降水变异系数**±标准差 (%)** | 冠层树种 | 林下层草种 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Eucalypt Open Forest | 桉树疏林 | 4.21 | 1392±237 | 27±5 | *Eucalyptus tetrodonta, E. miniata, E. nesophila* | *Triodia spp., Plectrachne spp., Sorghum spp.* |
| Tropical Eucalypt Woodlands | 热带桉树林地 | 8.07 | 1311±259 | 25±5 | *E. tectifica, E. tetrodonta, E.miniata, C. dichromophloia* | *Sorghum spp., Triodia spp., Chrysopogon spp.* |
| Eucalypt Woodlands | 桉树林地 | 20.79 | 1025±228 | 32±7 | *E. tetrodonta, E. miniata, Corymbia dichro mophloia, C. polycarpa, C. bella* | *Themeda triandra, Heteopogon spp., Sorghum spp., Schizachyrium fragile* |
| Eucalypt Open Woodlands | 桉树开阔林地 | 14.48 | 685±251 | 42±11 | *C. dichromophloia , E. tetrodonta, E. miniata, C. terminalis, E. pruinosa* | *Sorghum spp., Heteopogon spp., Chrysopogon spp., Bothriochloa spp., Aristida spp.* |
| *Acacia* Forests and Woodlands | 合金欢树森林和林地 | 2.04 | 811±98 | 36±5 | *Acacia shirleyi, A. catenulate, A. aneura, A. cambagei, A. harhophylla* | *Eremophila spp., Dodonaea spp., Atriplex spp., Triodia spp., Plectrachne* |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tussock Grasslands | 丛生草地 | 7.57 | 596±152 | 43±9 | | *Astrebla spp., Austrodanthonia spp., Austrostiha spp., Dicanthium spp.* |
| Hummock Grasslands | 圆丘草地 | 28.75 | 509±111 | 49±8 | *Casuarina decaisneana, E. gongylocarpa, A. aneura* | *Plectrachne schinzii, T. pungens, T. basedowii T. irritans* |
| *Acacia* Open Woodlands | 合金欢树开阔林地 | 2.81 | 379±59 | 60±10 | *A. aneura, A. georginae, A. tephrina, A. cam bagei, A. harpophylla* | *Atriplex spp., Maireana spp., Sclerolaena spp., Triodia spp., Eragrostic spp.* |
| *Acacia* Shrublands | 合金欢树灌木林 | 2.89 | 405±92 | 55±9 | *A. aneura, A. cambadgei, A. victoriae, A. brachystachya, A. resinomarginea* | *Triodia spp., Atriplex* |

除了区域分析之外，同时在研究区选择了六个地面站点来进行站点尺度上的分析（图 2.1）。表 2.2 列出了这六个站点的基本信息。这六个站点沿 1100 公里的 NATT 降水样带分布，分别代表了不同的降水梯度和萨瓦纳植被类型（图 2.1；表 2.2）。其中 Howard Springs 为 NATT 最北端的站点，其植被类型为桉树林地（Eucalypt woodland），年平均降水量为 1722±341mm，树木建群种为 *Eucalyptus miniata, E. chlorostachy 和 Terminate ferdinandiana*，而草地建群种主要为 *Sorghum spp.*（表 2.2）（Hutley et al., 2011; Beringer et al., 2011）。Ti Tree 为 NATT 最南端的站点，其植被类型为合金欢树林地（*Acacia* woodland），年平均降水量为 443±222mm，树木建群种为 *C. opaca, E.victrix 和 Acacia aneura*，而草地建群种主要为 *P. latifolia, T. mitchlliana, E. eriopoda 和 E. pulchella*（Cleverly et al., 2013）。

表 2.2 六个通量站点的信息。

Table 2.2 Summary of six major NATT sites.

| 站点名称 | 经度 (°E) | 纬度 (°S) | 海拔 (m) | 植被类型 | 冠层树种 | 林下层草种 | 冠层高度 (m) [a] | 土壤类型 | 年平均降水量±标准差 (mm) [b] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Howard Springs | 131.150 | 12.495 | 64 | Eucalypt Woodlands | *Eucalyptus miniata, Erythrophleum chlorostachys, Terminalia ferdinandiana* | *Sorghum spp.* | 18.9 | red kandosol | 1722 ± 341 |
| Adelaide Rivers | 131.118 | 13.077 | 90 | Tropical Eucalypt Woodlands | *E. tectifica, Planchonia careya, Buchanania obovata* | *Sorghum spp.* | 12.5 | yellow hydrosol | 1692 ± 373 |
| Daly River | 131.383 | 14.159 | 52 | Eucalypt Woodlands | *T. grandiflora, E. tetrodonta, E. latifolia* | *Sorghum spp., Heteropogon triticeus* | 16.4 | red kandosol | 1295 ± 334 |
| Dry River | 132.371 | 15.259 | 175 | Eucalypt Open Forests | *E. tetrodonta, E. dichromophloia, Corymbia terminnalis* | *Sorghum. spp, Themeda triandra, Chrysopogon fallax* | 12.3 | red kandosol | 1063 ± 277 |
| Sturt Plains | 133.350 | 17.151 | 210 | Tussock Grasslands | -- | *Astrebla spp.* | 0.1 | grey vertosol | 778 ± 304 |
| Ti Tree | 133.249 | 22.283 | 606 | *Acacia* Woodlands | *C. opaca, E. victrix, Acacia aneura* | *Psydrax latifolia, Thyridolepsis michelliana, Eragrostis eriopoda, Eriachne pulchella* | 6.5 | red kandosol | 443 ± 222 |

从 2001 年起至今，在这六个站点上建立起了涡度通量观测塔（Eddy Covariance flux tower），分别进行了长期或短期的涡度通量观测。这些通量观测数据提供了站点尺度上更为详细的关于生态系统和大气之间水、热交换的信息，结合区域尺度上的遥感观测，可以更好的对热带萨瓦纳的物候模式和生态系统功能进行研究和分析。除了

连续的通量观测之外，这六个站点中还有较为丰富的辅助地面测量数据，譬如气象要素的观测、叶面积指数（包括冠层树木和下层草地）的测量、以及太阳辐射和光合有效辐射等观测等，可以用来和遥感观测进行比较。

## 2.2 研究区的植被类型

NATT 研究区的植被类型呈现出从北到南沿纬度过渡的趋势（图 2.1）。在北部较为湿润的地区，植被主要为桉树森林和林地，然后向南逐渐变为开阔林地和草地（图 2.1）。在 NATT 南部干旱地区则主要是合金欢树林地和灌木林地（图 2.1）。NATT 北部的萨瓦纳的冠层（overstorey）建群树种为常绿桉树（*Eucalyptus* 和 *Corymbia*），而在中层（mid-storey）则主要是半落叶（semi-deciduous）和全落叶（fully-deciduous）的树木和灌木，林下层草地（understorey）则主要为一年生和多年生的 $C_4$ 草种（Egan & Williams, 1996; Hutley et al., 2011）。在 18°S 以南桉树逐渐减少，而合金欢树（*Acacia aneura*）则替代桉树成为主要的冠层建群种（Bowman et al., 1996; Walker et al., 1999）。

在北部季风区的萨瓦纳植被林下草地主要由高草草种（株高 > 100 cm）组成，包括 *Sorghum*（一年生），*Themeda* 和 *Heteopogon* 等，这些草种的生长具有非常明显的季节性（McKeon et al., 1990; Walker & Gillison, 1982）。向南则逐渐变为中等高度的草种（株高在 30 到 100 cm 之间），包括在桉树林地下层的 *Aristida pruinosa*（Walker & Gillison, 1982）。丛生草地（Tussock grasslands）的建群种主要为一年生的 *Iseilema sp.*，多年生 *Astrebla sp.*，和一些豆科牧草，这些草种的生长相比较北部季风区的草种季节性较弱（McKeon et al., 1990; Walker & Gillison, 1982）。在 NATT 广大的南部和西部干旱与半干旱地区，圆丘草地（Hummock grasslands）的建群种主要为多年生的硬叶 *Triodia spp.*和软叶 *Plectrachne spp.*，生长季节性较弱（Walker & Gillison，1982）。在 NATT 最南部的合金欢林地和合金欢灌木林地上，林下层草地建群种主要为一些 $C_3$ 和 $C_4$ 草种，譬如 *Eragrostis sp.*, *Aristida ramosa*, *Thyridolepis mitchelliana* 和 *Stipa sp.* 等，呈现出并不明显的生长季节性（Walker & Gillison, 1982）。

整个研究区的植被根据生长型、植被结构和植物种类组成共划分为九个主要的植被类型（图 2.1）。表 2.1 列举了这些植被类型的主要特征，包括物种组成和降水量等信息。根据每种植被类型在研究区所占的面积依次为：圆丘草地（Hummock grasslands，占 28.75%），桉树林地（Eucalypt woodlands，占 20.79%），桉树开阔林地（Eucalypt open woodlands，占 14.48%），热带桉树林地（tropical Eucalypt woodlands，占 8.07%），丛生草地（Tussock grasslands，占 7.57%），桉树疏林（Eucalypt open forests，占 4.21%），合金欢灌木林（*Acacia* shrublands，占 2.89%），合金欢开阔林地（*Acacia* open woodlands，占 2.81%），合金欢森林和林地（*Acacia* forests and woodlands，占 2.04%）（图 2.1；表 2.1）。

## 2.3 研究区的降水

NATT 研究区的气候特征为典型的热带季风气候，具体表现为降水在一年中呈现出明显的雨季-旱季差异（Suppiah, 1992）。图 2.2 显示了 NATT 研究区的年平均降水（图 2.2A）和降水年际变率（图 2.2B）的空间分布特征。可以看到整个 NATT 地区的降水呈现出明显的纬度变化梯度（图 2.2A）。年平均降水量从北部靠近海岸线地区的超过 1800 毫米向内陆逐渐递减，直至南部干旱地区年平均降水量减少到 200 毫米左右（图 2.2A）。

图 2.2B 同时显示伴随着年平均降水量的减少，降水年际变率呈现出从北到南逐渐增加的趋势。降水年际变率在北部湿润萨瓦纳地区最低，年降水量的变异系数（coefficient of variance, $CV_{PPT}$）通常在 30%以下（图 2.2B）。降水量的年际变率自 Sturt Plains 以南呈现出显著增加的趋势，到最南部干旱地区降水量的变异系数超过 50%（图 2.2B）。从图 2.2 上可以看到研究中会用到的六个地面通量站点的分布很好的覆盖了整个降水梯度和不同植被类型，能够反映不同降水量和降水变率下热带萨瓦纳植被物候的变化特征。

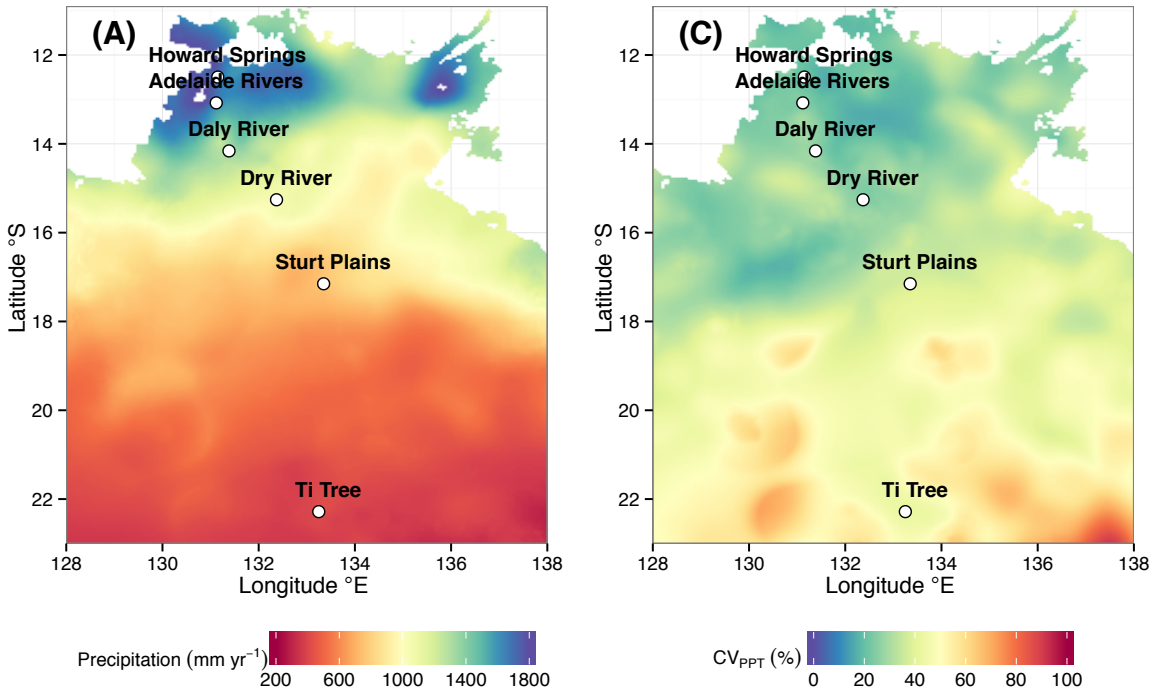


图2.2 北澳大利亚热带样带（NATT）多年平均年降水（mm $yr^{-1}$）和降水年际变率 $CV_{PPT}$（coefficient of variance, %）空间分布，2000-2012。图上同时标注了研究中用到的六个地面通量站点的位置。降水数据来自澳大利亚气象局国家气候中心提供的插值格网降水数据。

Figure 2.2 Spatial patterns of the mean annual precipitation (mm $yr^{-1}$) and CV of annual precipitation (%) over the NATT study area, 2000-2012. The locations of six NATT EC flux sites are labelled on the graph as well. The precipitation data is provided by the National Climate Center, Bureau of Meteorology, Australia.

为了了解降水量在年内的季节分布特征，图 2.3 显示了 NATT 研究区月平均降水量在雨季（wet season）和旱季（dry season）的空间分布差异。雨季定义为从 1 月份至 3 月份，而旱季定义为从 7 月份至 9 月份。从图 2.3 可以看到 NATT 研究区的降水量年内分布呈现非常强烈的雨季-旱季对比，为典型的热带萨瓦纳气候。在雨季（1-3 月），北部地区的月降水量可以达到甚至超过 400 毫米，然后向南逐渐减少，直至在广大南部干旱地区减少至 100 毫米以下（图 2.3A）。然而到了旱季（7-9 月），整个研究区的降水量显著减少，在所有格点上旱季的月平均降水量均低于 12 毫米，而超过 70%的格点上旱季月平均降水量在 5 毫米以下（图 2.3B）。

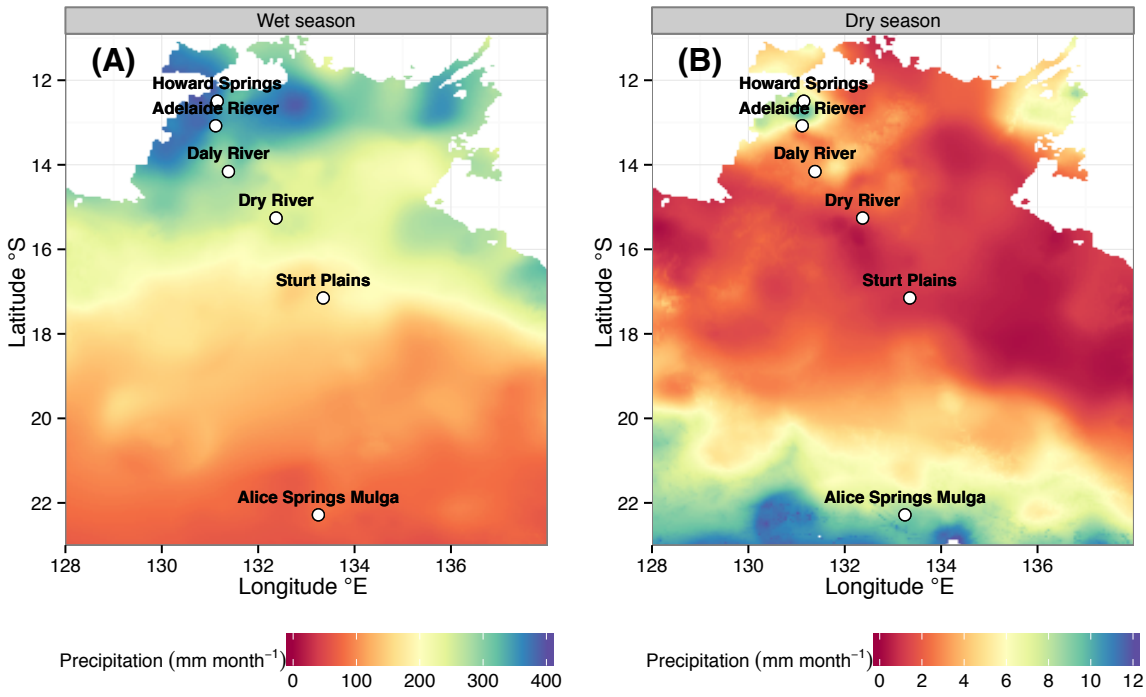


图 2.3 北澳热带样带（NATT）研究区雨季（wet season）和旱季（dry season）月平均降水量（mm month$^{-1}$）的空间分布差异。雨季定义为 1 月份至 3 月份，而旱季定义为 7 月份至 9 月份。由于月平均降水在雨季和旱季差异非常大，因此在两张图上使用了不同的显示图例（雨季：0-400 毫米；旱季：0-12 毫米）。

Figure 2.3 The comparison of mean monthly precipitation (mm month$^{-1}$) during the wet season (January to March) and dry season (July to September) over the NATT study area. Noted that due to the large differences in the precipitation amount, the scale bars in (A) wet season (0-400 mm) and (B) dry season (0-12 mm) are different.

为了更好的检视降水量在 1100 公里的 NATT 样带上沿纬度的变化趋势，图 2.4 显示了从 NATT 最北端站点 Howard Springs 到最南端站点 Ti Tree 在旱季和雨季的月平均降水量，以及年平均降水量和年降水变异系数的纬度变化趋势。其中平均年降水呈现出沿纬度指数衰减的趋势，从最北端的 Howard Springs 的 1764 毫米向南以每纬度 130.1 毫米的速度递减，直至减少到最南端 Ti Tree 的 365.26 毫米（图 2.4A）。

与平均年降水的逐渐递减不同，年降水的变异系数呈现出更为复杂的纬度分布特征（图 2.4B）。在 Howard Springs 附近，年降水的变异系数只有 20%左右，然后在 16°S 左右增加至 25-30%（图 2.4B）。年降水的变异系数在 16°S 以南呈现出一个快速增加的趋势，在纬度大约为 21.17°S 时达到最大值 48.49%（图 2.3B）。然而，在最南部干旱地区年降水的变异系数并没有继续增加，相反却出现了一个局部低值，在 22.25°S 左右减少到 42.5%（图 2.4B）。

有趣的是，通过检视植被类型沿 NATT 的纬度分布，可以看到年降水的变异系数在 16°S 左右的快速增加伴随植被类型从北部湿润地区的桉树疏林（Eucalypt open forest）和桉树林地（Eucalypt woodlands）向圆丘草地（Hummock Grasslands）的过渡（图 2.4B）。而同时最南部伴随着降水年际变率的减少，植被类型也由圆丘草地逐渐变为合金欢开阔林地（*Acacia* open woodlands）和合金欢灌木林（*Acacia* shrublands）（图 2.4B）。

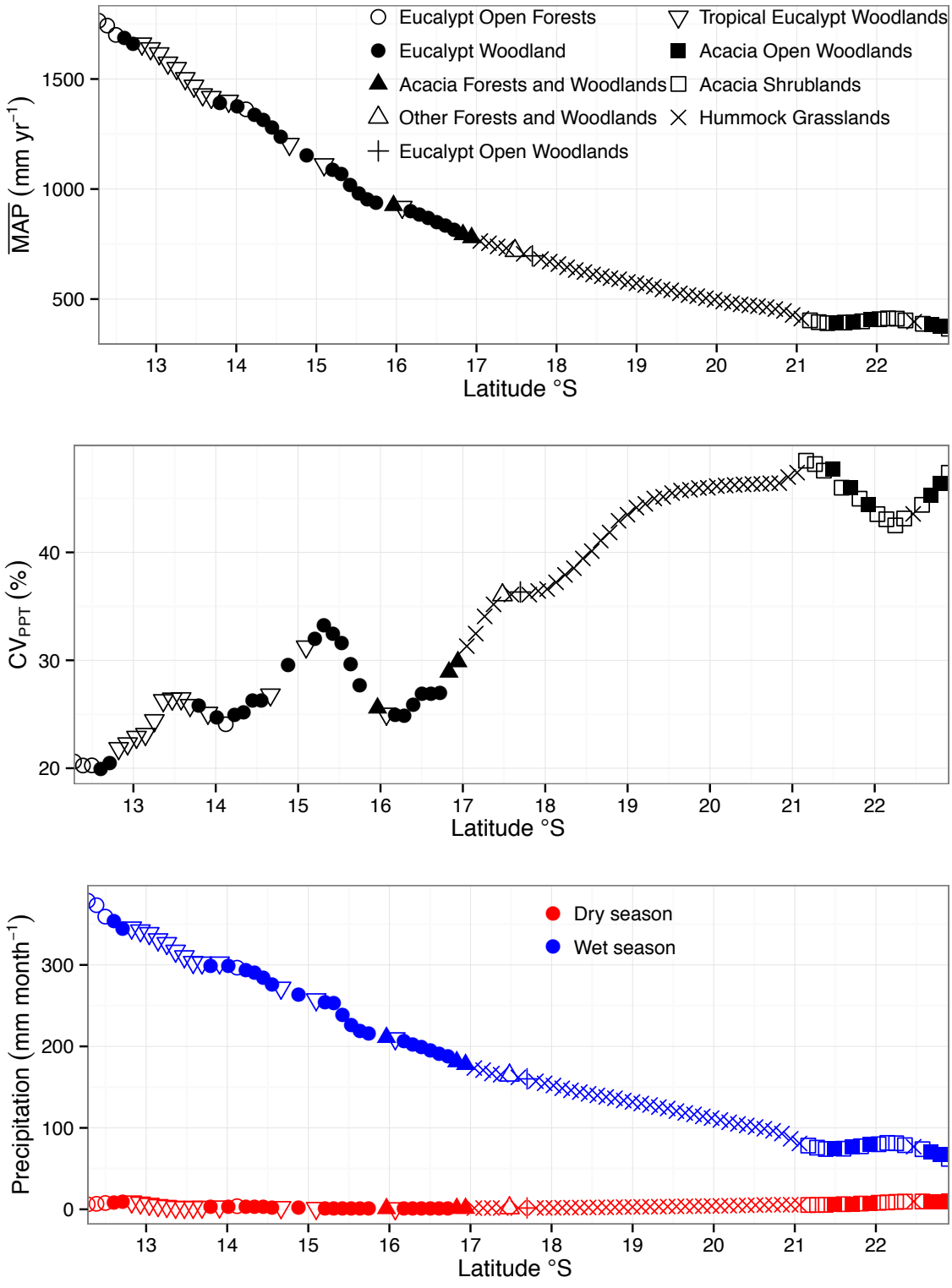


图 2.4 北澳热带样带（NATT）降水量和降水变率沿纬度从 Howard Springs 到 Ti Tree 的纬度变化特征，2000-2012。（A）年平均降水量（mm $yr^{-1}$）；（B）年降水量的变异系数（CV, %）；（C）旱季（7 月-9 月）和雨季（1 月-3 月）月平均降水量（mm $mo^{-1}$）的对比。每个采样点在图上的形状代表了采样点（5 平方公里）内主要的植被类型。降水数据来源于澳大利亚气象局（Australian Bureau of Meteorology）提供的 5 公里格点插值降水数据

（Interpolated Rain Gauge Monthly Precipitation）。植被类型数据来源于澳大利亚国家植被信息系统中（Australian National Vegetation Information System, NVIS）的主要植被组类型数据（Major Vegetation Groups, MVGs）。

Figure 2.4 Latitudinal gradients of mean annual precipitation, CV of annual precipitation, and seasonal rainfall distributions along the 1100km NATT ecological rainfall transect (Howard Springs to Ti Tree). (A) Mean annual precipitation (mm $yr^{-1}$); (B) CV of annual precipitation (%); (C) the contrasting of the mean precipitation during the wet season (January to March) and dry season (July to September).

图2.4C同时显示了旱季和雨季月平均降水量沿纬度在NATT样带上的空间分布。从图上可以清楚的看到整个 NATT 样带降水量在雨季和旱季之间的显著差异（图 2.4C）。在雨季的时候月降水量的纬度变化趋势大致和年降水量的变化一致，都呈现出沿纬度递减的趋势（图 2.4C）。雨季的月平均降水量从最北端 Howard Springs 的 378.83 毫米向南逐渐以每纬度 28.83 毫米的速度递减，直至减少到 NATT 最南端 Ti Tree 的 61.91 毫米（图 2.4C）。而在旱季（7-9 月），整个 NATT 样带的月平均降水量均在 10 毫米以下（图 2.4C）。而降水量的干-湿季差异尤以北部湿润地区更为强烈。南部干旱地区由于降水量本身就比较小，因此干-湿季的差异相对没有北部湿润地区显著（2.4C）。

为了更好的比较研究区内主要植被类型之间的降水差异，图 2.4 显示了各个植被类型的年平均降水量和降水量年际变率之间的关系。从图 2.4A 可以看到年平均降水量和降水年际变率之间存在非常强的负相关（$R = -0.95$, $p < 0.0001$）。整个研究区内年平均降水量呈现出一种在桉树疏林地和林地较高，在草地，合金欢林地和灌木林较低的植被类型差异（图 2.4A，表 2.1）。桉树疏林的年平均降水量最高，达到了 1392±237 毫米，同时年降水的变异系数也最低，只有 27±5%（图 2.4A，表 2.1）。而年平均降水量最低的植被类型是合金欢开阔林地，年平均降水量只有 379±59 毫米，而年降水的变异系数却达到了 60±10%（图 2.4A，表 2.1）。

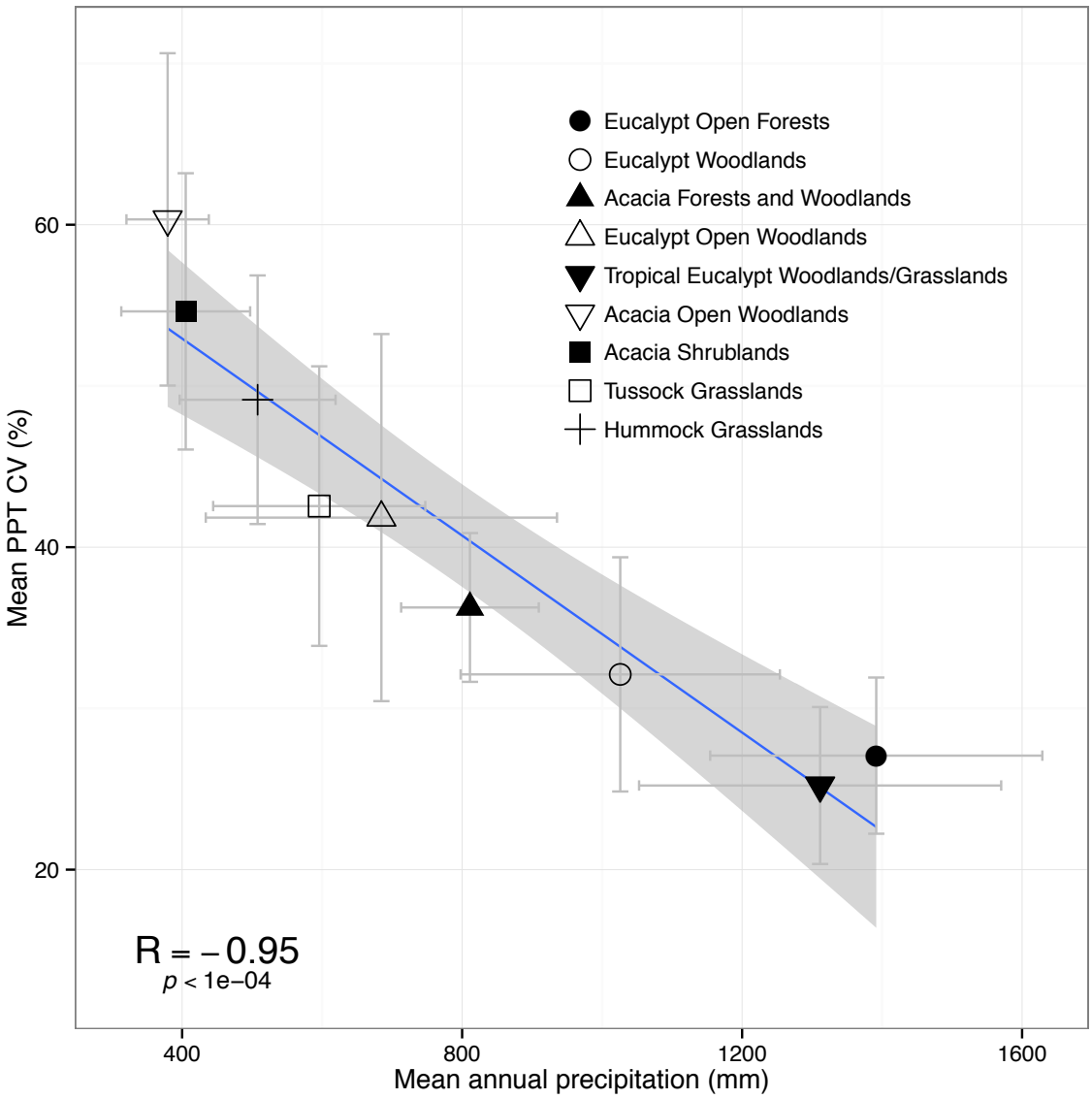


图 2.5 不同植被类型年平均降水量（Mean annual precipitation）（mm $yr^{-1}$）和年降水变异系数（PPT CV, %）之间的关系。数据的计算方法为对整个研究区不同植被类型所属像元的数值进行平均以得到各个植被类型的平均降水量和平均降水变率。垂直和水平的灰色线条为数据的±标准差（±1 standard deviation）。蓝色线为数据的最小二乘线性拟合，灰色阴影标示了回归线的 95%置信区间（confidence interval）。

Figure 2.5 Mean annual precipitation and CV (coefficient of variance) of annual precipitation averaged across major vegetation groups in the NATT study area, 2000-2012.The mean annual precipitation and mean PPT CV were computed using all pixels within each vegetation type. The vertical and horizontal bars are the ±1 standard deviation. The blue solid line is the least-square fitted linear regression line, and the gray shaded areas are the 95% confidence intervals of the regression line.

由以上对 NATT 研究区降水量和降水年内分布特征的分析可以发现，作为一个典型生态-降水样带，NATT 具备了非常好的降水和植被类型的梯度差异。同时结合植被类型的分析可以看到降水（包括降水量和年际变率）和热带萨瓦纳植被类型之间

的紧密关系，说明环境要素在形成热带萨瓦纳独特的树-灌木-草多层结构中所起到的重要作用。

## 2.4 主要地面通量站点的气候特征

图 2.6 显示了六个通量站点气象要素的年内分布特征。可以看到月降水量在各个站点上都表现出了非常明显的季节性（图 2.6A）。北部湿润地区的几个站点，譬如 Howard Springs，Adelaide River 和 Daly River，表现出了更为强烈的季节性，亦即更强的雨季-旱季对比（图 2.6A）。雨季开始的时间从北到南不同，大约集中在从 11 月份到第二年 4 月份这一段时间，而在旱季这几个站点几乎没有降水（图 2.6A）。北部 Howard Springs 在最高降水量出现在 2 月（419.10 毫米），相比之下，南部 Ti Tree 站点在最高降水量月份（1 月）的降水量只有 94.85 毫米（图 2.6A）。

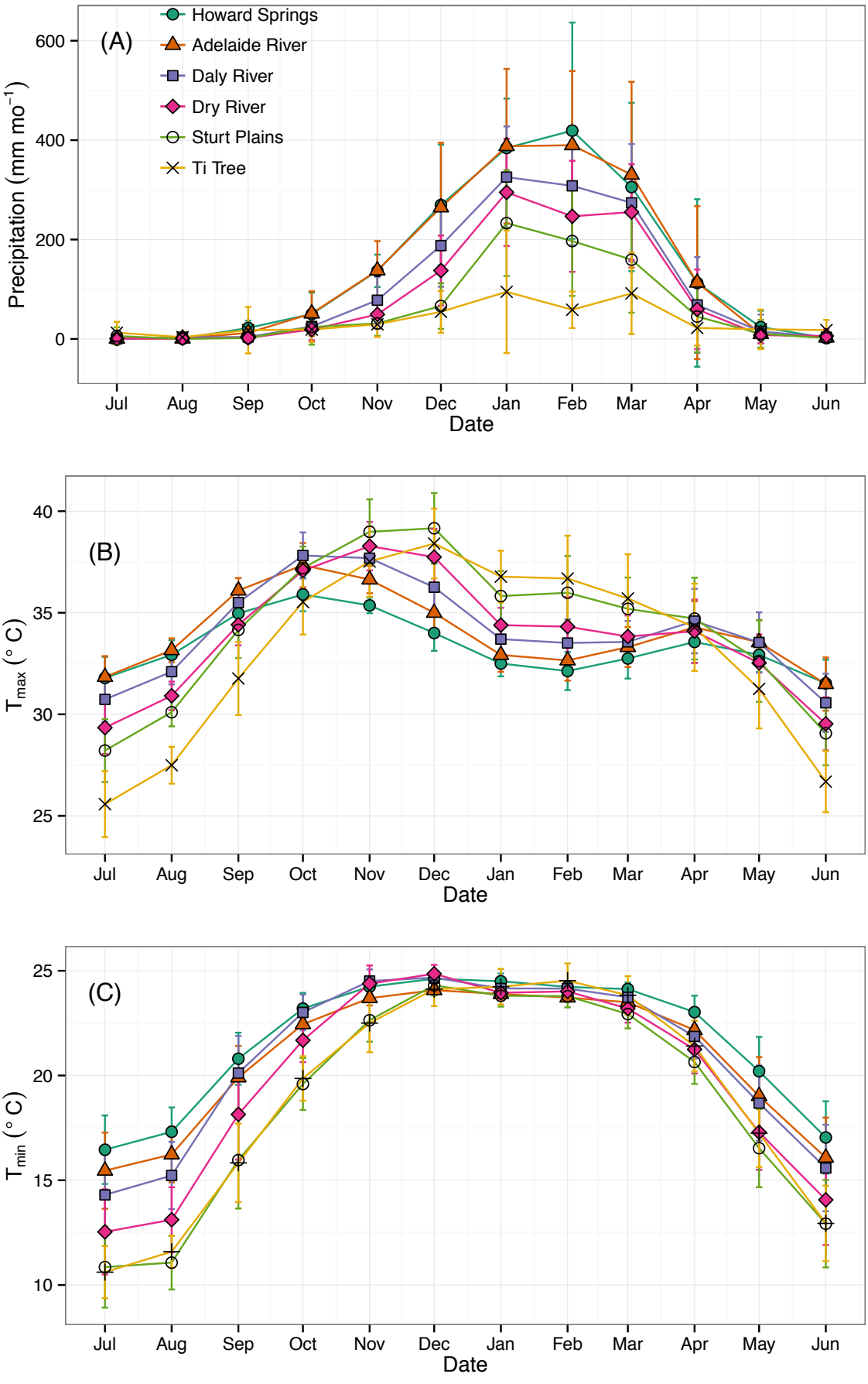
(A)
Howard Springs
Adelaide River
Daly River
Dry River
Sturt Plains
Ti Tree
Precipitation (mm mo$^{-1}$)
600
400
200
0
Jul
Aug
Sep
Oct
Nov
Dec
Jan
Feb
Mar
Apr
May
Jun
Date
(B)
$T_{max}$ (° C)
40
35
30
25
Date
(C)
$T_{min}$ (° C)
25
20
15
10
Date

图 2.6 NATT 研究区主要地面通量观测站降水和气温的年内分布特征。（A）多年月平均降水量的月变化；（B）多年月平均最高温的月变化；（C）多年月平均最低温的月变化。竖直的条显示了±1 标准差的范围。气象数据平均自 2000 年 7 月至 2012 年 6 月。每年从 7 月份开始是为了适应研究区（南半球）的气象要素年内分布，从 7 月份至来年的 6 月份称为一个水文年（hydrological year）。

Figure 2.6 Seasonality of major meteorological variables for six NATT EC flux sites. (A) mean monthly precipitation (mm mo-1); (B) mean monthly maximum temperature (Tmax, °C); (C) mean monthly minimum temperature (Tmin, °C). The vertical bar indicates the range of ±standard deviation. The hydrological year was defined as from July 1 to following June 30 to match the intra-annual rainfall distribution, which is the major environmental driver of vegetation growth in the tropical savannas area.

由于研究区地处热带，因此这几个站点的月最高气温都比较高（图 2.6B）。所有站点在 10 月-12 月期间都达到了年内月最高气温的峰值且均超过了 35°C（图 2.6B）。月最高温度的年内变化幅度在 Howard Springs 只有 4.37°C，而在 Ti Tree 则达到了 12.83°C（图 2.6B），说明南部地区的年内温度变化幅度较北部地区更大。月最低温的年内变化幅度在 Howard Springs 为 8.16°C，而在 Ti Tree 为 13.91°C（图 2.6C）。

总的来说，NATT 地区的降水和温度都呈现出非常强的季节性，而且雨热同期。但是在夏季（11 月-1 月）由于气温较高，植被的生长会受到温度的胁迫。而由于每年都有长达数月的旱季，因此植被在漫长的旱季受水分胁迫较为严重，呈现出多样化的适应策略。譬如 NATT 地区的主要树种都为常绿树种（*Eucalyptus, Corymbia* 和 *Acacia*），这些树种在旱季由于具有较长的根系，能够汲取到深层土壤水分（Borchert et al., 1994），在旱季仍然能够进行光合且维持几乎完整的叶面积指数（Prior et al., 1997; Williams et al., 1997; Eamus et al., 2013）。而草本植物的生长则主要随降水的季节变化而变化，在旱季完全枯萎（Hutley et al., 2000; Eamus et al., 2013）。

# 第三章 基于奇异波谱分析的萨瓦纳植被物候遥感反演方法


## 摘 要

植被物候信息作为动态植被模型中的关键参数，其在模型中正确的表达对于准确模拟陆面和大气之间的碳、水、能量的交换有着非常重要的作用。虽然目前北半球温带地区的植被物候研究已经得到了非常多的关注，但是对于热带萨瓦纳的物候模式及其与环境要素之间的关系尚未有很好的认识。本次研究的主要目标是发展一套从遥感观测时间序列中反演多种热带萨瓦纳植被物候指数的方法。这套方法基于数学上的奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis）。首先对原始 MODIS 增强型植被指数（EVI）时间序列使用奇异波谱分析进行噪音过滤和时间序列重构，然后采用一次逼近得到植被的生长速率，最终从生长速率中判定植被在生长季内的关键物候节点。该方法对热带萨瓦纳植被生长曲线和物候特点具有很好的适应性，能够以客观且相对准确的方式提取出整个研究区逐像元逐年的多个物候参数，包括生长季开始时间、峰值时间、结束时间、生长季长度等。基于奇异波谱分析的方法避免了传统的基于参数模型很难对不规则生长曲线进行拟合的缺陷，同时基于变化速率来判定生长季开始或结束时间的方法相比较阈值法来说更客观。



## 关键字

植被物候、遥感、奇异波谱分析、热带萨瓦纳、MODIS、EVI


## 3.1 引 言

物候学是一门对于植物或动物生命周期及其与气候和其它环境要素之间关系进行研究的学科（White et al., 1997）。对于植被物候在单个植株尺度、群落尺度、生态系统尺度甚至生物群系尺度上的研究是全球变化研究中的核心组成部分。植被物候信息可以作为全球动态植被模型（Dynamic Global Vegetation Models, DVGMs）和全球循环模型（Global Circulation Models, GCMs）重要的输入参数（Running et al., 1993）。作为气候系统中重要的调控因子，对植被物候的准确描述，对于提高全球陆地生态系统碳、水、能量循环模型的模拟精度有着重要作用（White & Nemani, 2006; Zhang et al., 2003）。同时，植被物候信息也可以反映气候变化对植被生长季的影响，因此可以作为气候变化的一个指示器（Menzel et al., 2006）。

传统的地面物候观测关注单个植株尺度上的物候现象（Menzel et al., 2006; Williams et al., 1997）。而对整个区域甚至全球尺度上植被遥感的观测，则需要依靠搭载于卫星上的传感器对于陆面植被所进行的连续观测（Zhang et al., 2003; Huete et al.,

2002）。从这些基于遥感的观测中，可以提取出许多地表植被物候信息，譬如生长季的开始时间、结束时间和生长季长度等（Zhang et al., 2003）。不同于传统地面观测主要关注单个植株尺度上的物候事件，遥感物候研究更侧重于对整个景观或区域尺度上物候的反演和分析。

目前利用遥感对于植被物候研究所采取的方法可以从对原始数据的降噪和重构，以及物候指数的提取方法两个方面来分类。由于大气中气溶胶、水汽和云层等的干扰，以及卫星传感器自身的问题等，遥感观测数据中不可避免的存在着一定程度的数据噪音，而要从遥感观测中提取出准确的植被生长信息，这些数据噪音必须被首先滤除掉。早期采用的降噪（亦即平滑）方法主要有简单的滑动平均法（moving average）（Reed et al., 1994; Schwartz et al., 2002）和多项式回归拟合法（polynomial regression）（Piao et al., 2006），以及更为复杂的萨维茨基-高莱滤波（Savitzky-Golay filter）（Jonsson & Eklundh, 2004），双逻辑斯蒂模型拟合（double logistic model）（Zhang et al., 2003; Beck et al., 2006）和非对称高斯模型拟合（asymmetric Gaussian model）（Jonsson & Edlundh, 2004）等。

在对原始遥感观测数据中的噪音进行过滤之后，接下来提取物候指数的方法也非常多样。譬如最简单的全局阈值法（global threshold method）（Fischer, 1994），通过设定一个主管阈值（譬如 NDVI = 0.2），当植被指数在生长季内超过这一阈值之后即判定为生长季开始。由于植被覆盖度在不同植被类型和气候条件下的巨大差异，一个固定的全局阈值很难被应用到整个区域上。在全局阈值法的基础上后来又提出了局部阈值方法（local threshold method）（White et al., 1997; White et al., 2005），这种方法对于不同的植被类型设定不同的阈值，但是仍然存在主观性过强，严重依赖研究者的经验以及植被类型的划分等问题。

目前比较流行的、且相对来说比较客观的遥感物候指数提取方法是基于曲率变化速率（curvature change rate method）的方法（Zhang et al., 2003）。曲率变化速率方法首先需要对原始的植被指数时间序列拟合一个数学模型（譬如逻辑斯蒂模型或高斯模型），然后通过数学方法来计算拟合曲线的曲率变化速率，将曲率在生长季开始阶段突然增加的时刻判定为生长季开始的时间（Zhang et al., 2003）。这种方法避免了阈值法过于主观的问题，且提取出的物候指数具有一定的生物学意义，因此得到了广泛的应用（Butt et al., 2011; Hird et al., 2009; Zhang et al., 2005）。目前由 NASA 提供的 MODIS 全球物候产品（MCD12 系列）正是基于双逻辑斯蒂模型拟合（double logistic model）和曲率变化速率方法（Zhang et al., 2003）。

但是目前主要遥感物候反演方法，包括双逻辑斯蒂模型和曲率变化速率等，并不能很好的适应热带萨瓦纳植被的生长特点。热带萨瓦纳植被结构非常复杂，包括了冠层树木、中层灌木，和林下层草地，每一层都有其独特的生长模式及对环境和气象要

素的响应特征（Williams et al., 1997）。譬如 Hmimina 等（2013）在非洲萨瓦纳地区的研究发现，MODIS 植被指数时间序列很难被 S 型函数（sigmoidal functions）拟合，因此需要采用更为稳健（robust）的三次样条函数（cubic spline）这种无参方法（non-parametric method）来对原始植被指数时间序列进行平滑进而提取物候参数。这主要是因为在热带萨瓦纳地区，降水的年内分布存在很大的不规则型，尤其是在较为干旱的萨瓦纳地区，降水的年际变率非常大，因此植被的生长模式，或者说季节物候曲线（phenological profile）很不规则，并不像温带植被那样呈现出标准的钟形曲线（bell curve），因此很难被 S 型函数来拟合进而通过计算曲率变化速率来提取物候参数（Hmimina et al., 2013）。

而 Jin 等的研究也发现，现有的基于阈值法来判定生长季开始或结束时间的方法在萨瓦纳同样存在很大的问题（Jin et al., 2013）。因为降水量在萨瓦纳地区存在非常大的年际变率，因此即便是对于同一个站点来说，因为植被每年由于降水量不同而在长势上具有很大差异，造成一个固定的阈值无法被连续的应用到该站点的所有年份。因此采用这种方法得到的物候参数在热带萨瓦纳地区存在很大的不确定性。

在本次研究中，对采用了双逻辑斯蒂模型和曲线变化速率方法的 MODIS 全球物候产品（MCD12Q2）（Zhang et al., 2003）数据进行初步分析发现，在北部和中部澳大利亚热带萨瓦纳地区，从 2001 到 2012 年间每年均有 24% - 56%像元的物候指数无法被基于逻辑斯蒂模型和曲率变化速率的方法提取出来，亦即 MCD12Q2 产品在这些像元-年份（pixel-year）上是空值（no data）。这些说明目前的遥感物候反演方法在热带萨瓦纳地区仍然存在较大的局限性，因此有必要探索和发展新的适应热带萨瓦纳植被生长特点的遥感物候反演方法，以更为准确和有效地提取区域上萨瓦纳植被的物候指数。

本章研究的主要目的是发展一套新的萨瓦纳植被物候遥感反演方法，并在不同萨瓦纳植被类型上检验了该方法的可行性。同时本章对遥感反演物候在植被指数较小的干旱地区的不确定性进行了探讨，并在站点尺度上研究了不同萨瓦纳植被类型物候的年际变化及对极端干旱和极端湿润年份的响应等。

## 3.2 数据和方法

### 3.2.1 遥感数据

本论文主要用到了 MODIS 增强型植被指数 EVI（Enhanced Vegetation Index）。从美国地质调查局（USGS）网站（http://e4ftl01.cr.usgs.gov）上下载了十三年（2000.02.18 - 2013.7.22）的 MOD09A1 地表反射率产品（Collection 5, h30v10 和 h30v11）（Vermote et al., 2002）。MOD09A1 产品的时间分辨率为 8 天，空间分辨率为 500 米，提供了大气和气溶胶校正之后 7 个波段的地表反射率数据。EVI 作为对 NDVI 的优化能够有效

减少土壤背景和大气噪音的影响（Huete, 1988; Huete et al., 2002, 2008）。EVI 可以通过下式计算：

$$\mathrm{EVI} = 2.5\frac{\rho_{\mathrm{nir}} - \rho_{\mathrm{red}}}{\rho_{\mathrm{nir}} + 6\rho_{\mathrm{red}} - 7.5\rho_{\mathrm{blue}} + 1} \tag{3.1}$$

其中 $\rho_{\mathrm{nir}}$, $\rho_{\mathrm{red}}$ 和 $\rho_{\mathrm{blue}}$ 为 MODIS 在近红外波段（波长区间 841-876 nm）、红光波段（波长区间 620-670 nm）、和蓝光波段（波长区间 459-479 nm）的反射率（Huete et al., 2002）。

对于每个站点，采用一个 3 × 3 像元的窗口（2.25 平方公里）来提取各个波段的时间序列。为了进一步减少残余数据噪音所带来的影响，基于 MOD09A1 数据提供的数据质量控制（Quality Assurance）信息，在提取到的反射率数据中只选择满足以下条件的数据：（1）经过校正且在所有波段均具有理想质量（corrected product produced at ideal quality all bands）；（2）在第一至第七波段有最高质量（highest quality for band 1-7）；（3）经过大气校正处理（atmospheric correction performed）；（4）经过毗邻像元校正处理（adjacency correction performed）；（5）MOD35 云层标志显示晴天无云层覆盖（MOD35 cloud flag indicate “clear”）；（6）检测无云影（no cloud-shadow was detected）；（7）大气中气溶胶含量低或者处于平均水平（low or average aerosol quantities）。

### 3.2.2 基于奇异波谱分析的物候指数反演方法

鉴于热带萨瓦纳植被生长曲线不规则，且 MODIS 植被指数数据本身由于雨季云层覆盖的影响噪音比较大的特点，本论文提出一种基于奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis）的遥感物候反演方法。以下将对该方法进行详细的介绍。

为了减少 MODIS 原始观测中的数据噪音以降低数据的不确定性，首先采用奇异波谱分析方法对植被指数进行降噪和时间序列重构。以往的研究显示奇异波谱分析方法非常适合于对非线性动态数据的处理（Buermann, 2002; Elsner & Tsonis, 1996; Ghil et al., 2002; Kondrashov & Ghil, 2006; Wang & Liang, 2008）。

奇异波谱分析方法的基础在于将一个时间序列 $F=(f_0, \ldots f_{N-1}, f_n \in \mathbb{R})$ 嵌入进一个高维度的欧几里得空间中，并选择包含数据信息的几个子空间来重构时间序列，同时摒弃掉其它被认为是包含数据噪音的子空间（Alexandrov, 2009）。奇异波谱分析方法首先将时间序列 F 分解为一个大小为 L × K 的矩阵，这里的 L 为奇异波谱分析的一个参数，由研究者确定。借由此步骤原始时间序列被构建为一个 Hankel 矩阵 $X \in \mathbb{R}, K = N - L + 1$（Alexandrov，2009）。然后对矩阵 X 应用奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）（Alexandrov, 2009）：

$$X = \sum_{j=1}^{d} \sqrt{\lambda_j} U_j V_j^{\mathrm{T}}, \qquad V_j = X^{\mathrm{T}} / \sqrt{\lambda_j}, \qquad d = \max j : \lambda_j > 0 \tag{3.2}$$

奇异波谱分析方法将选择好的 SVD 成分重构为一个新的长度和原始时间序列相

同的时间序列。奇异波谱分析方法的优势在于其在进行数据平滑的时候对数据中对提取物候指数非常重要的信息，譬如趋势和周期性等得到了非常好的保留，同时在最大程度上移除了随机噪音的干扰（Ghil et al., 2002）。相比较其它数据降噪方法，譬如线性滤波（linear filtering）或者小波方法（wavelet），奇异波谱分析在重构时间序列的时候考虑了整个时间序列的周期性，因此是一种全局方法而非局部方法（Alexandrov, 2009）。奇异波谱分析对原始数据中的异常值（outlier）并不敏感，非常适合于对数据噪音较大的时间序列进行平滑处理（Alexandrov, 2009）。

在进行奇异波谱分析的时候有两个参数需要确定：窗口长度 $L$ 和要选择用来进行时间序列重构的 SVD 成分的数量。初步分析发现，当窗口长度 $L$ 设定为 74（74 个 8 天分辨率的 MODIS EVI 观测）的时候能够较好的保留原始数据的周期性，同时过滤掉大部分随机噪音。本论文选择四个 SVD 成分来进行 EVI 时间序列重构：其中第一个 SVD 成分中主要包括了 EVI 时间序列的长期趋势，而第二到第四个 SVD 成分中包含着对提取物候参数非常重要的数据周期性（亦即季节性）。

由于原始的 MODIS 数据时间分辨率为 8 天，在提取物候指数之前，首先使用一个局部多项式回归（local polynomial regression）来将 8 天分辨率的数据插值到日分辨率。图 3.1 以 NATT 研究区北部站点 Howard Springs 为例，显示了局部多项式插值之后的逐日分辨率 EVI 时间序列和奇异波谱分析重构之后 8 天分辨率 EVI 时间序列之间的对比。可以看到局部多项式插值几乎完全保留了奇异波谱分析重构之后的 EVI 曲线形态，因此在对原始数据进行最小程度干扰的基础上提高了数据的时间分辨率（图 3.1）。

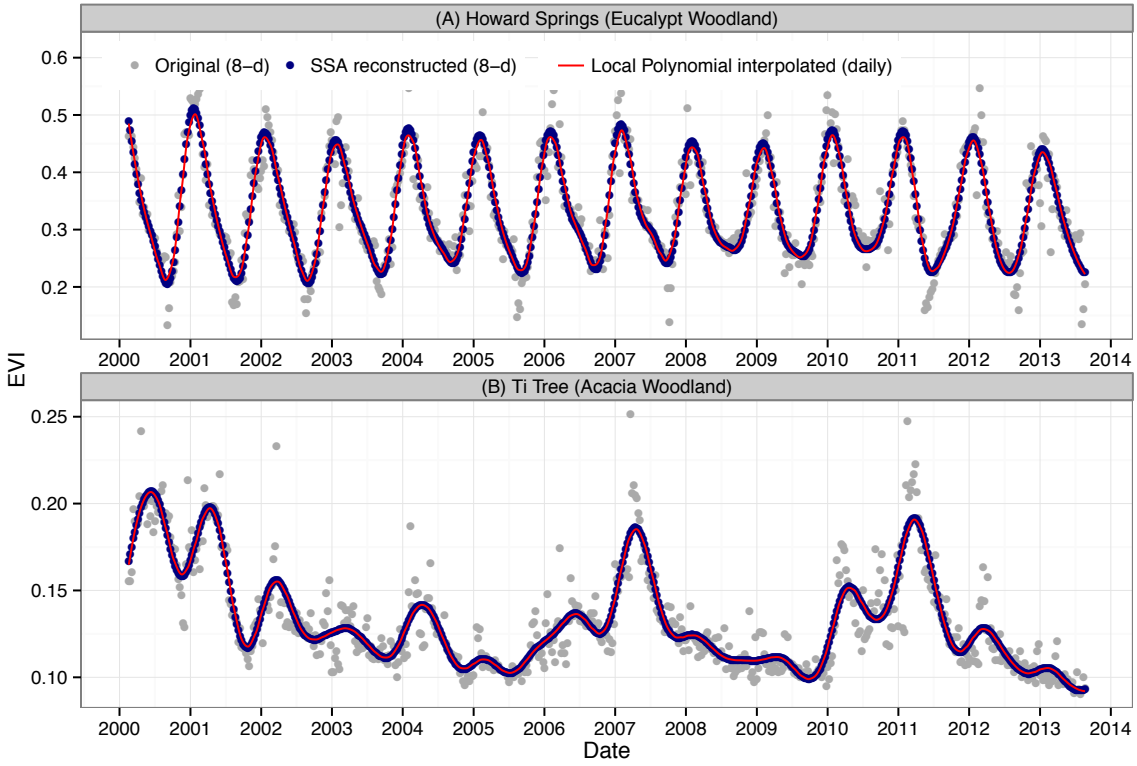


图 3.1 NATT 研究区北部 Howard Springs 站点和南部 Ti Tree 站点原始 8 天分辨率 MODIS EVI 时间序列（original, 8-d），经过奇异波谱分析重构之后的 8 天分辨率时间序列（SSA reconstructed, 8-d）和局部多项式插值之后的日分辨率时间序列（Local polynomial interpolated, daily）对比。灰色点为原始数据（8 天分辨率），深蓝色点为 SSA 重构之后的数据（8 天分辨率），红色线条为局部多项式插值到日分辨率的数据。可以看到 SSA 方法平滑之后的数据过滤掉了原始数据中的噪音，而局部多项式插值在提高数据分辨率的基础之上保留了数据的形态特征。上图的数据来自 NATT 北部站点 Howard Springs，下图的数据来自 NATT 南部站点 Ti Tree。

Figure 3.1 Examples of the singular spectrum analysis plus local polynomial regression for reconstruction and downscaling the 8-d MODIS EVI observations. (A) Howard Springs (Eucalypt woodlands, 131.150°E, 12.495°S); (B) Ti Tree (Acacia woodlands, 133.249°E, 22.283°S). Time span of MODIS EVI is from 2000-02-18 to 2013-03-05 (301 MODIS tiles).

在对原始 EVI 时间序列数据应用奇异波谱分析进行降噪和重构之后，需要对 EVI 时间序列计算一阶导数（first derivative）以获得 EVI 的变化速率（亦即植被的生长速度）。然后基于 EVI 变化速率时间序列来判定生长季的开始和结束时间等关键物候节点。图 3.2 显示了基于奇异波谱分析方法提取物候指数的示意图。首先使用奇异波谱分析对原始 EVI 时间序列进行重构，并计算出 EVI 时间序列的一阶导数判定出几个植被生长过程中的关键时间节点（图 3.2）：

1. 生长季开始之前 EVI 最小的时刻：此时刻对应雨季开始之前旱季植被绿度达到最小值的时刻，此时生长季尚未开始；

2. 生长季开始阶段 EVI 变化速度最快的时刻：对应雨季开始之后植被绿度增加

最快的时刻，此时生长季已经开始；

3. 生长季内 EVI 达到峰值时刻：对应雨季之中植被绿度达到最大值的时刻，从此时开始之后植被绿度将随着雨季结束而逐渐减少；

4. 生长季结束阶段 EVI 减少速度最快的时刻：对应雨季结束至旱季开始阶段植被绿度减少最快的时刻，此时生长季尚未结束；

5. 生长季结束后 EVI 最小的时刻：对应雨季结束之后植被绿度在旱季时的最小时刻，此时生长季已经结束。

通过从 EVI 时间序列的变化速率中确定以上一些关键的时间节点，可以对生长季内的物候期信息，譬如生长季开始时间和结束时间等进行进一步的逼近。首先假设像元内植被生长季开始的时间应该晚于生长季开始之前 EVI 最小的时刻，但是要早于生长季开始阶段 EVI 增加速度最快的时刻，因此可以将生长季开始的时间（Start of Greening Season, SGS）设定为在这两个时刻之间的中间点（图 3.2）。同样的，生长季结束的时间（End of Greening Season, EGS）可以设定为生长季结束阶段 EVI 下降速度最快的时刻和生长季结束之后 EVI 最小时刻之间的中间点（图 3.2）。而生长季的长度（Length of Greening Season, LGS）即为 SGS 到 EGS 之间的天数（图 3.2）。

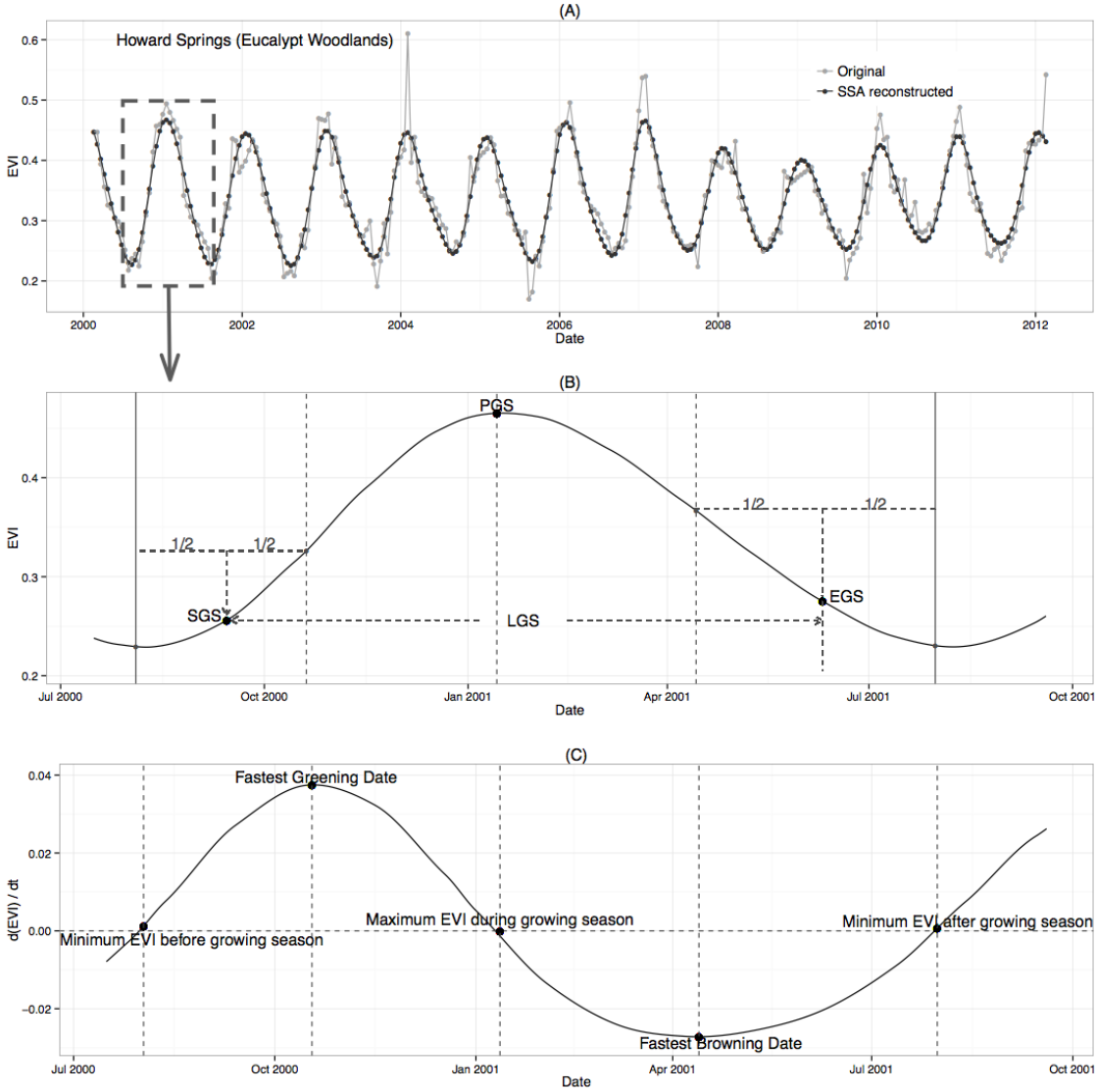


图 3.2 基于奇异波谱分析的遥感物候反演方法示意图，以 NATT 北部站点 Howard Springs 为例，2000-2013 年。（A）原始 MODIS EVI 时间序列（灰色点和线条）以及经过奇异波谱分析降噪和重构之后的 EVI 时间序列（黑色点和线条）；（B）2000 年 7 月-2001 年 6 月的奇异波谱分析重构之后的 EVI 时间序列；（C）2000 年 7 月到 2001 年 8 月的 EVI 时间序列的一天时滞差分 *d*(EVI)/*d*t（one-day lagged difference，作为对时间序列一阶导数的线性逼近）。（C）中标注了一阶导数的拐点（turning points），代表着植被生长季内的关键时间节点，包括：生长季开始之前 EVI 最小的时刻（minimum EVI before growing season），生长季开始阶段 EVI 变化速率最大的时刻（fastest greening date），生长季内 EVI 达到峰值的时刻（maximum EVI during growing season），生长季结束阶段 EVI 下降速度最快的时刻（fastest browning date），以及生长季结束之后 EVI 最小的时刻（minimum EVI after growing season）。通过对（C）中的拐点进行逼近，可以得到（B）中的物候期信息，包括：生长季开始时间（Start of Greening Season, SGS），生长季峰值时间（Peak of Greening Season, PGS），生长季结束时间（End of Greening Season, EGS），以及生长季长度（Length of Greening Season, LGS）。

Figure 3.2 Phenological methodology schematic diagrams. (A) Original MODIS EVI time series (solid light gray line) with SSA reconstructed time series (solid black line) for Howard Springs from 2000.02.18 to 2012.02.18; (B) SSA reconstructed MODIS EVI time series of one growth cycle (2000–2001) from above time series; (C)

One day lag difference (approximation of first derivative) of 2000–2001 SSA reconstructed EVI time series. In panel (B), the phenological metrics have been labeled on the graph. In panel (C), the inflection points, which represent some critical points during a growing cycle, have also been labeled on the graph.

基于奇异波谱分析方法来从遥感观测中反演物候指数的优势在于：（1）该算法本身可以被应用到长时间的 EVI 时间序列上，不需要预先判定生长季的位置，也不需要设定阈值，因此在最大程度上减少了主观因素的影响，使得提取到的物候指数更加客观；（2）奇异波谱分析方法是一种无参数学方法，因此相比较拟合参数模型（譬如逻辑斯蒂模型）来说，对降水变率较高地区植被不规则的生长曲线形态（譬如南部干旱地区）具有更好的适应能力，因此能够增加成功提取物候指数像元所占的比例，以保证区域分析时的完整性。

## 3.3 结　果

### 3.3.1 研究区主要站点的植被物候特征

图 3.3 到图 3.8 展示了奇异波谱分析遥感物候提取方法在 NATT 研究区内六个站点上的效果。这六个站点沿 1100 公里的 NATT 降水样带从北到南依次分布，分别代表了不同的降水梯度和萨瓦纳植被类型（图 2.1；表 2.2）。首先可以看到奇异波谱分析对原始 EVI 时间序列的降噪效果非常理想，在数据噪音较大的情况下也能够重构出完整且平滑的时间序列。譬如，在雨季由于受到云层的覆盖，原始数据中出现了一些异常高的 EVI 数值（图 3.3A-B；图 3.5B），奇异波谱分析方法能够在将这些异常值成功的剔除的同时，保留了植被生长的长期趋势和季节性信息。

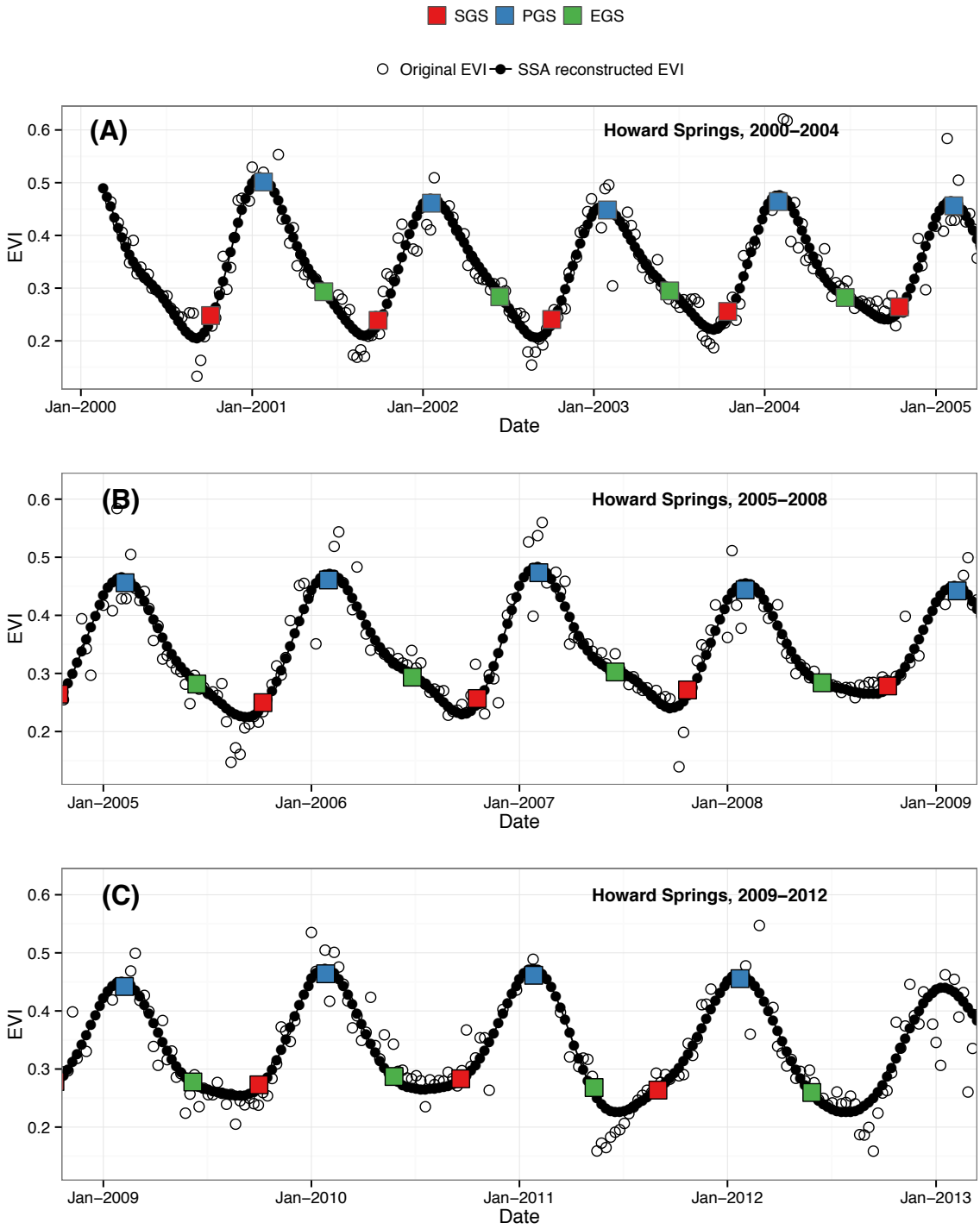


图 3.3 Howard Springs 站点的原始 MODIS EVI 时间序列（Original EVI）、奇异波谱分析重构后的 EVI 时间序列（SSA reconstructed EVI）以及提取出的主要物候时间节点。（A）2000 年到 2004 年；（B）2005 年到 2008 年；（C）2009 年到 2012 年。SGS 为生长季开始时间，PGS 为生长季峰值时间，EGS 为生长季结束时间。

Figure 3.3 Time series comparison of the original MODIS EVI and SSA reconstructed EVI with major phenological transitional dates labelled, Howard Springs, 2000-2013.

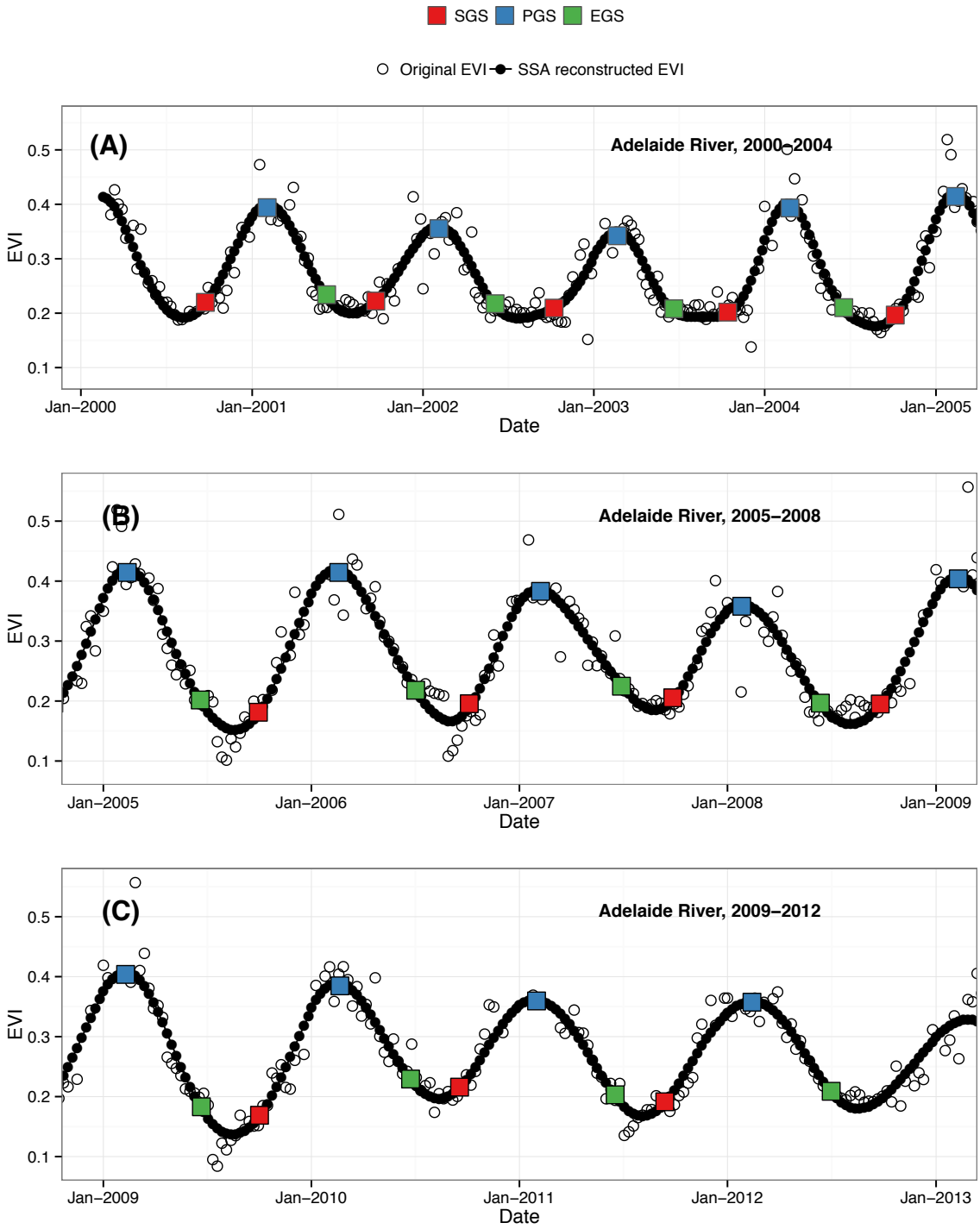


图 3.4 Adelaide River 站点的原始 MODIS EVI 时间序列（Original EVI）、奇异波谱分析方法重构后的 EVI 时间序列（SSA reconstructed EVI）、以及提取出的主要物候时间节点。（A）2000 年到 2004 年；（B）2005 年到 2008 年；（C）2009 年到 2012 年。SGS 为生长季开始时间，PGS 为生长季峰值时间，EGS 为生长季结束时间。

Figure 3.4 Time series comparison of the original MODIS EVI and SSA reconstructed EVI with major phenological transitional dates labelled, Adelaide River, 2000-2013.

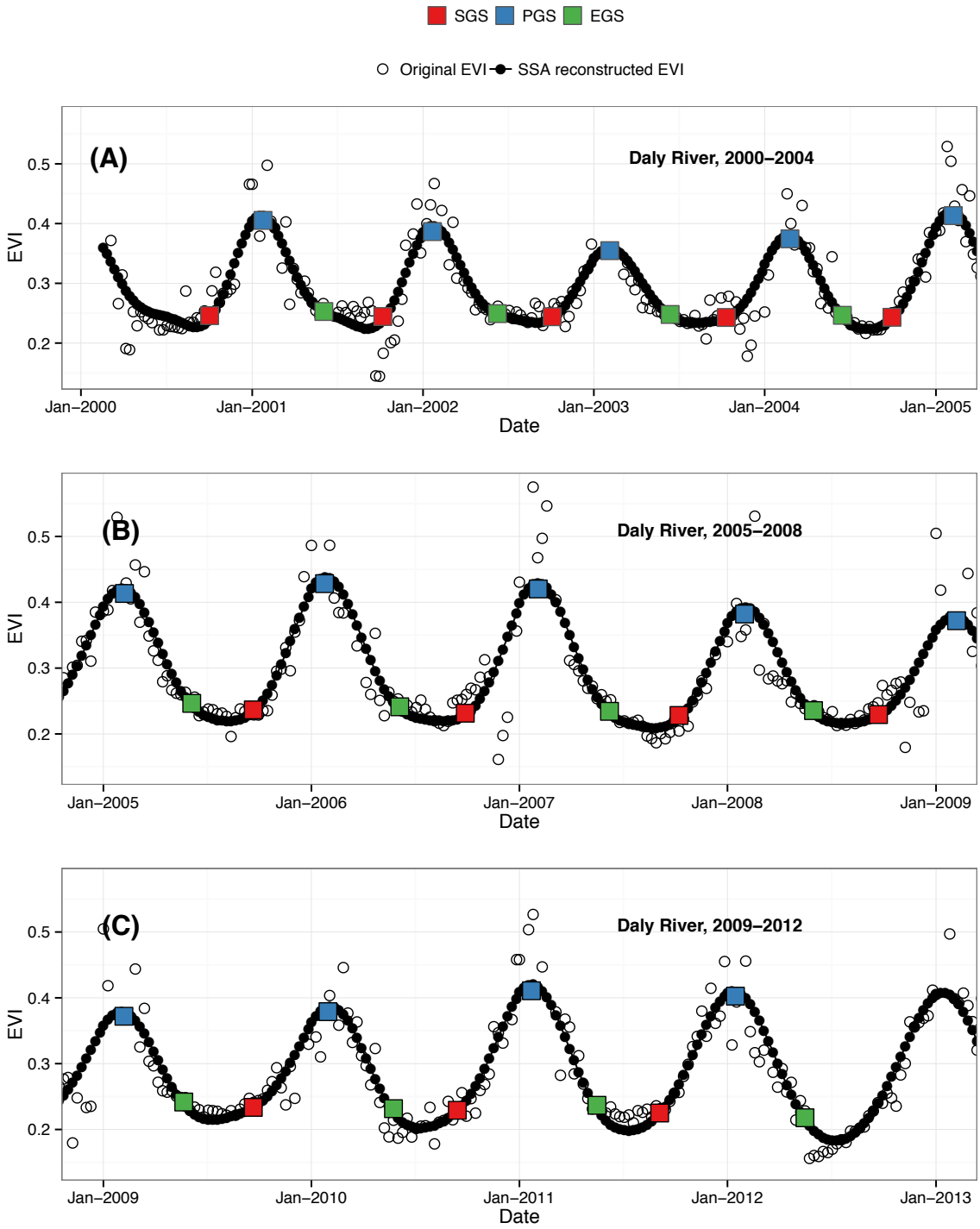


图 3.5 Daly River 站点的原始 MODIS EVI 时间序列（Original EVI）、奇异波谱分析方法重构后的 EVI 时间序列（SSA reconstructed EVI）、以及提取出的主要物候时间节点。（A）2000 年到 2004 年；（B）2005 年到 2008 年；（C）2009 年到 2012 年。SGS 为生长季开始时间，PGS 为生长季峰值时间，EGS 为生长季结束时间。

Figure 3.5 Time series comparison of the original MODIS EVI and SSA reconstructed EVI with major phenological transitional dates labelled, Daly River, 2000-2013.

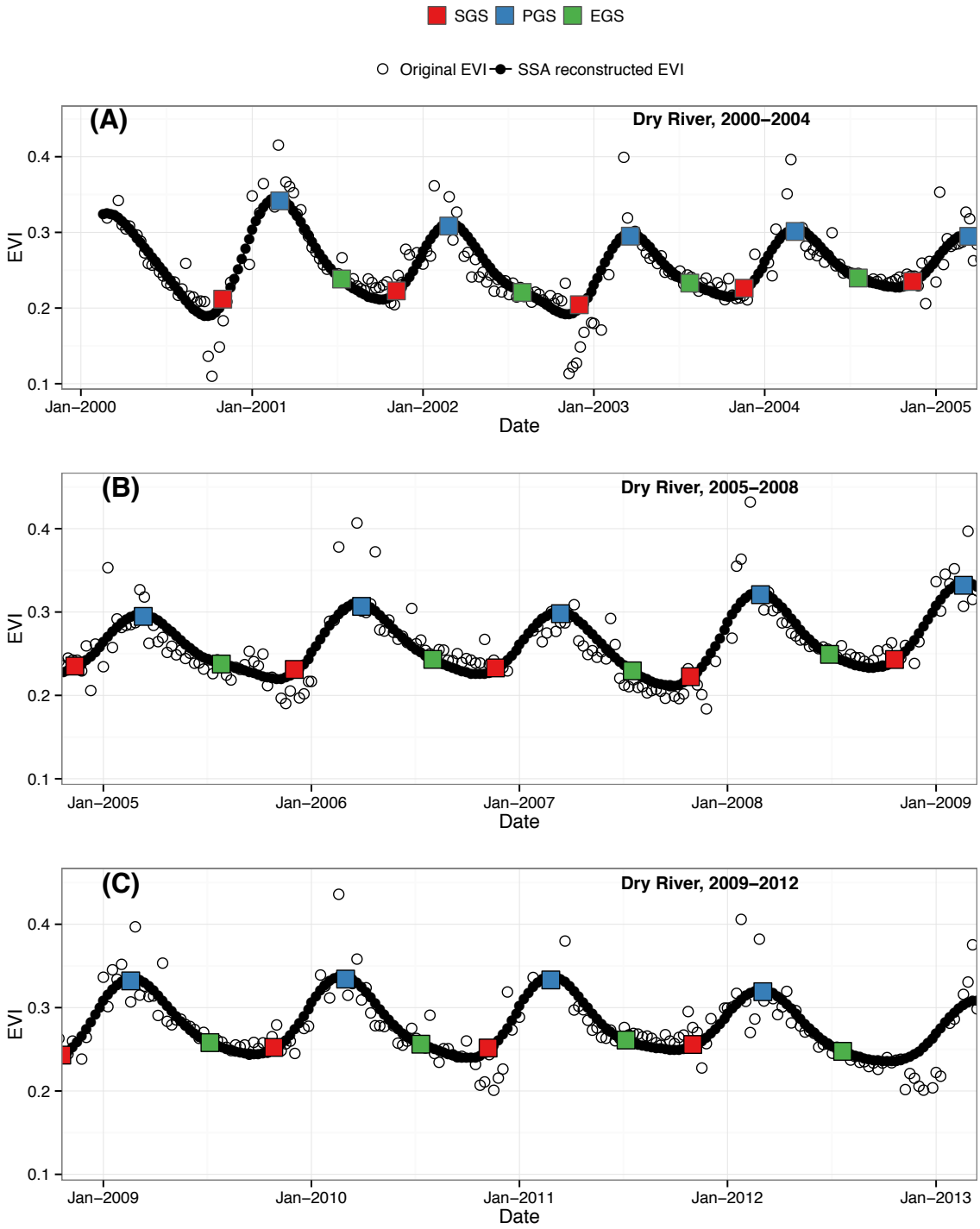


图 3.6 Dry River 站点的原始 MODIS EVI 时间序列（Original EVI）、奇异波谱分析方法重构后的 EVI 时间序列（SSA reconstructed EVI）、以及提取出的主要物候时间节点。（A）2000 年到 2004 年；（B）2005 年到 2008 年；（C）2009 年到 2012 年。SGS 为生长季开始时间，PGS 为生长季峰值时间，EGS 为生长季结束时间。

Figure 3.6 Time series comparison of the original MODIS EVI and SSA reconstructed EVI with major phenological transitional dates labelled, Dry River, 2000-2013.

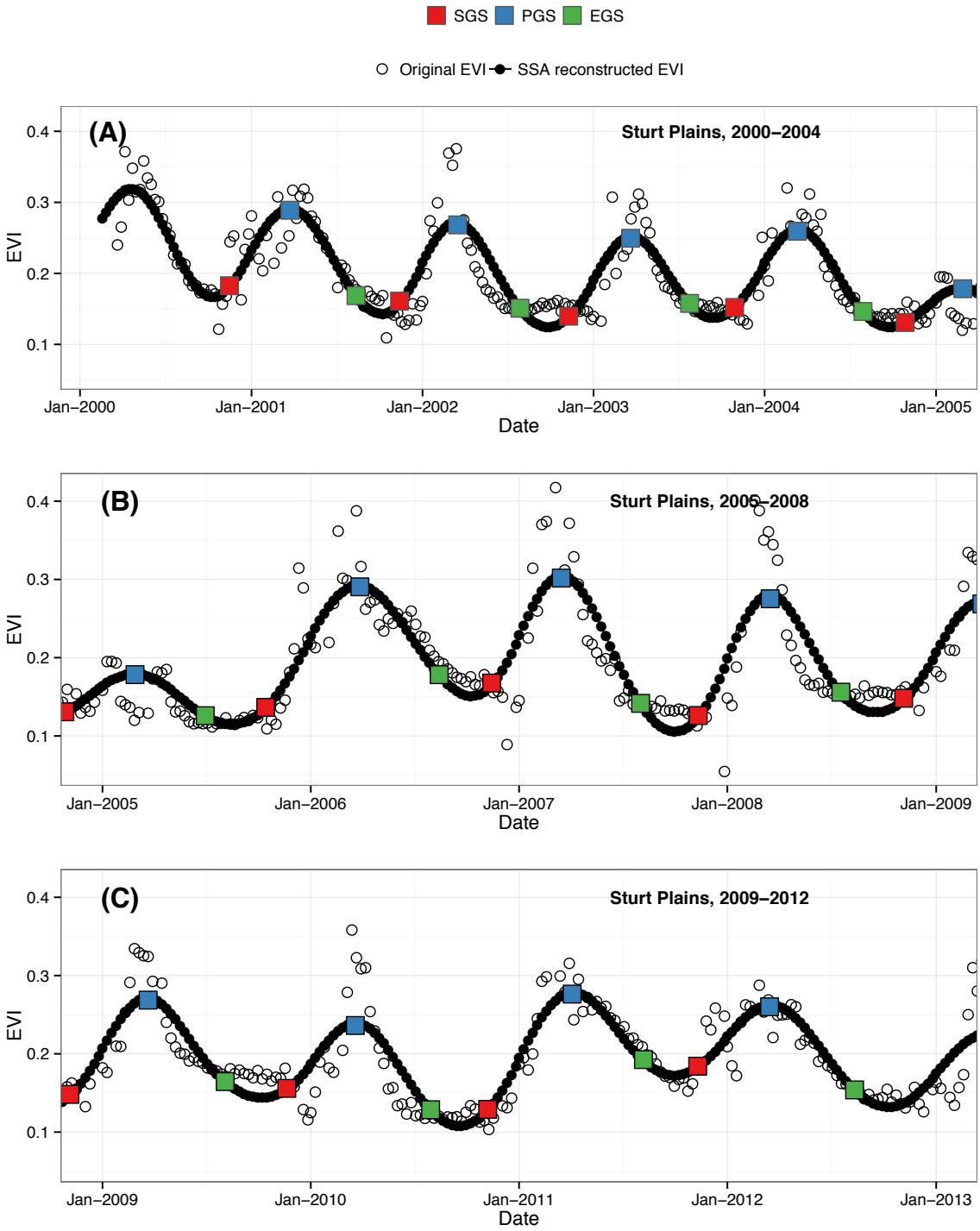


图 3.7 Sturt Plains 站点的原始 MODIS EVI 时间序列（Original EVI）、奇异波谱分析方法重构后的 EVI 时间序列（SSA reconstructed EVI）、以及提取出的主要物候时间节点。（A）2000 年到 2004 年；（B）2005 年到 2008 年；（C）2009 年到 2012 年。SGS 为生长季开始时间，PGS 为生长季峰值时间，EGS 为生长季结束时间。

Figure 3.7 Time series comparison of the original MODIS EVI and SSA reconstructed EVI with major phenological transitional dates labelled, Sturt Plains, 2000-2013.

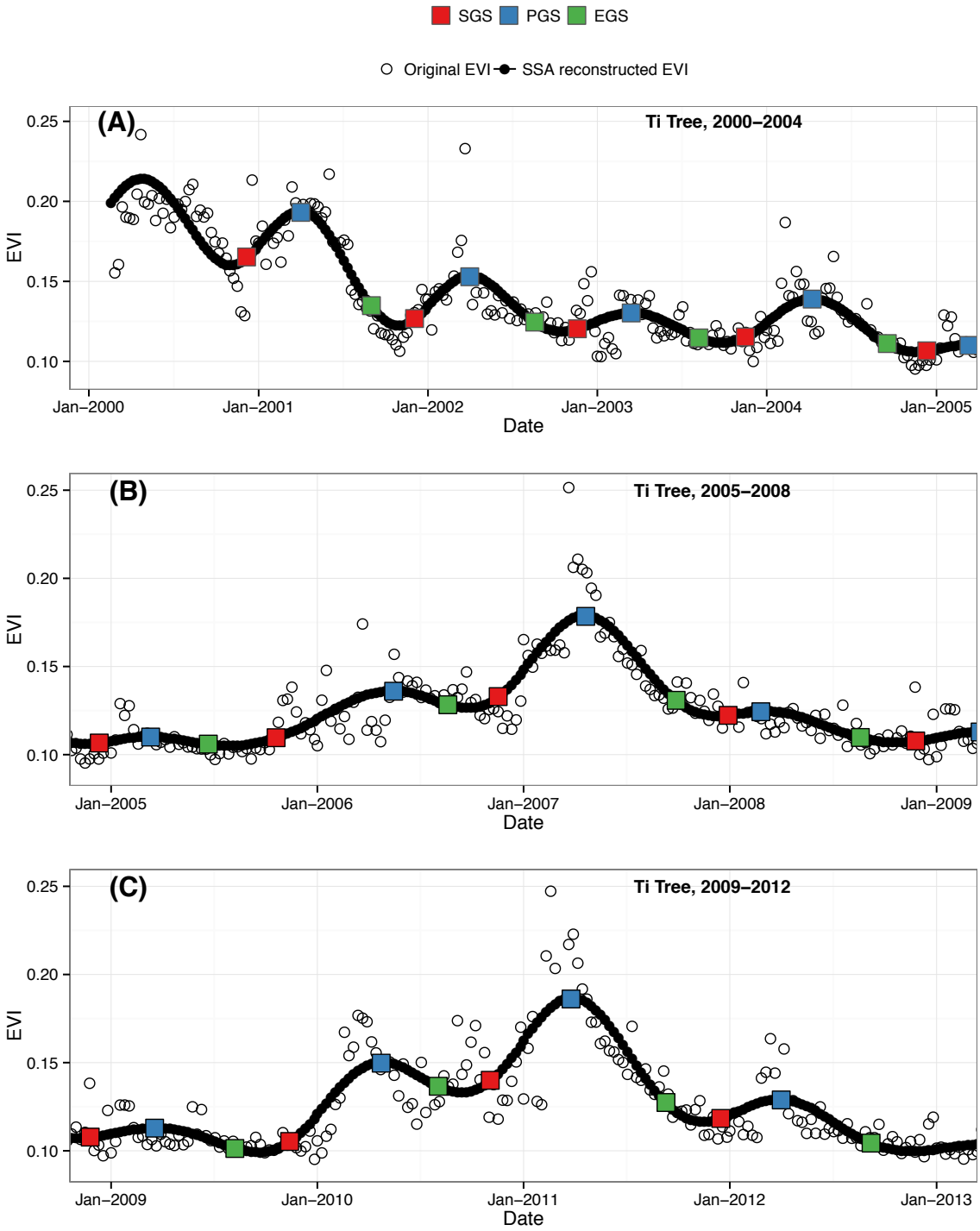


图 3.8 Ti Tree 站点的原始 MODIS EVI 时间序列（Original EVI）、奇异波谱分析方法重构后的 EVI 时间序列（SSA reconstructed EVI）、以及提取出的主要物候时间节点。（A）2000 年到 2004 年；（B）2005 年到 2008 年；（C）2009 年到 2012 年。SGS 为生长季开始时间，PGS 为生长季峰值时间，EGS 为生长季结束时间。

Figure 3.8 Time series comparison of the original MODIS EVI and SSA reconstructed EVI with major phenological transitional dates labelled, Ti Tree, 2000-2013.

在对原始数据应用奇异波谱分析进行平滑的基础上，计算 EVI 时间序列的一阶导数以判定出六个站点的关键物候期信息，包括生长季开始时间（SGS），生长季峰值时间（PGS）和生长季结束时间（EGS）。这些物候时间节点均被标注在图 3.3 到图 3.8 上。从图上可以看到提取出的物候时间节点符合预期，完整且准确地捕捉到了萨瓦纳地区植被生长季内的关键物候节点。

这六个站点跨越了 1100 公里的 NATT 生态降水样带（降水量从 1700 毫米到 400 毫米左右），因此可以看到反映在 EVI 时间序列上的物候形态（phenological profiles）在站点间存在较大的差异（图 3.3-图 3.8）。在北部较为湿润的萨瓦纳地区，譬如 Howard Springs（年均降水量 1722 毫米；图 3.3），Adelaide River（1692 毫米；图 3.4），Daly River（1295 毫米；图 3.5）和 Dry River（1063 毫米；图 3.6）四个站点，EVI 时间序列在 12 年中每个生长季的生长曲线相对来说都比较规则。而到了南部较为干旱的萨瓦纳地区，譬如 Sturt Plains（778 毫米；图 3.7）和 Ti Tree 两个站点（443 毫米；图 3.8），EVI 生长曲线的形态在不同年份由于降水量的差异呈现出较大的差异（图 3.7-图 3.8）。尤其是 NATT 最南端的 Ti Tree 站点，其 EVI 时间序列相当不规则（图 3.8），因此提取这一站点的物候信息非常具有挑战性。从图 3.8 上可以看到，Ti Tree 站点主要的物候信息基本上被准确的提取了出来。虽然在特别干旱的年份，由于 EVI 生长曲线相当平缓，因此生长季内的 EVI 增加幅度（amplitude）非常小，这可能会增加提取出的物候指数的不确定性。接下来将会讨论如何解决在干旱地区由于生长季内 EVI 增加幅度过小而造成的物候提取结果不确定性较大的问题。

### 3.3.2 减少遥感反演物候指数在干旱萨瓦纳地区的不确定性

从图 3.8 上可以看到，由于遥感传感器本身的观测误差以及大气噪音等的干扰，在干旱地区降水极少的年份， EVI 微小的增加幅度或许只是数据噪音，并不代表地面植被真实的生长状况。由于 NATT 研究区南部主要为干旱萨瓦纳植被，因此为了将区域上反演物候指数中的不确定性降低到最低程度，以确保反演出的物候期反映植被真实的生长季信息，本论文应用一个阈值来筛选并滤除掉那些生长季内 EVI 变化幅度过小的年份。在本论文中这个阈值设定为 EVI=0.02，该数值为 MODIS EVI 产品本身的数据误差（Huete et al., 2002）。如果生长季内 EVI 变化幅度，亦即生长季内 EVI 最大值和最小值的差值小于或等于 0.02，则可以认为这一年像元内的植被没有生长，因此不提取该像元在这一年的物候信息，将所有的物候指数设定为空值字段（null value）。

图 3.9 显示了 NATT 最南端干旱萨瓦纳站点 Ti Tree 在 2000 年至 2012 年间 EVI 生长季变化幅度（EVI amplitude）和年降水量（annual precipitation）之间的关系。从图上可以清楚的看到 EVI 生长季变化幅度在 Ti Tree 站点最大的时候可以达到 0.06（2006-2007），而最小的时候则仅有 0.005（2004-2005）（图 3.9）。而同时年降水量

在降水充沛的年份可以达到 940 毫米，而在干旱的年份则只有 116 毫米（图 3.9）。可以看到在该站点无论是 EVI 生长季变化幅度，还是年降水量在十三年间的变化幅度均达到了 10 倍左右，反映出这一地区降水量和植被生长极高的年际变率（图 3.9）。

通过进一步分析发现 EVI 生长季变化幅度和年降水量之间存在较强的正相关（$R = 0.83$, $p < 0.001$），说明虽然 EVI 变化幅度在该站点非常小，但还是在一定程度上反映出该地区植被生长受降水量变化影响的真实情况。同时从图上可以看到，当年降水量低于 250 毫米的时候，EVI 的生长季变化幅度小于 MODIS EVI 产品的数据误差 0.02，因此在提取物候期的时候为了减少最终结果的不确定性将这样的年份排除在外。

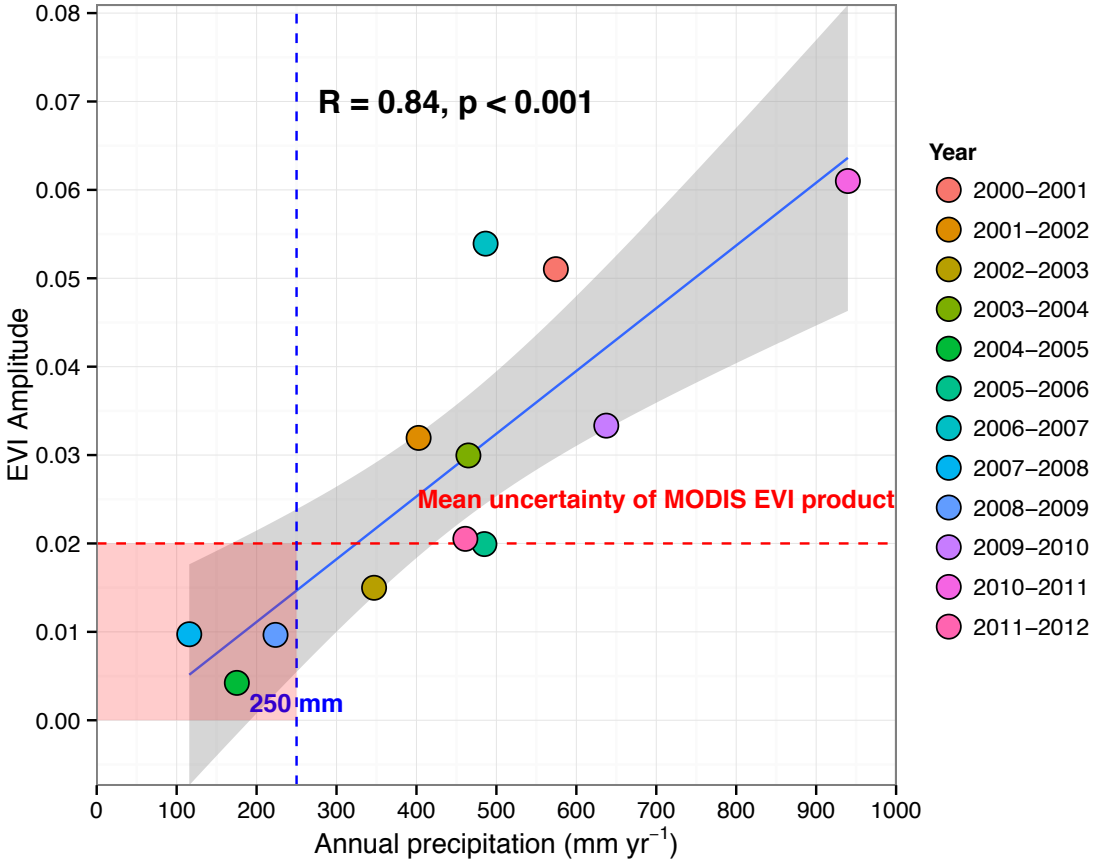


图 3.9 NATT 降水样带最南端干旱萨瓦纳站点 Ti Tree 的 EVI 生长季变化幅度（maximum EVI – minimum EVI）和年降水量（annual precipitation, mm $yr^{-1}$）之间的关系。红色水平虚线标示了 MODIS EVI 的不确定性(Mean uncertainty of MODIS EVI product)（EVI = 0.02）。蓝色竖直虚线为生长季 EVI 振幅超过 0.02 所对应的最小年降水量。红色阴影区为由于降水量过少导致 EVI 变化幅度低于 MODIS EVI 的数据不确定性的区域，因此无法提取可靠的植被物候期信息。蓝色直线为最小二乘拟合的线性回归线，灰色阴影区为回归线的 95%置信区间。

Figure 3.9 Relationship between annual precipitation and EVI season amplitude (peak- baseline) for the south arid endmember of NATT, Ti Tree (Acacia woodlands), over 2000–2012 period. Horizontal red dashed line indicates the mean uncertainty of MODIS EVI product (0.02 EVI unit). Vertical blue dashed line indicates the minimal requirements of annual rainfall for reliable phenology detection at Ti Tree site. Red shaded area indicates the low annual rainfall region with EVI seasonal amplitudes lower than MODIS data error such that

reliable phenology could not be retrieved.

图 3.10 以 NATT 南部圆丘草地（hummock grassland）的一个站点为例，具体说明了干旱是如何对该地区植被生长产生抑制，并进而对使用遥感提取植被物候信息产生影响。对于该圆丘草地站点（131°E，20°S），分别提取了从 2000 年到 2006 年间的月降水量和 MODIS EVI 时间序列数据，并用奇异波谱分析方法从 MODIS EVI 时间序列中计算了主要植被物候期信息。从图 3.10 上可以看到，虽然该站点的 EVI 季节变化曲线非常不规律，但是奇异波谱分析物候反演方法还是提取出了 2000 年到 2006 年间的关键物候时间点。同时从图 3.10 上可以看到该站点植被生长季的长度和雨季长度基本一致，且植被生长季开始的时间滞后于雨季开始的时间（图 3.10）。

在 2004-2005 年间该站点出现了一次严重的干旱事件（图 3.10 上红色阴影部分），而这次干旱事件对该站点植被生长产生了非常强的抑制（图 3.10B）。2004-2005 干旱年的 EVI 生长季变化幅度只有 0.007，远小于 MODIS EVI 产品本身的数据误差（EVI = 0.02），因此可以认为该站点的植被在 2004-2005 年没有显著的生长，亦即无物候期信息可以被提取出来，在这样的情况下该站点该年份的生长季长度被标注为空值（LGS = NULL）（图 3.10）。

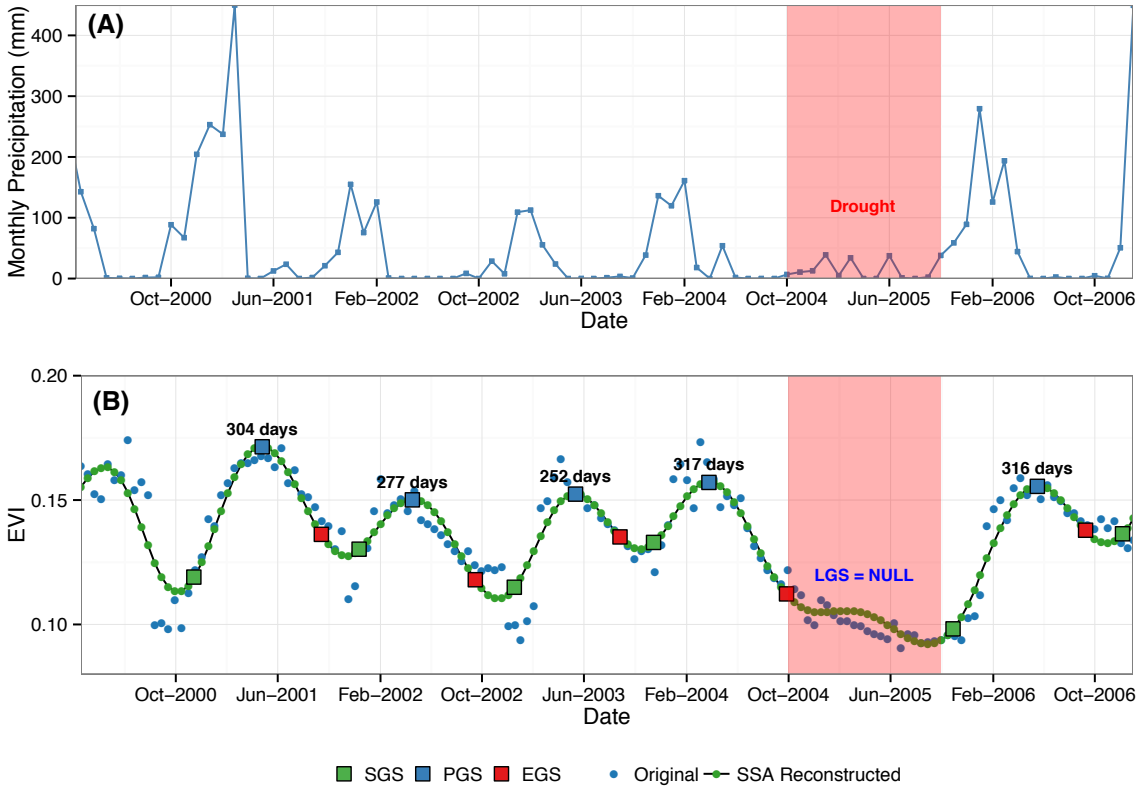


图 3.10 干旱对植被生长和遥感反演物候的影响，以 NATT 南部圆丘草地（hummock grasslands）站点（131°E, 20°S）为例，2000 年 2 月-2006 年 12 月。（A）月降水量时间序列；（B）MODIS EVI 时间序列，包括原始数据（蓝色点）和使用奇异波谱分析重构后的时间序列（绿色线条）。主要的物候时间节点被标注在（B）上，包括生长季开始时间（SGS），生长季峰值时间（PGS）和生长季结束时间（EGS）。图上红色阴影区域标注了该站点 2004-2005 年干旱事件的大致时间范围，这一年的 EVI 生长季变化幅度只有 0.007，远小于 MODIS EVI 产品本身的数据误差（EVI = 0.02），因此可以认为该站点的植被在 2004-2005 年间没有显著的生长，亦即无物候期信息可以被提取出来，在这样的情况下该站点该年份的生长季长度被标注为空值（LGS = NULL）。

Figure 3.10 Time series of (A) monthly precipitation and (B) MODIS EVI at a hummock grasslands site (131°E, 20°S) from Feb-2000 to Dec-2006. Phenology transition dates have been labeled on panel (B). LGS were labeled at the locations of season peak. The red transparent rectangle indicates the 2004-05 drought, when season amplitude of EVI was only 0.007 during that year, thus it could be reasonably acknowledged as exhibiting no enhanced greening season (LGS = 0). Precipitation data was extracted from 5 km Gridded Monthly Rainfall product (Australian Bureau of Meteorology).

### 3.3.3 萨瓦纳植被物候对极端降水和极端干旱的响应

图 3.11 显示了 NATT 研究区六个萨瓦纳通量站点的 MODIS EVI 时间序列以及相应提取出的植被物候在 2000 年到 2012 年期间极端湿润年份（wettest year）和极端干旱年份（driest year）的对比。可以看到在六个站点上，由于降水梯度和植被类型的差异，EVI 生长曲线在季节性和关键物候期时间上都呈现出显著差异（图 3.11）。在北部湿润地区树-草比例较高的几个萨瓦纳站点，包括 Howard Springs（桉树林地），

Adelaide River（热带桉树林地）和 Daly River（桉树林地），EVI 生长曲线的生长季变化幅度最高，表现出了最强的季节性（图 3.11）。而 NATT 南端比较干旱的 Ti Tree 站点（合金欢树林地）则表现出了最弱的季节性（图 3.11）。在位于 NATT 降水梯度中段的 Sturt Plains 站点（丛生草地），植被生长的季节性同样非常弱，尤其是在极端干旱年份，EVI 生长季变化幅度非常小（图 3.11B）。

沿 NATT 降水样带从北向南，六个站点的生长季 EVI 峰值（反映该站点某一年份的植被生产力）呈现出沿纬度逐渐降低的趋势（图 3.11）。生长季 EVI 峰值在 NATT 最北端的 Howard Springs 站点最高，而在南部的 Ti Tree 站点则最低，反映出了这几个站点之间由于降水量和植被类型不同而在植被生产力上的巨大差异（图 3.11）。同时，在旱季（生长季开始之前）因为林下层的草地基本上已经枯萎，所以这时候的 EVI 主要来自冠层的常绿树木。可以看到旱季的最小值 EVI 同样表现出了从北到南的减少趋势，反映了这几个萨瓦纳站点在常绿树木覆盖度上的差异（图 3.11）。

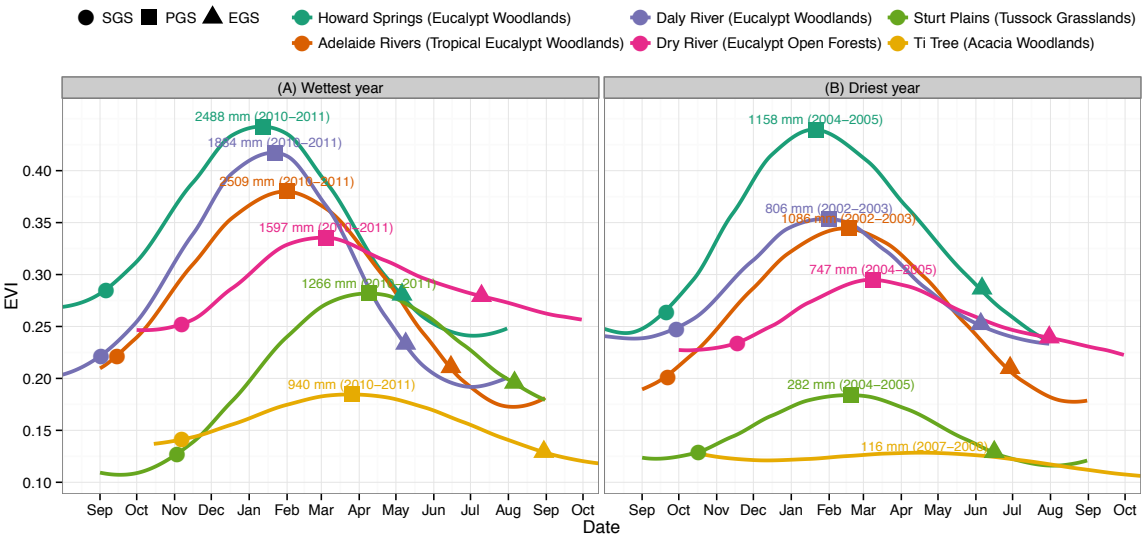


图 3.11 NATT 地区 6 个萨瓦纳站点的植被生长和物候期在极端湿润年份（wettest year）和极端干旱年份（driest yer）的对比。极端湿润年份定义为每个站点在 2000 年到 2012 年期间降水量最多的一年，而极端干旱年份则相反。在每个站点的 EVI 曲线上标注了由奇异波谱分析方法提取出的关键物候节点，包括生长季开始时间（SGS），生长季峰值时间（PGS）和生长季结束时间（EGS）。图上同时标注了每个站点的极端湿润年份和极端干旱年份以及对应的年降水量。

Figure 3.11 Phenological profiles for 6 flux tower sites from 2000 to 2012. “Wettest” means the seasonal EVI profile from the wettest year (with the highest annual precipitation) and “driest” means the profile from the driest year (with the lowest annual precipitation) during 2000–2012, for each site. SSA derived key phenology transitional dates, annual precipitation and hydrological year have also been labeled for each site.

而在物候期时间点上，NATT 地区六个站点从北部湿润萨瓦纳到南部干旱萨瓦纳的变化反映了夏季雨季开始时间从北部沿海地区向南部内陆地区逐渐推迟的趋势（图 3.11）。总的来说，六个站点上植被生长季的开始时间（SGS）集中在九月到十一月之间，在北部站点生长季开始的时间较早，然后向南呈现推迟趋势（图 3.11）。同时，生长季峰值的时间（PGS）和结束时间（EGS）也呈现出了沿纬度从北到南逐渐推迟的趋势，生长季峰值时间（PGS）集中在一月到四月，而生长季结束时间（EGS）则集中在五月到八月之间（图 3.11）。

从图 3.11 上同时可以看到，在六个站点上萨瓦纳植被的生长和物候对极端湿润和极端干旱的响应程度表现出了非常大的差异。对于六个站点来说，2000-2012 年之间的极端湿润年份均出现在 2010-2011 拉尼娜年（La Niña），而极端干旱年份的时间则有差异，Adelaide River 和 Daly River 两个站点的极端干旱年份出现在 2002-2003 年，而 Howard Springs，Dry River 和 Sturt Plains 则是 2004-2005 年，在 Ti Tree 则是 2007-2008 年（图 3.11）。

位于 NATT 研究区北部，植被类型为桉树森林和林地的几个站点（包括 Howard

Springs, Adelaide River, Daly River and Dry River）的生长季开始时间、峰值时间和结束时间在极端干旱年份均出现了相对极端湿润年份 5-30 天不等的推迟（图 3.11）。而南部两个萨瓦纳站点（Sturt Plains 和 Ti Tree）植被物候的对极端干旱的响应模式更为复杂（图 3.11）。譬如说 Ti Tree 站点在干旱年份由于 EVI 生长季振幅非常低（小于 MODIS EVI 数据误差 EVI = 0.02），因此没有任何物候信息被提取出来（图 3.11B）。而 Sturt Plains 站点的植被物候在干旱年份表现出了一定的提前趋势，和北部桉树森林和林地站点在旱年的推迟正好相反（图 3.11B）。

总的来说，在 NATT 萨瓦纳研究区无论是 EVI 生长曲线形态还是物候期，对降水量变化的响应程度都呈现出从北向南逐渐增加的趋势（图 3.11）。在北部湿润萨瓦纳地区的植被生长对降水量的变化非常不敏感（图 3.11）。从图 3.11 上可以看到尽管降水量在极端湿润和极端干旱年份的差异非常大，譬如说在 Howard Springs，极端湿润年份的年降水量达到了 2488 毫米，而在极端旱年则骤降到 1158 毫米（减少了 53% 以上）。但是从图 3.11 上可以很清楚的看到，Howard Springs 站点的萨瓦纳植被生长对年降水量如此巨大的变化并没有表现出明显的响应。无论是 EVI 生长曲线还是关键植被物候期信息，在湿润年和干旱年之间的差别并不是很大（图 3.11）。这些说明湿润萨瓦纳地区的植被生长很有可能是受到太阳辐射的限制（energy-limited）而不是水分限制（water-limited）。与北部湿润萨瓦纳相反，在南部较为干旱的地区，Sturt Plains 站点生长季 EVI 的变化幅度从湿润年份的 0.27 减少到 0.18（减少了 33%），而在 Ti Tree 站点干旱年的 EVI 变化幅度相对湿润年则减少了 73%，说明干旱萨瓦纳地区的植被生长对降水量的变化敏感程度非常高（图 3.11）。

### 3.3.4 站点尺度上萨瓦纳植被物候的年际变化规律

图 3.12 显示了 NATT 地区六个萨瓦纳站点的植被生长季节性和物候时间节点在 2000 到 2012 年间的年际变化规律。可以看到在北部的桉树林地（Eucalypt woodlands）站点（Howard Springs, Adelaide River 和 Daly River），植被生长和物候期的年际变率相对较小，不过仍然可以看到从 2006-2007 到 2011-2012 这五年间，Howard Springs 和 Daly River 两个站点的物候期有提前的趋势（图 3.12A，C）。植被物候的年际变率在桉树疏林站点 Dry River 呈增加趋势（图 3.12D），而向南到了丛生草地站点 Sturt Plains 和合金欢树林地站点 Ti Tree，萨瓦纳植被物候的年际变化则更为显著（图 3.12E，F）。对于整个 NATT 研究区来说，2004-2005 年是一个比较干旱的年份，可以看到这一干旱事件导致了 Ti Tree 站点的植被在这一年完全没有表现出任何生长季节性，从而没有物候期可以从遥感观测中被反演出来（图 3.12F）。

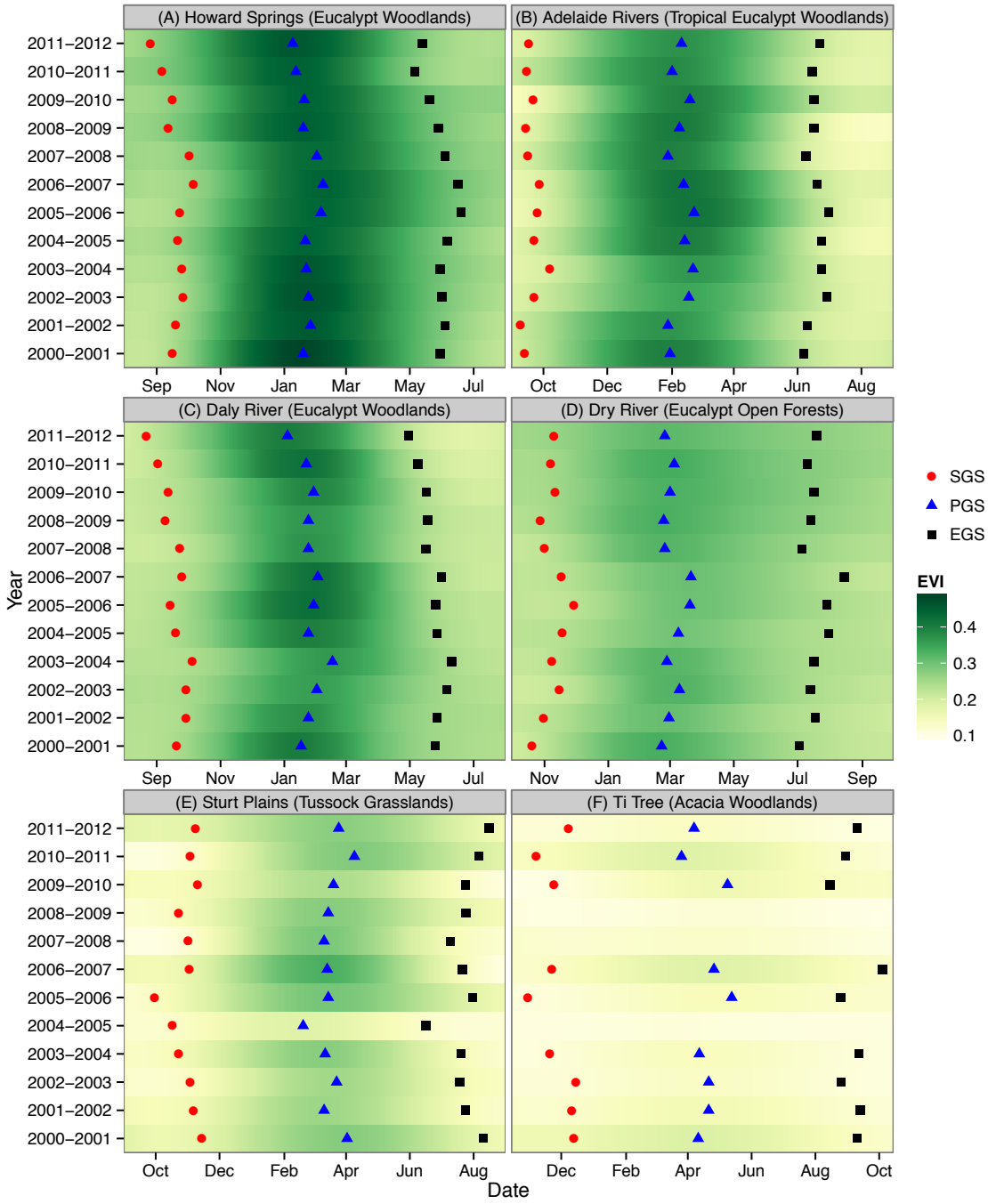


图 3.12 NATT 站点植被生长和物候在 2000 到 2012 年期间的年际变化规律。背景为 MODIS EVI 在每一个水文年（hydrological year）的季节变化规律。采用水文年而不是日历年（calendar year）是因为这一地区的植被生长主要呈现出雨季-旱季之间的差异，因此和北半球温带地区受温度驱动而有春夏秋冬四季之分不同，热带萨瓦纳地区的季节用降水的年内分布来划分更适合，亦即雨季、旱季、雨季和旱季的过渡期等。

Figure 3.12 Phenogram–inter-annual variations in vegetation phenology plotted with intra-annual EVI seasonality as background for six major sites from 2000 to 2012.

## 3.4 讨 论

### 3.4.1 基于奇异波谱分析的萨瓦纳植被物候遥感反演方法

本论文发展出了一种新的萨瓦纳植被物候遥感反演方法。该方法基于数学上的奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis），首先对原始遥感植被指数数据进行噪音剔除和时间序列重建，然后在提取物候的时候采用了比较客观的基于像元内植被生长速率的判定方法，适合于适应于生长曲线不规则且数据噪音较大的热带萨瓦纳地区。

随后将该方法应用到NATT研究区六个萨瓦纳站点上，以提取各个站点上从2000年到2012年间的植被物候期指数。研究结果显示该方法无论是在湿润萨瓦纳地区（譬如Howard Springs），还是在干旱萨瓦纳地区（譬如Ti Tree），所提取出的物候期信息均能很好的反映出站点植被生长的年际变化规律。

由于奇异波谱分析是一种无参（non-parametric）数学方法，在对原始遥感数据进行降噪的时候不需要拟合任何数学模型（譬如逻辑斯蒂模型或非对称高斯模型），因此其对形态不规则（亦即不符合钟形分布）的 EVI 生长曲线有着非常好的适应性。同时，该方法在判断关键物候时间节点的过程中没有采用任何阈值，因此所提取出的物候期信息相对来说比较客观，可以对萨瓦纳植被物候在不同区域上的变化进行比较。

在应用奇异波谱分析方法的时候，窗口大小和 SVD 成分的选择这两个参数的设定对最终的噪音滤除效果有比较重要的影响。本次研究中通过前期的分析发现当窗口大小设定为74（亦即 74 个 8 天分辨率的 MODIS EVI 观测数据），在重构时间序列的时候选择 4 个 SVD 成分的时候，原始 EVI 时间序列中的长期趋势和周期性等能够得到较好的保留，同时在最大程度上滤除掉数据本身的随机噪音。然后，由于整个 NATT 研究区植被结构类型在空间上存在非常大的差异，因此对不同的地区根据其植被和气候特点应用不同的参数设定或许能得到更为理想的结果。但是这样无疑会显著增加整个物候提取方法的复杂程度。因此本次研究中对整个研究区设定统一的奇异波谱分析参数。将来的研究可以探索对基于奇异波谱分析的遥感物候反演方法进行进一步优化，譬如在不同萨瓦纳植被类型（或降水梯度）测试不同的参数组合的提取效果，以提高该方法对萨瓦纳植被物候的反演能力。

### 3.4.2 遥感反演植被物候在萨瓦纳地区的生物学含义

由于植被结构的复杂性（树-灌木-草多层结构），使用遥感观测在像元尺度上反演得到的植被物候期信息在热带萨瓦纳具有其独特的生物学含义。基于对研究区内树木和林下草生理和生长特点的认识，本论文认为遥感物候反映出的物候信息主要来自萨瓦纳林下层草地的生长季节性。以下将基于地面观测结果来支持这一论点：

首先，在 NATT 研究区北部靠近 Darwin 的一个站点（离 Howard Springs 非常近）的地面调查显示，该地区树种主要为常绿树种桉树（*Eucalyptus spp.*），这些桉树的叶

面积指数在年内呈现出非常小的季节变化（O'Grady et al., 2000; Williams et al., 1997）。进一步研究发现这些树种通常具有较深的根系，能够在旱季汲取到深层的土壤水分或地下水从而维持生长所需（Borchert, 1994; Cook et al., 1998）。这一地区植被群落的两个建群树种 *Eucalyptus miniata* 和 *Eucalyptus tetrodonta* 的生物量占了整个群落树木生物量的 80%，而研究发现这两个树种在雨季和旱季保持了几乎相同的叶面积指数（Duff et al., 1997; Williams et al., 1997; O'Grady et al., 2000）。

其次，在 Howard Springs 站点建立的长期涡度相关通量塔的测量发现，该站点中层灌木和林下草地的碳通量在雨季占了整个生态系统中碳通量的 70%到 80%（Eamus et al., 2001）。但是到了旱季的中晚期，这些草地和灌木对生态系统碳通量的贡献率降到几乎为零（Eamus et al., 2001）。该站点的观测同时发现，树木的蒸腾速率（transpiration rate）在雨季和旱季保持了几乎相同的水平，说明这些树木在旱季有稳定的水分供应以维持树木的蒸腾需要（Hutley et al., 2001）。

第三，在 NATT 南部干旱地区的合金欢树林地站点 Ti Tree 的地面调查显示，树木建群种 *Acacia aneura*（常绿树种）叶面积指数的年内变化程度非常小（Eamus et al., 2013; Cleverly et al., 2013）。而整个群落叶面积指数的季节变化主要来自于林下层草地的叶面积变化（Eamus et al., 2013）。林下层草地的叶面积指数在雨季时可以达到 0.3，而在旱季时则只有 0.05，因此该站点碳-水通量的年内变化主要由林下层草地的生长来驱动（Eamus et al., 2013; Cleverly et al., 2013）。

基于以上对 NATT 研究区地面测量和通量观测研究的分析可以很清楚的看到，澳大利亚北部热带萨瓦纳植被生长的季节性主要来自于受降水驱动的林下层草地和灌木的生长，而树木的季节性则相对较小。

本论文主要关注如何从遥感观测中提取整个像元尺度上的萨瓦纳植被物候信息，而不是将群落的各个组成部分（譬如树、灌木、草）分开。但是，接下来的研究中可以将遥感观测和地面测量结合起来，探索将热带萨瓦纳分解为不同组成部分的方法（亦即树-草分解）。到目前为止，无论是基于涡度相关通量塔的观测，还是基于遥感卫星的观测，这样的树-草分解都没有实现。因此，这一问题将是接下来对热带萨瓦纳研究的一个重点。譬如 Guerschman 等（2009）尝试了用高光谱遥感数据来将热带萨瓦纳的地表通过光谱分解（spectral unmixing）的方法分解为光合植被（photosynthetically-active vegetation）、非光合植被（non-photosynthetically-active vegetation）和裸土（bare soil）。而澳大利亚热带萨瓦纳树木和林下草在生长特点上的差异也已经被用来尝试将遥感反演得到的植被结构指数（譬如叶片投影盖度和叶面积指数等）在亚像元尺度分解为树和草（Donohue et al., 2009; Lu et al., 2003; Roderick et al., 1999）。这样的树-草分解将在很多研究和应用中具有非常重要的价值，譬如火灾预警（萨瓦纳地区火灾的燃料主要是旱季林下层累积的干草），牧草资源管理，以及

区域水循环过程的模拟等。

## 3.5 结 论

本章研究针对热带萨瓦纳植被生长季节性和物候期的特点，提出了一种新的基于奇异波谱分析的萨瓦纳遥感物候反演方法。这一方法具有客观且适应性强的特点，能够被应用到植被生长曲线非常不规则，且物候年际变率较高高的热带萨瓦纳地区。通过将该方法应用到 NATT 研究区的六个萨瓦纳站点，发现该地区植被物候期（包括生长季开始和结束时间）呈现出从北到南逐渐推迟的趋势，反映出了植被物候期受雨季开始和结束时间的影响。北部由桉树建群的萨瓦纳植被物候的年际变率相对较小，而南部由合金欢树建群的干旱萨瓦纳植被物候则表现出了较大的年际变率。通过分析站点上植被生长在极端干旱和极端湿润年份的差异发现，北部湿润萨瓦纳地区的植被生长对年降水量的变化并不敏感。与之相反，南部干旱萨瓦纳地区的植被生长在干旱年份受到了极大的抑制，甚至没有表现出任何季节性。通过对地面调查和通量观测资料的分析认为，由于澳大利亚北部萨瓦纳地区树木主要为常绿树种且年内叶面积指数变化非常小，因此通过遥感观测得到的植被生长季节性和物候期信息主要反映了该地区林下层草地在雨季的生长。

# 第四章 使用地面通量观测对遥感反演植被生长和物候期信息进行验证


## 摘 要

遥感反演得到的植被生长和物候信息需要进行地面验证之后方可对其可靠性进行评估。然而在热带萨瓦纳地区，由于缺乏长期地面物候观测资料，因此如何对遥感反演得到的植被生长和物候期信息进行地面验证也是目前萨瓦纳遥感物候研究面临的重要挑战。涡度相关（Eddy Covariance）通量塔能够在冠层尺度上以非常高的时间分辨率对生态系统和大气之间碳、水和能量的交换进行连续的测量。而且，通量塔的观测尺度（footprint）和 MODIS 传感器的空间分辨率比较接近，因此可以作为对遥感反演萨瓦纳植被生长和物候进行验证的地面数据源。本章在澳大利亚北部萨瓦纳地区，选择代表不同降水梯度和萨瓦纳植被类型的三个通量站点，使用从通量塔观测中计算的总初级生产力（GPP）数据对 MODIS EVI 所反映出的植被生长和物候期信息进行了比较和验证。结果显示 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间存在非常好的相关性，且从 MODIS EVI 时间序列中提取出的物候信息能够较为准确地反映出由通量塔观测到的真实的地面植被生长状况。在北部湿润萨瓦纳地区，遥感反演得到的植被物候信息与从地面通量塔观测中提取的物候信息之间契合度较高。但是到了南部干旱萨瓦纳地区，遥感反演物候期指数的不确定性增加，且通过分析发现不确定性主要来自 EVI 和 GPP 在生长季结束阶段的“滞后效应”（hysteresis effect），亦即 GPP 在生长季结束阶段的下降要明显早于 MODIS EVI 的下降时间。本章研究结果说明将中等分辨率的遥感数据（MODIS）和站点尺度的涡度相关通量观测数据结合，可以在不同尺度上实现对热带萨瓦纳植被物候和生态系统功能更好的研究。



## 关键字

热带萨瓦纳，遥感物候，涡度相关，GPP，MODIS，EVI


## 4.1 引 言

由于受到大气层干扰和传感器本身误差等问题的影响，搭载于卫星之上的遥感传感器所观测到的植被生长信息需要通过使用地面数据进行验证之后方可确定其有效性。遥感反演得到的物候信息反映的是整个像元尺度上的植被生长的状况，譬如像元内植被生长季的开始时间、结束时间和生长季长度等（Zhang et al., 2003）。然而传统地面物候观测记录的则是植株尺度上的物候期信息，譬如发芽、展叶和开花等。在热带萨瓦纳地区，并没有建立起类似于北半球温带地区那样长期的、大尺度的地面物候观测网络。因此在萨瓦纳地区寻找可用于对遥感反演的植被生长以及物候信息进行比

较和验证的地面观测数据源也是本次研究的重点之一。

目前发展迅速的全球通量网络（FLUXNET）（Baldocchi et al., 2001）和区域通量网络（譬如 OzFlux, ChinaFlux）所提供的观测数据或可用来对遥感观测到的植被生长和物候信息进行验证。通量观测塔能够非常高的时间分辨率（通常为 30 分钟）对生态系统和大气之间 $CO_2$、水分和能量交换进行连续的观测，提供了对于生态系统尺度上植被生长日变化和年内变化较为准确的描述（Baldocchi et al., 2001; Leuning et al., 2005）。通量观测塔的测量足迹（footprint）依植被类型、地形和局地气象条件的差异而不同，但通常在数百平方米到数平方公里之间，这与目前几种主要的中等分辨率卫星传感器（MODIS，SPOT，MERIS）的空间分辨率基本一致。这些使得使用通量塔测量数据对遥感反演得到的生态系统参数（譬如物候期、蒸散发、初级生产力）等进行地面验证成为可能。

目前已经有一些研究对使用通量观测数据验证遥感反演物候进行了尝试。譬如 Xiao 等（2009）在 2009 年的研究中通过定义光合活跃期（Photosynthetic Active Period），也就是一年中 GPP 连续大于零（或根据不同生态系统而设定相应阈值）的天数来推估植被生长季的长度。虽然这种方法的生物学意义较强，在植被 GPP 在冬季会完全为零的北半球温带和寒温带植被较为适合。但是在澳大利亚热带萨瓦纳地区，由于树木建群种主要为常绿树种（譬如 *Eucalyptus* 属和 *Acacia* 属等），这些阔叶常绿树种由于根系较深能够汲取深层地下水，所以在旱季也保持相当程度的光合和蒸散，因此 GPP 在全年并没有完全等于零的时候（Beringer et al., 2007; Eamus et al., 2013）。在非洲热带萨瓦纳地区，Jin 等（2013）通过将遥感数据和通量数据进行对比也发现，因为植被结构和物种组成的差异，在 GPP 相同的情况下不同萨瓦纳植被类型之间在遥感植被指数上的差异非常大，因此一个固定的 GPP 阈值无法被应用到不同萨瓦纳植被类型上。

本章研究的主要目的有：

1) 在澳大利亚北部萨瓦纳地区的三个站点上比较地面通量塔测量 GPP 和 MODIS EVI 所反映的植被生长季节性之间的差异

2) 比较使用相同物候指数提取方法，从通量塔 GPP 和 MODIS EVI 两种独立数据源中所提取出的植被物候信息之间的可比性；

3) 对基于遥感观测提取干旱地区萨瓦纳植被物候的不确定性进行分析。

## 4.2 数据和方法

### 4.2.1 通量站点介绍

本章研究用到了由澳大利亚-新西兰通量研究和观测网络（Australian and New Zealand Flux Research and Monitoring network, OzFlux）提供的三个热带萨瓦纳通量站

点的数据，包括 Howard Springs（桉树林地， *Eucalytus* woodlands），Daly River（桉树林地）和 Ti Tree（合金欢树林地， *Acacia* woodlands）。对这三个站点情况的详细介绍请参见论文第二章 2.4 小节。

这三个站点在空间上跨越了南北长约 1100 公里的 NATT 生态-降水样带（ecological rainfall gradient）。同时，三个站点代表了澳大利亚最主要的两种热带萨瓦纳植被类型（桉树林地和合金欢树林地）。Howard Springs 的植被类型为桉树林地，年平均降水量为 1722±341 mm；Daly River 的植被类型为桉树林地，年平均降水量为 1295±334 mm；而 Ti Tree 站点的植被类型为合金欢林地，年平均降水量为 443±222 mm。

在使用由 OzFlux 网络提供的 Level-3 通量测量数据之前，本论文对原始数据进行了一系列预处理，以确保几个站点之间数据的一致性。这些预处理包括一般性的质量检查（quality assessment）、异常值剔除（outlier removal）、对低湍流期数据的校正（correction for the low turbulence period）等。夜间的净生态系统交换 NEE（Net Ecosystem Exchange）主要来自于生态系统呼吸（Ecosystem Respiration, $R_{eco}$），根据 Richardson 等人提出的方法，本此研究对夜间的 NEE 拟合一个经验的二阶傅里叶回归模型（empirical second-order Fourier regression）来进行空值插补。二阶傅里叶回归模型的数学表述如下（Richardson & Hollinger, 2005）：

$$R_{eco} = f_0 + s_1 \times \sin(D_\pi) + c_1 \times \cos(D_\pi) + s_2 \times \sin(2 \times D_\pi) + c_2 \times \cos(2 \times D_\pi) + \varepsilon \quad (3.1)$$

式中 $f_0$, $s_1$, $c_1$, $s_2$ 和 $c_2$ 为拟合的二阶傅里叶模型参数，$D_\pi$ = DOY * 360 / 365 （DOY 为儒略日，day of year），$\varepsilon$ 为模型的回归残差。使用这种方法来对 *Reco* 进行空值插补相对简单易行，而且在计算 *Reco* 时不需要使用气象数据（Richardson & Hollinger, 2005）。总初级生产力 GPP（Gross Primary Productivity）可以通过 NEE 和 Reco 之间的差值得到：$GPP = R_{eco} - NEE$。因为本次研究的主要目的是获取稳定可靠的连续 GPP 数据，因此将日分辨率的 GPP 数据合并为 16 日平均值以与 16 天分辨率的 MODIS EVI 数据进行比较。

### 4.2.2 物候指数提取方法

为了确保提取方法的一致性，以减少由于方法差异对结果带来的不确定性，本论文使用了相同的方法从 MODIS EVI 时间序列和通量 GPP 时间序列中提取物候期信息。采用本次学位论文中发展出的新的基于奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis）的物候指数提取方法，该方法在第三章 3.2 小节已有详细介绍，在此不再重复。由于通量观测数据在某些时段由于仪器本身的问题或气象条件的原因（譬如降水）存在数据缺失。因此为了能够从 GPP 数据中顺利提取出物候期信息，对这些缺失数据进行了线性插补（linear interpolation）。这一部分的数据在结果分析的时候特别进行了说明。

### 4.2.3 数理统计方法

为了比较 MODIS EVI 和通量 GPP 之间的关系，使用最小二乘法（least-squares）计算了两组数据之间的确定系数 $R^2$（coefficient of determination）。为了度量遥感反演物候的误差，计算了均方根误差（Root Mean Squared Error, RMSE）：

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(Obs - Pred)^2}{n}} \tag{4.2}$$

式中 *Obs* 为基于通量 GPP 提取出的物候指数，*Pred* 为基于 MODIS EVI 提取出的物候指数, *n* 为样本数量。

## 4.3 结 果

### 4.3.1 MODIS EVI 和通量 GPP 时间序列以及提取物候指数的比较

图 4.1 显示了在 NATT 研究区三个萨瓦纳站点上 MODIS EVI 和通量 GPP 时间序列，以及从这两个独立观测数据源中分别提取出的关键物候期时间的比较。总的来说，在 Howard Springs（桉树林地）和 Daly River（桉树林地）两个站点，MODIS EVI 和 GPP 之间的同步性非常好，并且提取出的物候期信息也比较一致（图 4.1A-C 和表 4.1-4.2）。在 Howard Springs 站点，对于植被生长季开始日期（SGS）、峰值日期（PGS）、结束日期（EGS）和生长季长度（LGS）这四个关键物候指数，从 MODIS EVI 和通量 GPP 提取出的结果之间的均方根误差（RMSE）分别为 12.2 天，9.5 天，11.1 天和 13.8 天（图 4.1A-B 和表 4.1）。在 Daly River 站点，由于通量 GPP 数据中存在较大的缺失（图上灰色阴影部分），因此造成计算出的遥感反演物候期的误差相比较 Howard Springs 站点来说有所增加（图 4.1C；表 4.2）。在 Daly River，遥感反演 SGS，PGS、EGS 和 LGS 的 RMSE 分别为 19.1 天，10 天，20.8 天和 19.8 天（图 4.1C 和表 4.2）。由 MODIS EVI 数据观测到的生长季峰值时间（PGS）在 Daly River 要晚于由通量 GPP 反应的生长季峰值时间，说明植被光合作用达到最大值的时间在该站点要早于反映冠层叶面积指数及叶绿素含量水平的 EVI 达到最大值的时间（图 4.1C）。

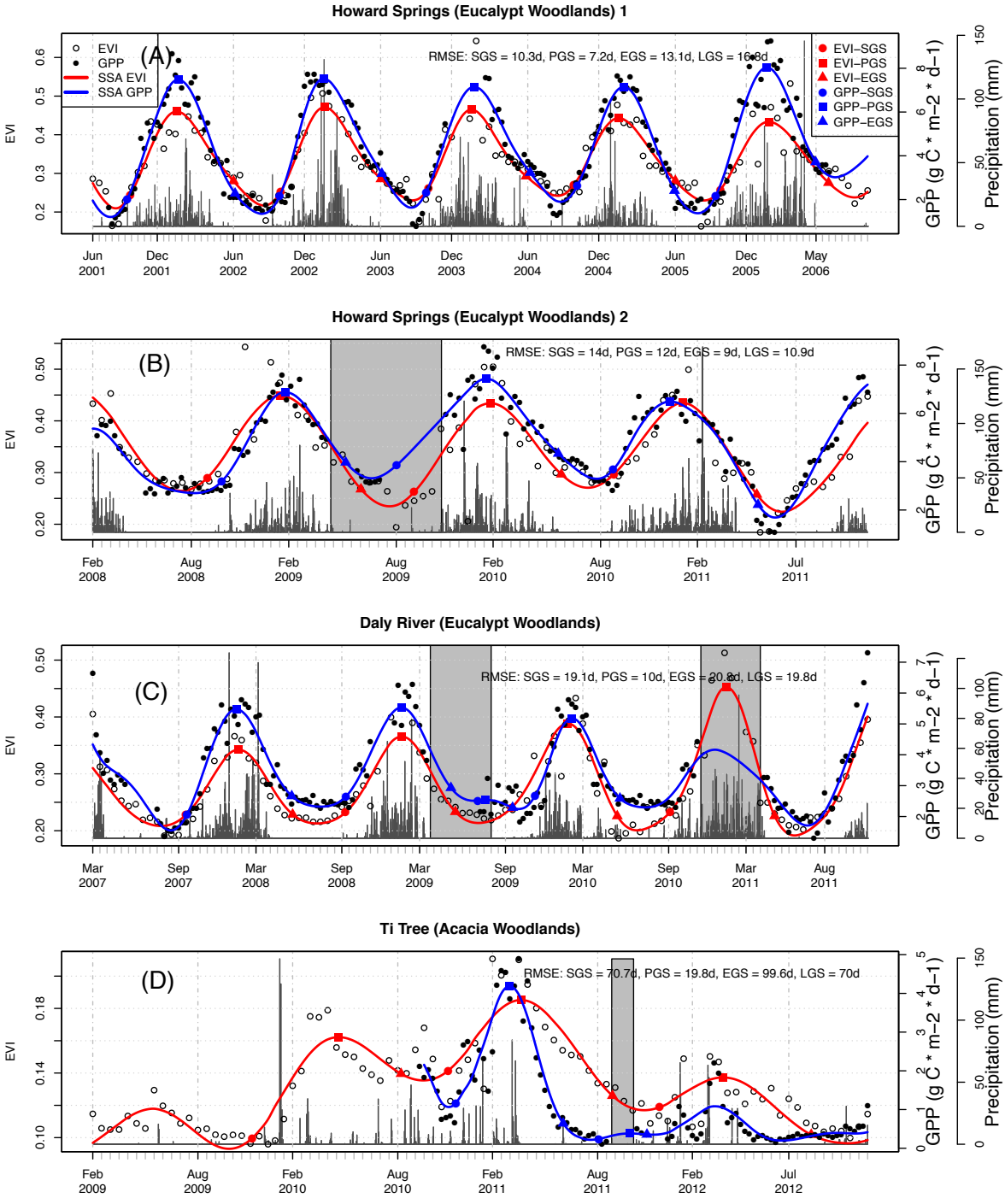


图4.1 NATT研究区三个萨瓦纳站点上MODIS EVI时间序列和通量GPP时间序列以及提取物候指数之间的比较。（A）Howard Springs（桉树林地） (2001-2006)；（B）Howard Springs (2008-2011)；（C）Daly River（桉树林地）(2007-2011)；（D）Ti Tree（合金欢树林地）(2009-2012)。每个站点由奇异波谱分析方法提取出的物候时间节点，以及遥感反演物候的误差（RMSE）均被标注在每幅图上。对于 EVI 和 GPP，提取物候期的方法一致，均为基于奇异波谱分析的方法。图上的阴影区标示了通量 GPP 数据中存在较大数据缺失的时间段，这些时间段的数据在提取物候期之前进行了线性插补，因而可能造成提取出的结果不确定性较大。背景的灰色竖直线条为每个通量站点的逐日降水数据。

Figure 4.1 Inter-comparison of the MODIS EVI time series and flux tower GEP time series over three local sites. (A) Howard Springs (2001–2006); (B) Howard Springs (2008–2011); (C) Daly River (2007–2011); (D) Ti Tree (2009–2012). Phenology metrics computed for both EVI and GEP using same algorithm. Shaded areas indicate time periods that have continuous missing gaps presented in flux GEP data. These missing gaps were filled using linear interpolation and then used to calculate phenology metrics.

Ti Tree 站点（合金欢树林地）的植被生长曲线表现出了极大的不规则性以及较高的年际变率，但是总的来说 MODIS EVI 和通量 GPP 之间仍然存在比较好的相关性（图 4.1D）。最重要的是，在干旱合金欢林地由 MODIS EVI 反映的生长季信息，以及由此提取出的物候期信息得到了地面通量观测数据的确认（图 4.1D）。不过可以看到在三个站点中，MODIS EVI 和通量 GPP 之间在时间序列上的差异在 Ti Tree 站点最大（图 4.1D）。譬如说由 MODIS EVI 提取出的生长季峰值时间（PGS）要比由通量 GPP 提取出的 PGS 晚大约三个星期左右（图 4.1D 和表 4.2）。而遥感反演的生长季开始时间（SGS）和生长季峰值时间（PGS）存在更大的不确定性，特别是 MODIS EVI 提取出的生长季结束时间要比由 GPP 提取出的生长季结束时间晚三个月左右。

表 4.1 Howard Springs 站点由 MODIS EVI 和通量 GPP 分别计算出的植被物候期比较。物候期指数包括生长季开始时间（SGS）、生长季峰值时间（PGS）、生长季结束时间（EGS）和生长季长度（LGS）。表中的 2001-2002 表示从 2001 年 7 月开始到 2002 年 6 月结束的一个水文年（hydrological year）。

Table 4.1 Phenological metrics calculated using MODIS EVI and flux GPP for Howard Springs.

| 物候指数 | 数据 | 水文年 Hydrological year | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **2001-2002** | **2002-2003** | **2003-2004** | **2004-2005** | **2005-2006** | **2008-2009** | **2009-2010** | **2010-2011** |
| **SGS** | **GPP** | 2011.09.11 | 2002.09.26 | 2003.09.27 | 2004.10.05 | 2005.09.14 | 2008.09.24 | 2009.08.30 | 2010.09.02 |
| | **EVI** | 2011.09.25 (+6)* | 2002.10.03 (+7) | 2003.10.06 (+9) | 2004.09.30 (-5) | 2005.09.30 (+16) | 2008.09.09 (-15) | 2009.09.15 (+16) | 2010.09.05 (+3) |
| **PGS** | **GPP** | 2002.01.20 | 2003.01.18 | 2004.01.30 | 2005.01.29 | 2006.01.20 | 2009.01.20 | 2009.01.17 | 2010.12.17 |
| | **EVI** | 2002.01.22 (+2) | 2003.01.23 (+5) | 2004.01.23 (-7) | 2005.01.21 (-8) | 2006.01.29 (+9) | 2009.01.18 (+8) | 2010.01.28 (+11) | 2011.01.06 (+20) |
| **EGS** | **GPP** | 2002.06.08 | 2003.06.08 | 2004.06.18 | 2005.06.06 | 2006.06.11 | 2009.05.12 | 2010.05.27 | 2011.05.23 |
| | **EVI** | 2002.06.14 (+6) | 2003.06.12 (+4) | 2004.06.06 (-12) | 2005.06.12 (+6) | 2006.06.27 (+16) | 2009.06.11 (+30) | 2010.06.04 (+8) | 2011.05.20 (-3) |
| **LGS** | **GPP** | 262 | 255 | 265 | 244 | 270 | 230 | 270 | 263 |
| | **EVI** | 262 (0) | 252 (-3) | 244 (-21) | 255 (+11) | 270 (0) | 275 (+45) | 262 (-8) | 257 (-6) |

* 括号中的数字表示了由 EVI 和 GPP 分别计算出的物候指数之间的差异。譬如对于 SGS，PGS 和 EGS 来说，正数表示由 EVI 计算出的物候日期要晚于由 GPP 计算出的日期，而负数则表示由 EVI 计算出的物候日期要早于由 GPP 计算出的日期。

* Number within the bracket represents the difference between the phenological metrics (date or length) calculated using EVI and GPP. Taking SGS-EVI and SGS-GPP for example, if it is a positive number, it means that SGS calculated using EVI delayed the SGS calculated using GPP, and vice versa.

表 4.2 Daly River 站点和 Ti Tree 站点由 MODIS EVI 和通量 GPP 分别计算出的植被物候期比较。物候期指数包括生长季开始时间（SGS）、生长季峰值时间（PGS）、生长季结束时间（EGS）和生长季长度（LGS）。表中的 2007-2008 表示从 2007 年 7 月开始到 2008 年 6 月结束的一个水文年（hydrological year）。

Table 4.2 Phenological metrics calculated using MODIS EVI and flux GPP for Daly River and Ti Tree.

| 物候指数 | 数据 | Daly River | | | | Ti Tree | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2007-2008 | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2010-2011 | 2011-2012 |
| SGS | GPP | 2007.09.27 | 2008.09.14 | 2009.11.13 | 2010.09.04 | 2010.12.16 | 2011.08.23 |
| | EVI | 2007.10.01 (+4) * | 2008.09.21 (+7) | 2009.09.24 (-50) | 2010.09.18 (+14) | 2011.11.13 (-33) | 2011.12.08 (+107) |
| PGS | GPP | 2008.01.17 | 2009.01.13 | 2010.02.07 | 2010.12.23 | 2011.03.01 | 2012.03.10 |
| | EVI | 2008.01.26 (+9) | 2009.01.25 (+12) | 2010.01.31 (-7) | 2011.01.22 (+30) | 2011.03.26 (+25) | 2012.03.31 (+13) |
| EGS | GPP | 2008.05.27 | 2009.06.26 | 2010.05.27 | 2011.06.11 | 2011.06.12 | 2012.06.06 |
| | EVI | 2008.05.27 (+5) | 2009.05.26 (-31) | 2010.05.24 (-3) | 2011.05.11 (-31) | 2011.09.05 (+85) | 2012.09.16 (+102) |
| LGS | GPP | 262 | 255 | 265 | 244 | 270 | 230 |
| | EVI | 239 (-23) | 247 (-8) | 242 (-23) | 235 (-9) | 296 (+26) | 283 (+53) |

* 括号中的数字表示了由 EVI 和 GPP 分别计算出的物候指数之间的差异。譬如对于 SGS，PGS 和 EGS 来说，正数表示由 EVI 计算出的物候日期要晚于由 GPP 计算出的日期，负数则表示由 EVI 计算出的物候日期要早于由 GPP 计算出的日期。

* Number within the bracket represents the difference between the phenological metrics (date or length) calculated using EVI and GPP. Taking SGS-EVI and SGS-GPP for example, if it is a positive number, it means that SGS calculated using EVI delayed the SGS calculated using GPP, vice verse.

### 4.3.2 生长季不同阶段 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间关系的差异

在上述的分析中可以看到，虽然 MODIS EVI 和通量塔 GPP 在北部湿润萨瓦纳站点的相关性非常好，但是到了南部干旱萨瓦纳地区 MODIS EVI 所反映的植被生长以及物候期则出现了较大的不确定性。通过对 EVI 和 GPP 数据的分析发现，在利用 EVI 提取 Ti Tree 站点植被物候信息时的不确定性主要由 EVI 和 GPP 在生长季后半段（从生长季峰值到生长季结束）时的“滞后效应”（hysteresis effect）导致。为了方便说明，以下将生长季前半段简称为 green-up 阶段，将生长季后半段简称为 brown-down 阶段。

从图 4.2 上可以看到，在 Howard Springs 站点，MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间的关系无论是在 green-up 阶段还是在 brown-down 阶段都呈现出了较强的线性关系，且拟合得到的直线斜率非常接近（图 4.2A）。而在 Daly River 站点，EVI 和 GPP 在 green-up 和 brown-down 阶段关系的差异有所增加，虽然仍然呈现出线性关系，但是斜率出现了较大的差异（图 4.2B）。

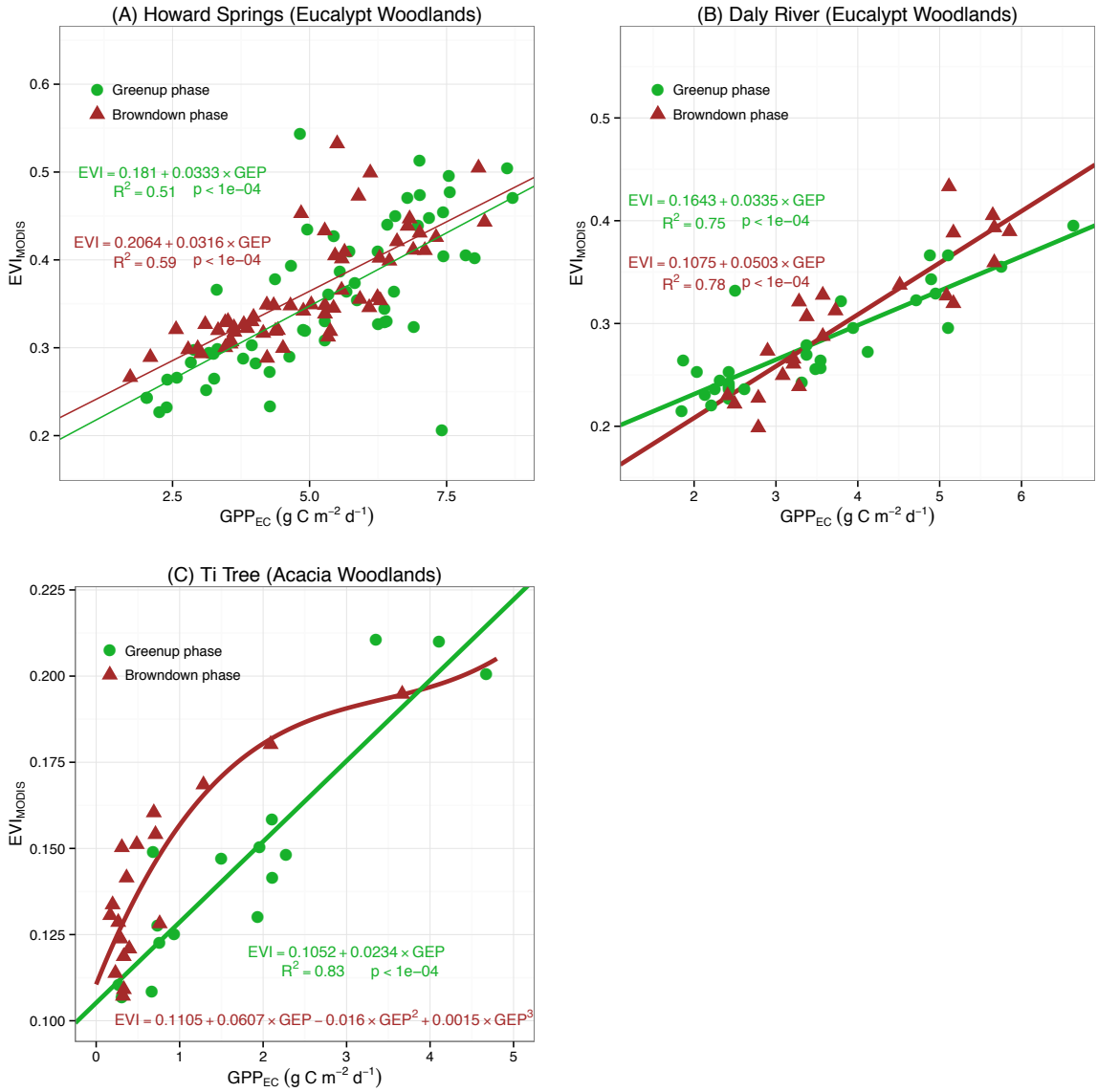


图 4.2 16 天分辨率通量塔测量 GPP（$GPP_{EC}$）和 MODIS EVI（$EVI_{MODIS}$）在 green-up 阶段和 brown-down 阶段之间关系的比较。（A）Howard Springs （桉树林地）；（B）Daly River（桉树林地）；（C）Ti Tree（合金欢树林地）。Green-up 阶段定义为从生长季开始（SGS）到生长季峰值（PGS）这段时间，也就是生长季的前半段。而 Brown-down 阶段定义为从生长季峰值（PGS）到生 长季结束（EGS）这段时间，也就是生长季的后半段。从图上可以看到，EVI 和 GPP 之间的“滞后效应”（hysteresis effect）在 Ti Tree 站点最为显著。在 green-up 阶段，EVI 和 GPP 之间为线性关系，但是到了 brown-down 阶段，EVI 和 GPP 之间的关系呈现出了明显的非线性，而这正是导致遥感反演生长季结束时间严重晚于从通量塔 GPP 中提取出的生长季结束时间的主要原因。

Figure 4.2 Scatter plot between 16-day aggregated flux tower GPP and MODIS 16-day EVI for three savanna sites. (A) Howard Springs (Eucalypt woodlands); (B) Daly River (Eucalypt woodlands) and (C) Ti Tree (Acacia woodlands). Seasonal hysteresis effect in the relationship between EVI and GPP was found maximum at Ti Tree site, while the greenup phase showed near-linear relationship, but browndown phase showed enhanced non-linearity. Greenup phase was defined as the period from season start (SGS) to season peak (PGS), while browndown phase was defined as the period from PGS to season end (EGS).

MODIS EVI 和通量塔 GPP 在 green-up 和 brown-down 两个阶段的差异在 NATT 研究区南部干旱萨瓦纳站点 Ti Tree 非常明显，从图 4.2C 上可以很清楚的看到在 brown-down 阶段 EVI 和 GPP 之间的关系呈现出较强的非线性，而这正是造成由 MODIS EVI 提取出的生长季结束时间和由通量 GPP 提取出的生长季结束时间在 Ti Tree 出现较大差异的原因。

## 4.4 讨 论

本章研究将由 MODIS EVI 和地面通量塔测量 GPP 所分别反映出的植被生长季节性和物候信息，在 NATT 研究区代表不同降水梯度和萨瓦纳植被类型的三个站点上进行了比较。通过分析发现，MODIS EVI 作为一个基于光谱反射率的“绿度”指数（greenness index），其和通量塔测量得到的生态系统总初级生产力（GPP）之间存在较强的相关性，包括在湿润萨瓦纳地区（Howard Springs, Daly River）以及干旱萨瓦纳地区（Ti Tree）。16 天时间分辨率的 MODIS EVI 和通量塔 GPP 在 Howard Springs，Daly River 和 Ti Tree 三个站点上的相关系数分别为 0.83，0.90 和 0.83（$p < 0.001$）。

在这几个站点中，最有趣的是位于 NATT 研究区 1100 公里生态降水样带最南端的干旱萨瓦纳站点 Ti Tree（合金欢树林地）。这个通量站的观测始于 2010 年 9 月份，使得我们有可能对该站点植被生长受 2010-2011 拉尼娜（La Nina）极端湿润年的影响进行观测和研究。从 2010 年 7 月份到 2011 年 6 月份间（一个水文年），Ti Tree 站点的降水量达到了 940 毫米，是该站点从 2010 到 2012 年间的年平均降水量（442 毫米）的两倍以上，并且达到了 1981-2011 年间年平均降水量（318 毫米）的三倍。通量塔观测到该站点在 2010-2011 年的 GPP 最大值为 4.67 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，超过了北部湿润萨瓦纳站点 Howard Springs（平均年降水量 1722 毫米）观测到的最大 GPP（8.7 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）的一半以上，说明了澳大利亚大陆内陆干旱地区的合金欢林地在降水充沛年份所具有的生产力潜力。且更为重要的是，该站点在 2010-2011 年度植被生产力的巨大增加分别得到了 MODIS 卫星传感器和地面通量塔两种独立观测数据源的共同确认。

然而，分析发现 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间的关系在生长季开始阶段（green-up phase）和结束阶段（brown-down phase）存在一定的差异。尤其是在南部干旱萨瓦纳地区，MODIS EVI 和通量塔 GPP 在 brown-down 阶段出现了明显的“滞后效应”，亦即 EVI 的下降要晚于 GPP 的下降。类似的“滞后效应”（hysteresis effect）在其它一些植被类型也曾经被观察到（Huemmrich et al., 2005; Jenkins et al., 2007），而究其原因可能是因为在旱季来临之后由于土壤水分的减少，植被通过主动关闭气孔来降低水分消耗，相应的造成细胞间 $CO_2$ 浓度的降低以及 GPP 的减少。而与气孔调节是一个较快的过程来说，植物对叶面积的调整以及叶片中叶绿素的分解则是相对较慢的过程（EVI 反映的正是叶面积指数以及叶绿素含量的变化）。

Hanna 等(2002)进而建议将植被的光吸收能力（light-absorption capacity）区分为

有效光合部分（photosynthetically active vegetation，PAV）和无效光合部分（non-photosynthetically active vegetation，NPV），因为只有 PAV 吸收的光才被用于光合作用，而 NPV（包括植物的茎、枯叶和细胞间组织）吸收的光则不参与光合作用。因此 EVI 和 GPP 在 brown-down 阶段的差异可能是因为在这一阶段植物 NPV 累积量的增加（Asner et al., 1998）。基于此差异，Xiao 等（2004）发展出了一种专门使用 PAV 部分 fPAR（$fPAR_{PAV}$）的植被生产力模型，而结果显示通过对植被进行 PAV 和 NPV 的区分，能够增加使用遥感观测对通量塔 GPP 的模拟精度。

以上分析说明，在热带萨瓦纳地区，尤其是干旱萨瓦纳地区，从 MODIS EVI 中准确的提取生长季结束时间非常具有挑战性。因为萨瓦纳植被至少包括冠层树木和林下层草地两部分，草地的绿叶在生长季结束阶段的褪色是一个缓慢的过程，在这个过程中同时伴随着干物质的积累，而这一部分干物质虽然吸收少量的太阳光，但是却并不用于光合作用。而常绿树种虽然在旱季和雨季保持相对完整的叶面积，但是其光吸收能力应该也会有差异，因为地面的观测证实这些常绿树种（譬如 *Eucalyptus*）在旱季的光合能力由于受到高温和水分的双重胁迫会相较雨季降低许多（O'Grady et al., 2009）。

总的来说，本章研究说明在热带萨瓦纳地区 MODIS EVI 反映出的植被生长和物候期基本反映出了地面植被的真实生长状况。接下来的研究可以从植物生理和遥感两两方面入手，重点关注导致 EVI 和 GPP 在生长季结束阶段产生滞后现象的原因，以提高遥感反演萨瓦纳植被物候指数的可靠性。

## 4.5 结　论

通过在 NATT 研究区三个热带萨瓦纳站点上的分析发现，MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间存在较好的相关性。MODIS EVI 提取出的植被物候期信息在北部湿润萨瓦纳地区误差较小，而在南部干旱萨瓦纳地区则不确定性增加。进一步分析发现导致不确定性在干旱萨瓦纳地区增加的原因是 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间在生长季结束阶段所出现的"滞后效应"（hysteresis effect），亦即 GPP 的下降要早于 EVI 的下降。而造成这种"滞后效应"的原因是因为植被在雨季结束-旱季开始阶段由于水分亏缺压力所进行的气孔调节和叶面积调节速度之间的差异，以及生长季结束阶段非光合有效植被的增加。本章研究说明，将中等分辨率的遥感数据（MODIS）和站点尺度的涡度相关通量观测数据结合，可以在不同尺度上更好的研究热带萨瓦纳植被物候和生态系统功能。

# 第五章 利用累积降水模拟萨瓦纳植被生长季开始时间


## 摘要

本章首先从长时间遥感观测资料中提取出了整个 NATT 研究区多年植被生长季开始的时间，并结合插值格网逐日降水数据（2000-2011 年）计算出了区域每一个像元上植被生长季开始所需累积降水量。之后使用 2011-2012 年的逐日降水资料基于累积降水模型模拟了区域植被生长季开始的时间，并和遥感观测结果进行了比较。研究发现，NATT 研究区不同萨瓦纳植被生长季开始所需累积降水量的空间差异非常大。北部湿润萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水量较小，通常在 25 毫米以内。而南部干旱和半干旱萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水量较大，部分地区能够达到 50 毫米以上。研究同时发现，不同萨瓦纳植被类型生长季开始所需累积降水量的大小与年平均降水量之间呈现显著的负相关（$R = -0.7$, $p < 0.05$），且预测误差和植被类型降水的年际变率（coefficient of variance）呈现出显著的正相关（$R = 0.96$, $p < 0.0001$）。误差分析显示，利用累积降水模型模拟 2011-2012 年生长季开始时间与遥感观测到的生长季开始时间之间的差值在研究区 70%的像元上均小于 30 天，且其中大约 56%的地区误差在 15 天以内。但是同时发现，累积降水模型在南部干旱萨瓦纳地区误差较高，说明该方法在降水变率较大的干旱和半干旱萨瓦纳地区存在较大的改进空间。



## 关键字

热带萨瓦纳、植被物候、累积降水、模拟、生长季开始时间


## 5.1 引 言

植被生长发育和环境要素之间存在着密切联系，生长季开始和结束的时间通常受到温度、水分和日照时间等要素的调控（Wang et al., 2003; Chuine & Cour, 1999; Archibald et al., 2007）。在热带萨瓦纳地区，植被生长主要受到水分的调控（Scholes et al., 1997）。而以往的研究发现水分对萨瓦纳植被生长的驱动存在一个“累积效应”（Wang et al., 2003; Davenport & Nicholson, 1993），类似于温带地区植被和温度之间存在的“积温效应”（White et al., 1997）。譬如，Richard & Poccard (1998)在非洲南部萨瓦纳地区的研究发现，遥感观测到的植被指数 NDVI 平均值与之前几个月的降水平均值之间存在着较强的相关性。在南非萨瓦纳，Archibald 等（2007）利用 AVHRR 和 MODIS 观测数据，与地面观测结合所发展的物候模型使用日照长度作为变量能够预测 86%的树木生长季开始的日期，加入土壤水分变量之后对 73%的林下草生长季开

始时间也可以进行预测，预测精度大约在一个月之内。

在降水年内季节性非常强的萨瓦纳地区，Fuller & Prince (1996)的研究发现遥感植被指数和降水时间序列之间存在较好的相关性。在南非的 Kruger 国家公园（萨瓦纳），Higgins et al. (2011)发现树木的展叶期通常在雨季来临之前，而林下草的生长则需要等到雨季开始之后。这主要是因为树木根系较深，可以利用储存在深层土壤中的水分来满足生长需要，而林下草种子的萌发则必须要有足够的土壤水分作为支持。White 等(1997)发展了一种利用累积降水来预测植被生长季开始时间的模型，该模型首先计算生长季开始之前的累积降水并设定一个阈值，当累积降水大于该阈值之后则判定生长季开始。Zhang 等(2005)发现使用累积降水量模型能够对非洲萨瓦纳地区由遥感反演得到的植被生长季开始时间进行非常好的模拟。

本章研究将主要使用本次学位论文中发展出的基于奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis）的遥感物候反演方法，首先提取研究区内主要站点上的植被生长季开始时间。在遥感反演得到的物候信息基础上，在站点尺度上分析植被生长季的开始时间与累积降水量之间的关系，以检验使用累积降水是否能够对萨瓦纳的植被物候进行一定的模拟和预测。在站点尺度上的分析结束以后，将遥感物候反演方法应用到澳洲北部的湿润和干旱萨瓦纳地区，以提取研究区从 2000 年到 2012 年间逐年逐像元植被生长季开始时间，并结合澳洲气象局提供的插值格网降水数据来分析区域尺度上不同地区植被生长季开始所需累积降水量的大小。最后用 2011-2012 年的逐日降水数据使用累积降水模型模拟区域上植被生长季开始时间，并和遥感观测结果进行比较。

本章研究的主要目标有：

1) 在 NATT 地区的主要站点上研究萨瓦纳植被生长季开始时间与累积降水之间的关系；

2) 在区域尺度上结合遥感反演植被生长季开始时间和插值格网降水数据来计算每一个像元上植被生长季开始所需累积降水量的大小；

3) 探索利用气象资料在区域尺度上对植被生长季开始时间进行模拟的方法，并通过与遥感观测结果进行比较以确定累积降水模型在不同萨瓦纳地区的误差大小。

## 5.2 数据和方法

### 5.2.1 遥感数据

本章研究主要用到了 MODIS 植被指数产品。在站点尺度上使用 500 米分辨率 MOD09A1 数据，对 MOD09A1 数据的介绍及预处理请参见第三章 3.2.2 小节。在区域尺度上使用了较低分辨率的 MOD13C1 产品，其空间分辨率为 0.05°，时间分辨率为 16 天。共从美国地质调查局（USGS）网站（http://e4ftl01.cr.usgs.gov）上下载了十三年（2000.02.18 - 2013.03.22）共 302 景的 MOD13C1 数据产品。对 MOD13C1 数据

的前期预处理包括：

- 格式转换：原始影像格式为 HDF-EOS（Hierarchical Data Format - Earth Observing System），为了方便后期计算，统一将格式转换为更为易用的 GeoTIFF 格式；
- 投影转换：原始数据的投影为正弦投影（Sinusoidal projection），在后期处理中转换为地理坐标投影（WGS84, Lat/Long）；
- 影像切割：MOD13C1 数据的覆盖范围为全球，因此原始数据被切割到 NATT 研究区的空间范围（12°S - 23°S, 128°E - 138°E）；
- 质量控制：虽然 MODIS 植被指数产品在发布之前已经经过了大气和辐射校正，但是由于云层和气溶胶的影响，在使用之前仍然需要通过随 MOD13C1 产品一同发布的质量控制标示（Quality Assurance Flags）来过滤掉这些质量较低的观测数据。

为了提取植被物候信息，使用了增强型植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）。EVI 的计算公式请参见第三章第二小节 3.2.1。

### 5.2.2 降水插值数据

为了计算区域上逐像元植被生长季开始所需累积降水量大小，本论文使用了由澳大利亚气象局（Australian Bureau of Meteorology）国家气候中心（National Climate Centre）提供的逐日降水数据（Daily Rain Gauge Precipitation - Gridded, Australia coverage, http://www.auscover.org.au）（Jones et al., 2009）。该数据从澳大利亚全国数千个地面气象站点的长期观通过数学测插值得到，空间分辨率为五公里（Jones et al., 2009）。交叉验证（cross-validation）结果显示该数据的均方根误差（RMSE）为 3.1 毫米，而绝对误差（mean absolute error）为 0.9 毫米。降水数据的插值方法请参见 Jones et al. (2009)。

### 5.2.3 植被类型数据

为了研究植被生长季开始所需累积降水在不同萨瓦纳植被类型之间的差异，采用了由澳大利亚国家植被信息系统（National Vegetation Information System, NVIS）提供的主要植被类型组数据（Major Vegetation Groups, MVGs）（NVIS, 2011）。MVG 数据根据植被结构（冠层高度和盖度）、生长型和植物区系等对澳大利亚的植被进行了详细分类（NVIS, 2011）。为了和气象数据以及 MODIS 数据进行比较，原始 100 米分辨率的植被类型数据被重采样到 5 公里分辨率。NATT 研究区共有九种主要的植被类型，根据每种植被类型所占的面积依次为：圆丘草地（Hummock grasslands，28.75%），桉树林地（Eucalypt woodlands，20.79%），桉树开阔林地（14.48%），热带桉树林地（8.07%），丛生草地（Tussock grasslands，7.57%），桉树疏林（Eucalypt open forests，4.21%），合金欢灌木林（*Acacia* shrublands，2.89%），合金欢开阔林地（*Acacia* open woodlands，2.81%），合金欢森林和林地（*Acacia* forests and woodlands，2.04%）。

### 5.2.4 遥感物候提取方法

本章采用了本次学位论文中发展的基于奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis, SSA）的遥感物候反演方法。对该方法的详细介绍请参见第三章 3.2.3 小节。本章将基于奇异波谱分析的物候提取方法应用到整个 138 万平方公里的 NATT 研究区，提取从2000年到2013年间逐年逐像元的生长季开始时间（Start of Greening Season, SGS）。

### 5.2.5 判定旱季的时间范围

在计算累积降水量之前，需要首先判定旱季的时间范围。虽然旱季在概念上很容易理解，亦即降水量非常少或完全没有降水的时间段。但是如何在技术上确定每一个站点或每一个像元在每一年的旱季时间范围，需要使用客观统一的判定标准。

譬如 Zhang 等(2005)对旱季的定义是：若某一个 30 天大小的时间窗口内日平均降水量小于 5 毫米，且 30 天内降水总天数少于 4 天，则认为该 30 天时间窗口为旱季，反之则为雨季。而 Eamus 等(2001)则将旱季更简单的定义为月降水量小于 25 毫米的时间段。在本论文中，考虑到 Zhang 等(2005)的方法更为灵活，且相对来说更为客观（同时基于降水量和降水天数），因此本次研究采用 Zhang 等(2005)对旱季的定义方法。图 5.1 显示了使用该方法所判定出的 NATT 几个站点在不同年份的旱季时间范围。从图上可以看到该方法基本上准确的识别出了旱季的时间范围。

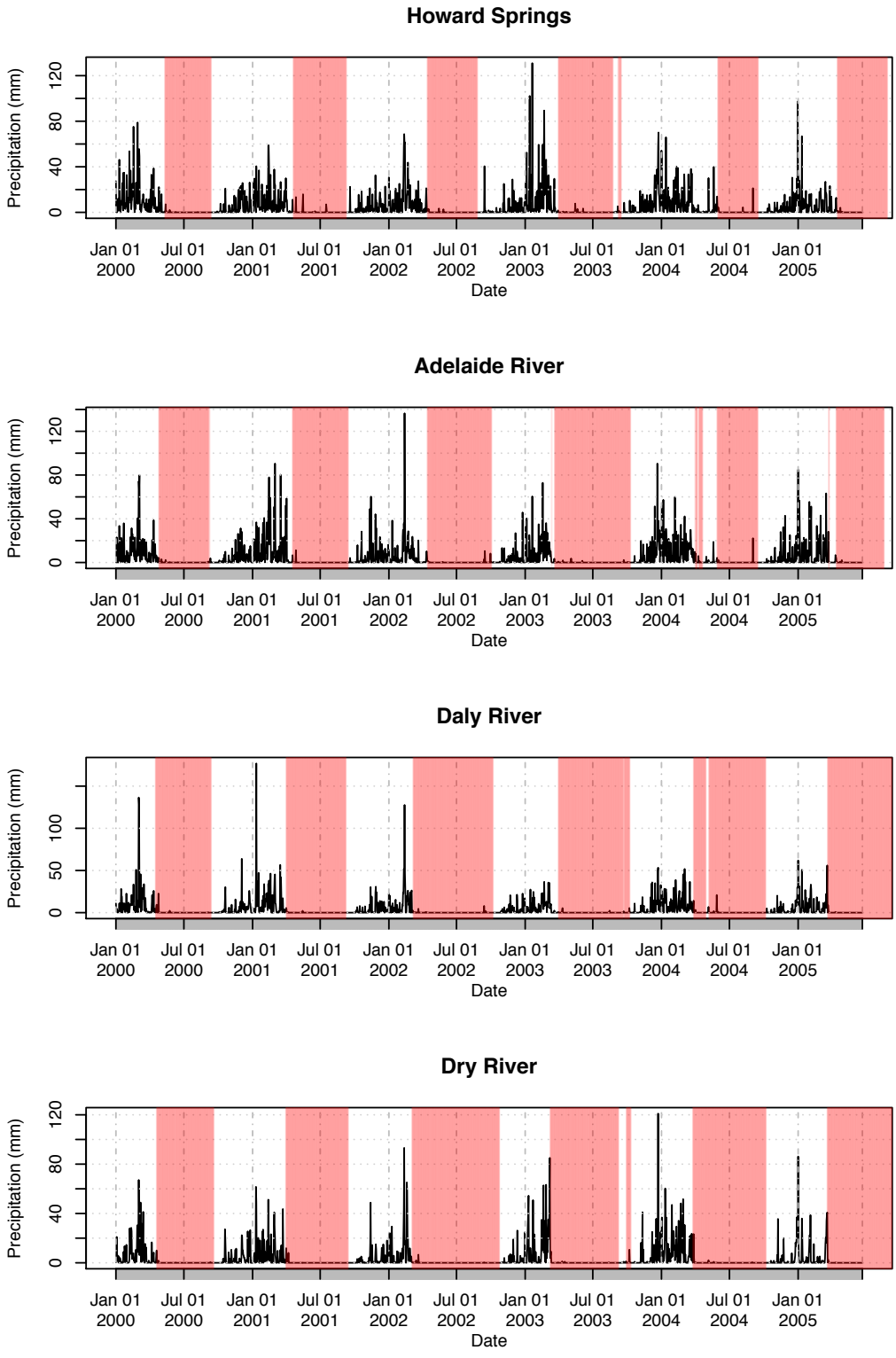


图 5.1 NATT 研究区四个萨瓦纳站点的日降水时间序列以及所判定出的旱季时间范围。图上红色阴影区域为旱季时间范围。从图上可以看到旱季（或者雨季）的时间范围在各个站点以及不同年份之间的变化。旱季的时间长度从 NATT 北部地区（Howard Springs）向南部地区（Dry River）有逐渐增加的趋势，相应地雨季时间逐渐缩短。

Figure 5.1 Time series of daily rainfall times series for NATT sites, 2000-2005. The red shaded areas indicate

the extent of dry season as defined based on rainfall amount. The dynamic range of dry season can be seen on the graph, with shorter dry season at northern NATT sites (e.g., Howard Springs), and longer dry season at southern NATT sites (e.g., Dry River).

### 5.2.6 基于累积降水来预测萨瓦纳植被生长季开始的时间

累积降水模型假设在植被生长受水分驱动的地区，譬如热带萨瓦纳，生长季的开始需要累积一定量的降水以满足林下层草地种子萌发所需的土壤水分。要应用累积降水模型，首先需要确定旱季的时间范围，然后从旱季开始日期以日被步进计算累积降水大小。同时需要计算每个站点或区域上每一个像元植被生长季开始所需累积降水量阈值，当累积降水达到该阈值时，则判断植被生长季开始。本次研究对每一站点及研究区每一像元都分别计算了从 5 毫米到 120 毫米，以 5 毫米为步进的 24 个累积降水阈值大小（5 毫米, 10 毫米, …, 120 毫米），然后通过与遥感反演得到的植被生长季开始时间进行比较以确定每一站点植被生长季开始所需累积降水量。

### 5.2.7 在区域尺度应用累积降水模型

在站点尺度上对累积降水模型的可行性进行检验之后，接下来在整个 NATT 研究区（138 万平方公里）应用累积降水模型来模拟植被生长季开始的时间。模型在区域尺度上的应用基本思路和站点上的应用一致，亦即根据插值降水数据和遥感反演植被物候数据，计算区域上每个像元植被生长季开始所需的累积降水量大小。

NATT 地区共有 12 年的插值格网降水数据（2000 年-2012 年），首先使用 2000 年到 2011 年共 11 年的数据计算逐像元植被生长季开始所需累积降水量的大小。然后用 2011-2012 年的数据对该年植被生长季开始时间进行独立的预测，并通过和遥感观测生长季开始的时间进行比较以判定模型的预测效果。

由于本研究的主要目的是检验模型在区域上的适用性，为了减少计算量，原始的 0.05°分辨率降水数据和 0.05°分辨率 MODIS EVI 数据分别被重采样为 0.25°分辨率。

## 5.3 结　果

### 5.3.1 在站点尺度上基于累积降水量判定生长季开始时间

图 5.2 显示了 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上，使用不同累积降水阈值（5, 10, 15,…, 120 毫米）判定生长季开始时间和遥感观测生长季开始时间之间的误差（RMSE）。

首先可以看到不同站点植被生长季开始所需累计降水量都不相同（图 5.2；表 5.1）。对于北部 NATT 地区几个比较湿润的萨瓦纳站点，包括 Howard Springs（桉树林地），Adelaide River （热带桉树林地）和 Daly River（桉树林地），植被生长季开始所需累积降水量均为 5 毫米（图 5.2A，B，C）。而往南到了干旱萨瓦纳地区的 Dry River（桉树开阔林地），生长季开始所需累积降水量增加到了 25 毫米（图 5.2D）。六个 NATT 站点中，生长季开始所需累积降水量最高的站点为 NATT 最南端干旱地区的 Ti Tree

（合金欢树林地），所需累积降水量达到了 65 毫米（图 5.2F）。在这几个站点中，Sturt Plains（丛生草地）是一个例外，该站点虽然处于较为干旱的 NATT 中部地区，但是生长季开始所需累积降水量仅为 5 毫米（图 5.2E）。

表 5.1 NATT 研究区六个萨瓦纳站点基于不同累积降水阈值（5, 10, 15,…,120mm）判定植被生长季开始时间与遥感反演植被生长季开始时间之间的误差分析, 2000-2012。表中的下划线标注了每个站点植被生长季开始所需的最佳累积降水量大小（亦即误差 RMSE 最小）。

Table 5.1 Error analysis of the results using cumulative rainfall for predicting start of greening season (SGS) based on absolute threshold for six NATT sites. RMSE = Root Mean Squared Error.

| 阈值大小（mm） | 均方根误差 RMSE (day) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Howard Springs** | **Adelaide River** | **Daly River** | **Dry River** | **Sturt Plains** | **Ti Tree** |
| **5** | **17.5** | **18.15** | **30.55** | 38.35 | **26.33** | 55.86 |
| **10** | 21.34 | 22.63 | 35.13 | 34.92 | 30.01 | 46.27 |
| **15** | 22.68 | 24.64 | 41.09 | 20.61 | 28.36 | 35.43 |
| **20** | 23.76 | 25.87 | 44.87 | 18.96 | 29.32 | 35.89 |
| **25** | 24.78 | 28.90 | 46.75 | **16.97** | 33.83 | 33.98 |
| **30** | 27.62 | 30.27 | 47.78 | 18.93 | 33.99 | 33.28 |
| **35** | 29.68 | 32.35 | 49.30 | 19.60 | 33.88 | 31.36 |
| **40** | 32.48 | 35.12 | 52.66 | 18.84 | 34.62 | 31.72 |
| **50** | 34.86 | 37.58 | 55.95 | 18.75 | 38.01 | 32.14 |
| **60** | 38.82 | 39.87 | 59.10 | 20.17 | 40.01 | **30.30** |
| **70** | 41.82 | 42.71 | 62.24 | 21.08 | 43.25 | 31.44 |
| **80** | 45.72 | 47.99 | 63.93 | 21.61 | 45.45 | 32.47 |
| **90** | 49.09 | 50.41 | 66.19 | 26.18 | 47.42 | 34.38 |
| **100** | 51.49 | 52.08 | 69.14 | 29.99 | 48.99 | 33.88 |
| **120** | 55.18 | 57.04 | 73.93 | 34.82 | 51.13 | 36.32 |

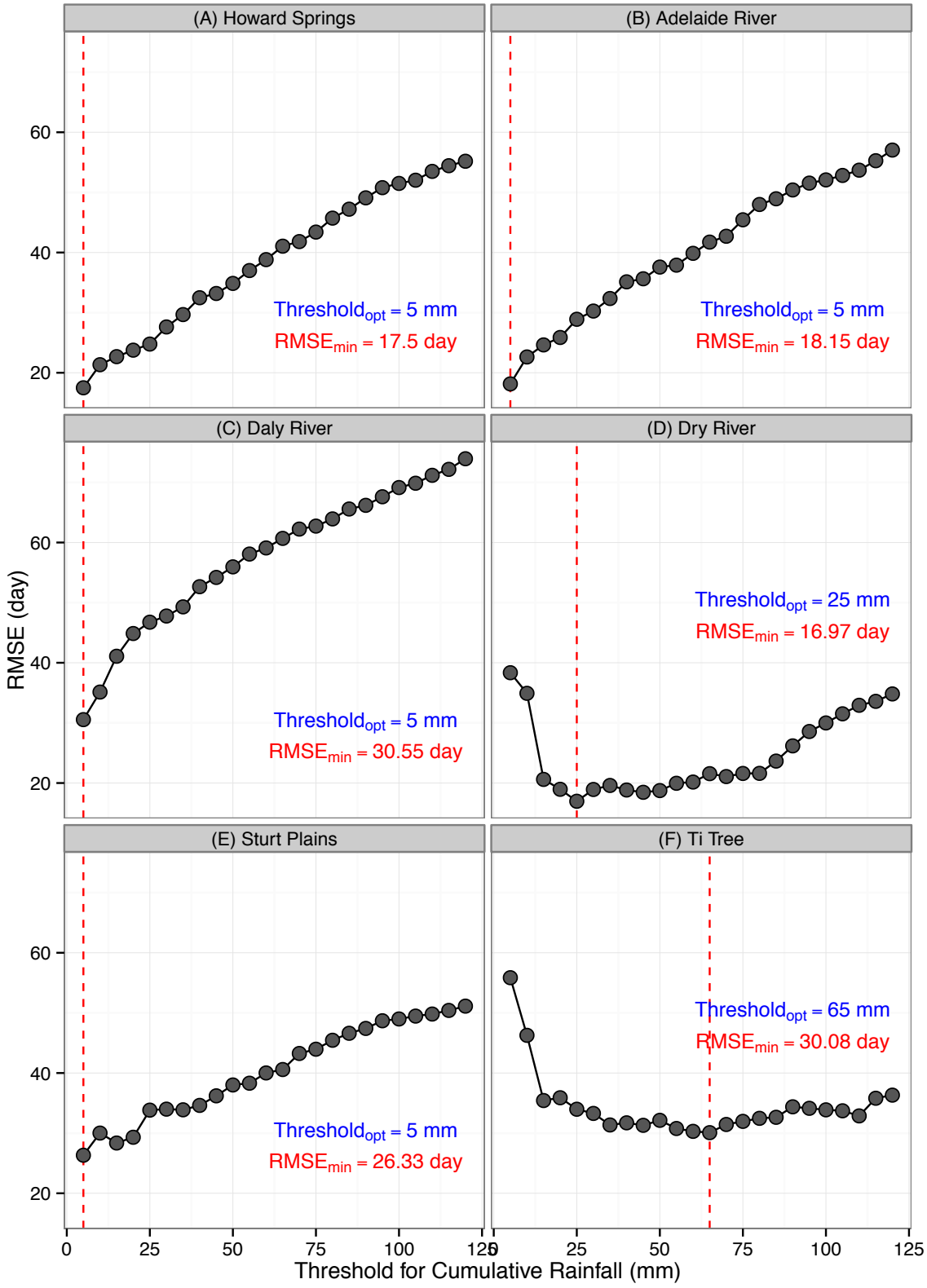


图 5.2 NATT 研究区六个萨瓦纳站点基于累积降水阈值预测出的植被生长季开始时间和遥感观测生长季开始之间的误差大小（RMSE）和累积降水阈值大小之间的关系。图上同时标注出了对于每个站点在判定生长季开始时间时最优（误差最小）的累积降水阈值大小（Threshold$_{opt}$, mm）以及最小误差大小（RMSE$_{min}$, day）。

Figure 5.2 The RMSE between predicted timing of start of greening season (SGS) based on cumulative rainfall threshold and remote sensing observed SGS. The optimum cumulative rainfall threshold (Thresholdopt, mm) with minimum RMSE (RMSEmin, day) were also labelled on each panel.

从以上的分析中可以看到，在 NATT 研究区的六个站点中，除了 Sturt Plains（丛生草地）站点之外，其它几个站点植被生长季开始所需累积降水大小（$Threshold_{opt}$）有从北到南逐渐增加的趋势。于是将各站点的年平均降水量（Mean annual precipitation，MAP）和各站点植被生长季开始所需累积降水大小（$Threshold_{opt}$）之间的关系进行分析。结果显示，$Threshold_{opt}$ 和 MAP 之间存在着边缘显著（marginal significant）的负相关（R = -0.76， $p = 0.06$）（图 5.3A），亦即随站点平均年降水量的增加，该站点植被生长季开始所需累计降水量越小。而 RMSE 则随着站点年降水变异系数（$CV_{PPT}$）的增加而增加（R = 0.68，$p = 0.10$）。

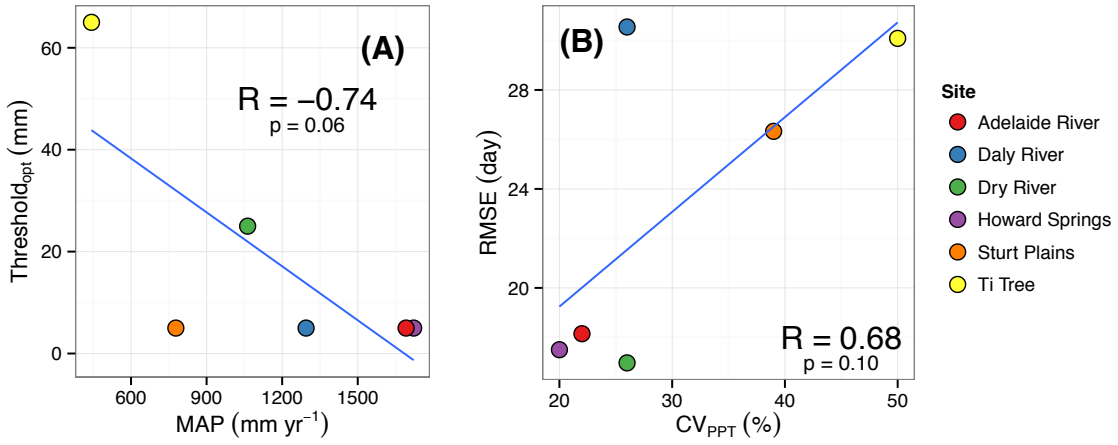


图 5.3（A）NATT 研究区六个萨瓦纳站点植被生长季开始所需累积降水阈值大小（$Threshold_{opt}$，mm）与站点年平均降水量（MAP，mm）之间的关系；（B）模拟误差（$RMSE_{min}$）和站点年降水变异系数（$CV_{PPT}$，%）之间的关系。

Figure 5.3 (A) Scatter plot between the optimum cumulative rainfall threshold for predicting the start of greening season (SGS) ($Threshold_{opt}$, mm) and site-level mean annual precipitation (mm, yr$^{-1}$); (B) Scatter plot between the RMSE of prediction for SGS based on cumulative rainfall and site-level coefficient of annual precipitation ($CV_{PPT}$, %).

在使用累积降水模型对 NATT 六个站点的植被生长季开始时间进行模拟时，三个站点的误差均在 20 天之内，而其它三个站点的误差则小于 31 天。这样的预测精度与 Archibald 等人在非洲萨瓦纳地区的研究所得到的结果具有一定的可比性。Archibald 等（2007）发现，使用日照长度和土壤水分作为模型变量，能够对树木和草地生长季开始时间进行模拟，模拟精度大约在一个月以内。考虑到热带萨瓦纳其植被结构的复杂性和降水量较高的年际变率，这样的模拟结果总体上来说是可以接受的。

### 5.3.2 计算区域尺度上逐像元植被生长季开始所需累积降水量大小

在对整个 NATT 研究区应用累积降水模型以计算植被生长季开始时间时，需要首先计算每个像元植被生长季开始所需累积降水量的大小。本次研究共有 2000-2012 年 12 年的插值降水数据。该数据被分为两部分，其中 2000-2011 年 11 年的数据用来计算区域上每一个像元内植被生长季开始所需累积降水。而 2011-2012 年的降水数据用来独立的检验累积降水模型的模拟效果。

图 5.4 显示用 2000 年到 2011 年的降水数据和遥感物候数据计算得到的 NATT 研究区每一个像元上植被生长季开始所需累积降水量的大小，及相应使用该阈值判定生长季开始时间和遥感观测生长季开始时间之间的误差。从图上可以看到，整个 NATT 研究区植被生长季开始所需累积降水呈现出明显的南北差异（图 5.4A）。北部萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水量一般在 25 毫米以内，然后向南逐渐增加，在南部干旱萨瓦纳地区达到了 50 毫米以上（图 5.4A）。与此同时，利用累积降水所判定的生长季开始时间与遥感反演得到的生长季开始时间之间的误差却呈现出从北到南增加的趋势（图 5.4B）。北部湿润地区的误差值通常在 20 天以内，之后在 17°S 以南误差显著增加到 30 天以上，直至在 NATT 最南部误差达到最大值（图 5.4B）。

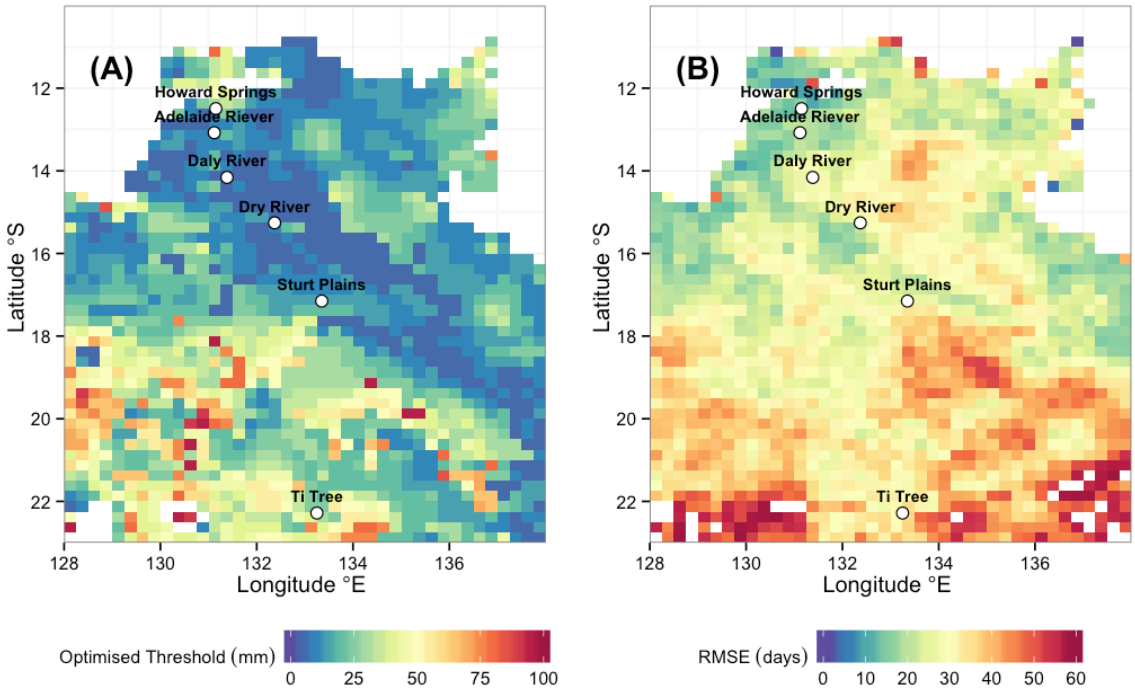


图 5.4 （A）NATT 研究区植被生长季开始所需累积降水量（Optimised threshold, mm）及（B）对应的误差值（RMSE, days）在空间上的变化。

Fig.5.4 Per-pixel optimised minimum cumulative rainfall requirement for start of greening season (SGS) and correspondent predictive error (RMSE) over the NATT study area, 2000-2011.

图 5.5A 显示了 NATT 研究区内不同植被类型生长季开始所需累积降水量的大小与植被类型年平均降水量大小之间的关系。从图 5.5A 可以看到，植被生长季开始所需累积降水量的大小与植被类型平均年降水之间存在显著的负相关（R = -0.7, $p$ < 0.05）。图 5.5B 显示了在 NATT 研究区的不同植被类型上，使用累积降水模拟生长季开始时间与遥感反演植被生长季开始时间之间的误差大小（RMSE）与植被类型降水年际变率（$CV_{PPT}$）之间的关系。从图上可以看到，生长季开始时间模拟误差的大小和降水的年际变率之间存在非常强的正相关（R = 0.96, $p$ < 0.0001）。图 5.5B 说明利用累计降水量模型来模拟萨瓦纳地区植被生长季开始时间的不确定性随降水年际变率的增加而增加。在 NATT 北部地区的植被类型（包括桉树森林和林地等）不确定性较小（RMSE < 25 天），而在 NATT 南部地区的植被类型（包括圆丘草地和合金欢树林地与灌木林等）不确定性显著增加（RMSE > 30 天）。

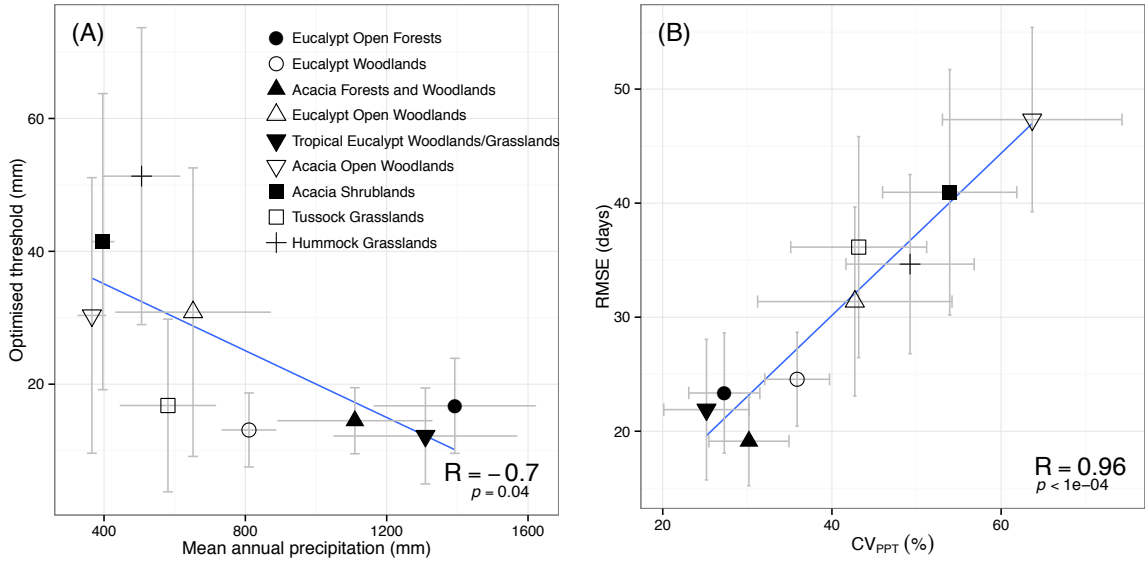


图 5.5 (A) NATT 地区不同植被类型生长季开始所需累积降水量大小和年平均降水量的关系；（B）利用累积降水判定生长季开始与遥感反演得到的生长季开始时间之间的误差大小和降水量的年际变率（Coefficient of variance, $CV_{PPT}$）之间的关系。

Fig.5.5 (A) Relationship between cumulative rainfall requirement for green-up and mean annual precipitation acros major vegetation groups in the NATT study area; (2) relationship between the predictive error (RMSE) using cumulative rainfall for predicting the date of start of green-up and coefficient of variances of the annual rainfall ($CV_{PPT}$, %)across major vegetation groups.

### 5.3.4 利用累积降水模型模拟 2011-2012 年区域尺度上植被生长季开始时间

图 5.6 显示了使用 2011-2012 年的降水数据，基于累积降水量模型计算得到的区域植被生长季开始时间，并和遥感观测到的植被生长季开始时间进行了对比。从图 5.6 可以看到遥感观测到的 NATT 北部地区的植被生长季开始时间较早，大约分布在九月至十一月之间，然后向南逐渐推迟，直到来年的一月至二月之间（图 5.6A）。相

比较，利用累积降水计算得到的植被生长季开始时间在北部 NATT 大约分布在在十月到十一月之间，虽然稍晚于遥感观测得到的生长季开始时间，但基本反映出了NATT 地区生长季开始时间北部较早、南部较晚的空间趋势（图 5.6B）。图 5.6C 显示了遥感观测得到的生长季开始时间和用累积降水计算得到的生长季开始时间之间的差值。可以看到用累积降水计算生长季开始的时间在北部 NATT 地区要晚于遥感观测得到的生长季开始时间，但是到了南部 NATT 地区，则通常要早于遥感观测到的生长季开始时间（图 5.6C）。

对于整个 NATT 研究区来说，遥感观测生长季开始时间和累积降水模拟生长季开始时间上的差值（亦即模拟误差）集中分布在一个月以内（图 5.6D）。对研究区所有像元的统计发现，大约 70%的像元上累积降水模拟模拟生长季开始时间和遥感观测生长季开始时间之间的绝对误差小于 30 天，而其中大约 56%的地区误差则在 15 天以内。同时可以看到，南部 NATT 地区的误差偏高，部分地区甚至达到了 30 天以上，因此该方法在南部干旱和半干旱萨瓦纳地区尚有比较大的改进空间。

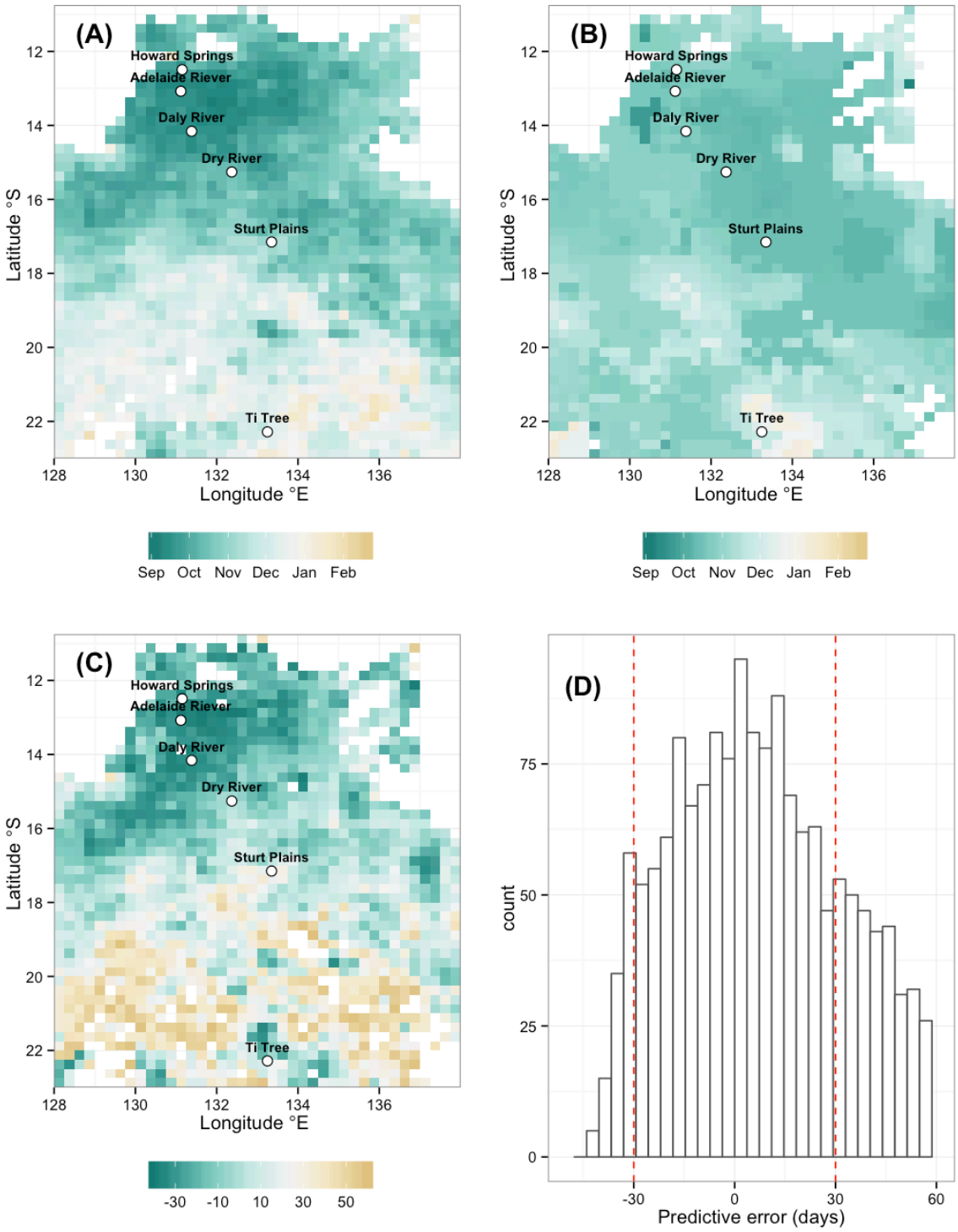


图 5.8 NATT 研究区遥感观测生长季开始时间和累积降水模型模拟生长季开始时间之间的比较，以 2011-2012 年为例。（A）从 MODIS EVI 植被指数反演得到的区域植被生长季开始时间；（B）利用气象降水资料计算得到的植被生长季开始时间；（C）遥感观测和累积降水模型计算得到的生长季开始时间的差值，负值表示遥感观测的生长季开始时间要比用累积降水模型计算得到的生长季开始时间要早，反之如果为正值则表示要晚；（D）直方图，表示遥感观测和累积降水模型计算结果之间差值的分布（区域所有像元）。

Figure 5.8 The regional comparison of the start of green-up date as monitored by remote sensing observations

and forecasted by meteorological rainfall data, 2011-2012. (A) Remote sensing (MODIS EVI) observed start of green-up date; (B) meteorological rainfall forecasted start of green-up date; (C) the differences between the date of start of green-up as observed by remote sensing and as forecasted by meteorological rainfall date. The negative value means that the remote sensing observed start of green-up leaded the meteorological rainfall forecasted start of green-up, vice versa; (D) The histogram display the distribution of the predictive errors over the NATT study area (totally 1644 0.25 degreen resolution pixels).

## 5.4 讨 论

本次研究探索了利用累积降水模型对萨瓦纳植被生长季开始时间进行模拟的可行性。研究发现北部 NATT 地区由桉树（*Eucalyptus*）建群的湿润萨瓦纳地区，植被生长季开始所需的累积降水量较小，通常在 30 毫米以内。这样的结果与地面观测得到的结果大约一致。譬如在澳大利亚北部萨瓦纳林下层的 *Sorghum*，其种子萌发需要一定的土壤水分支持，因此通常在第一场大于 15 毫米的降水之后（Andrew & Mott, 1983）。而地面观测发现 NATT 北部地区林下草开始生长的时间为十月份早些时候（Andrew & Mott, 1983），这与遥感观测到的植被生长季在 NATT 北部的开始时间大约一致。

但是到了 NATT 南部圆丘草地（hummock grasslands）以及由合金欢树建群的林地和灌木林（*Acacia* woodlands and shrublands），植被生长季开始所需的累积降水量显著增加，在很多南部 NATT 地区超过了 50 毫米。植被生长季开始所需累积降水在南部干旱萨瓦纳地区呈现明显增加的趋势，这可能是因为该地区气候非常干旱，且年内降水分布比较离散，当降水量较小时由于蒸发量较大无法在土壤中提供持续且充足的水分，因而需要更大的累积降水量以满足植被生长季开始所需。

相比较北部 NATT 地区夏季的雨季降水比较集中，南部 NATT 地区由于缺乏一个集中且稳定的雨季时间范围，因此其植被物候期的时间也变得更加不确定，这无疑增加了利用累积降水对南部干旱萨瓦纳地区植被物候进行模拟的难度。以往的研究发现，NATT 南部地区雨季开始时间和结束时间的年际变率相比较 NATT 北部地区显著增加（Lo et al., 2007）。譬如说雨季开始时间的年际标准差（standard deviation）在南部 NATT 地区可以达到 55 天以上（Lo et al., 2007），这些不仅对应了遥感反演植被生长季开始时间的年际变率在南部 NATT 的增加，同时也说明对南部干旱地区萨瓦纳植被物候进行准确模拟和预测的难度非常高。将来的研究可以探索如何使用气象要素对南部干旱萨瓦纳植被物候进行更准确的模拟。

## 5.5 结 论

本章研究发现，萨瓦纳植被在不同地区由于环境要素以及植被结构类型的差异，生长季开始所需的累计降水量的差异非常大。在北部湿润萨瓦纳地区，植被生长季开始所需累计降水量较小，一般在 25 毫米以内。而到了南部干旱和半干旱的萨瓦纳地区，植被生长季开始所需累积降水量增加到了 50 毫米以上。利用累积降水方法来模

拟 2011-2012 年生长季开始的时间，并与遥感观测结果进行比较，发现在北部 NATT 地区的模拟误差较小，通常在 20 天以内。模拟误差在 17°S 以南增加到 30 天以上，直至在 NATT 最南端误差达到最大值。在不同萨瓦纳植被类型上，植被生长季开始所需累积降水量的大小与植被类型年平均降水量之间存在显著的负相关（$R = -0.7$, $p < 0.05$）。同时模拟误差与降水的年际变率之间存在显著的正相关（$R = 0.96$, $p < 0.0001$），说明利用累积降水模型来模拟萨瓦纳地区植被生长季开始时间的不确定性随降水变率的增加而增加。

# 第六章 萨瓦纳植被物候的时空变化规律及与降水之间的关系


## 摘 要

本章研究使用基于奇异波谱分析的遥感物候反演方法，从十三年的 MODIS EVI 时间序列数据中提取了澳大利亚北部萨瓦纳研究区逐年逐像元的植被物候指数。在此基础上分析了萨瓦纳植被物候沿南北长约 1100 公里的北澳典型降水样带（NATT）上的时空变化规律。通过结合降水数据和植被类型数据，对降水和植被类型与萨瓦纳物候时空变异之间的关系进行了分析，并探讨了未来气候变化背景下不同萨瓦纳植被类型对降水模式改变的敏感性。

研究发现 NATT 地区植被物候随纬度（亦即降水梯度）的变化是非线性的，由于受不同气候类型控制在南北两部分呈现出截然不同的时空变异模式。在 NATT 北部较为湿润的萨瓦纳地区（12°S-17.7°S），植被生长主要受到间热带辐合带（Inter-Tropical Convergence Zone, ITCZ）带来的雨季降水的影响。林下层 $C_4$ 草地对雨季开始时间差异的响应非常明显，使得萨瓦纳植被物候在北部 NATT 呈现出较强的纬度变化趋势。植被生长季的开始时间和结束时间在研究区北部较早，然后向南逐渐推迟。在南部萨瓦纳地区（17.7°S 以南），随着降水变率的增加，植被物候的年际变率呈现出明显的增加趋势。南部干旱萨瓦纳植被的生长季长度较短，但却呈现出相当大的年际波动。在湿润年份干旱萨瓦纳植被的生长季长度能够超过北部湿润萨瓦纳植被的生长季长度。但是在极端干旱年份，干旱萨瓦纳地区植被的生长受到极大的抑制，因而没有表现出明显的季节性，亦即没有物候信息能够被检测出来。在整个 NATT 研究区上，降水量的年际变异系数（coefficient of variance）可以解释生长季长度年际变率中 80%以上的变异。而在研究区九个主要的植被类型中，由合金欢树建群的林地和灌木林，以及圆丘草地表现出了对降水变率最高的敏感性，说明这些植被类型受到未来气候变化影响的可能性更高。



## 关键字

萨瓦纳、植被物候、北澳热带样带、气候变化、MODIS、EVI、奇异波谱分析


## 6.1 引 言

萨瓦纳在热带和亚热带地区的湿润和干旱地区均有分布（Eamus et al., 2001; Frost et al., 1986）。萨瓦纳在气候上的主要特点是其非常显著的年内季节性和较高的年际变率，并且伴随频繁发生的火灾以及高强度的人类活动干扰，这些使得萨瓦纳成为全球变化最为剧烈的植被类型之一（Frost et al., 1986）。同时，由于明显的干-湿季差异，

使得萨瓦纳对于气候变化所导致的降水年内分布模式的改变非常敏感（Field et al.,2007）。

尽管萨瓦纳在全球变化中具有非常重要的作用，其对人类活动和气候变化也非常敏感， 但是对于其植被物候、生态系统功能和植被结构等方面认识尚不完善。尤其是在区域尺度上，对其植被物候所具有的空间分布模式、年际变异程度、与降水等环境要素之间的关系、以及对未来气候变化的敏感性等方面的认识尚不完善。这在很大程度上限制了我们对萨瓦纳这一全球重要生物群系的完整认识。

本章研究将使用遥感观测为主要技术手段，来研究萨瓦纳植被物候在南北跨度达1100 公里的北澳生态降水样带（NATT）上的时空变化规律。由全球地圈与生物圈计划（International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP）在上世纪 90 年代中期提出的 NATT 样带作为全球研究热带萨瓦纳的三个主要生态样带，包含了北部地区由桉树（*Eucalyptus*）建群的湿润萨瓦纳（mesic savannas），以及南部地区由合金欢树（*Acacia*）建群的干旱萨瓦纳（xeric savannas），以及部分草地和灌木林等（Walker et al., 1999）。

在 NATT 样带上已经进行过许多关于生物地理、土壤、生态生理、气象，以及陆面-大气交换等方面的研究（请参见 Hutley et al., 2011 的综述）。陆地样带（terrestrial transect）已经成为全球变化研究中的重要手段（Koch et al., 1995; Walker et al., 1999; de Beurs et al., 2005）。由于降水和其他环境要素沿样带在空间上的梯度分布，因此植被物候及其它生态系统功能在样带上的空间变化规律可以用来预测未来气候变化情境下植被可能发生的变化，亦即用空间替代时间（space as a surrogate of time）（Koch et al., 1995）。全球气候模式（Global Climate Models, GCMs）预测未来全球气候变率将会增加，同时极端气候事件（譬如干旱和极端降水等）的发生频率呈增加之势（Easterling et al., 2000; Seager et al., 2013），这些都有可能对萨瓦纳的物候和生态系统功能产生很大的影响。

本章的研究目标主要有三点：第一，利用遥感观测来研究萨瓦纳植被物候沿 1100 公里 NATT 降水样带上的空间变化规律：第二，研究萨瓦纳植被结构类型和降水模式对植被物候的影响；第三，分析植被物候从 2000 年到 2012 年之间的年际变化规律，并分析不同萨瓦纳植被类型对降水变率的敏感性。

## 6.2 数据和方法

### 6.2.1 遥感数据

本章研究主要用到了 MODIS 增强型植被指数（EVI）产品。由于主要关注整个区域尺度上的物候模式，因此使用了 MOD13C1 产品。对 MOD13C1 产品的介绍请参考第五章第二小节 5.2.1。

### 6.2.2 遥感物候提取方法

本章采用了本次学位论文中发展的基于奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis, SSA）的遥感物候反演方法。对该方法的详细介绍请参见第三章 3.2.3 小节。

本章将基于奇异波谱分析的物候提取方法应用到整个 138 万平方公里的 NATT 研究区，以提取从 2000 年到 2013 年间逐像元、逐年多个关键植被物候期信息，包括生长季开始时间（Start of Greening Season, SGS），生长季峰值时间（Peak of Greening Season, PGS），生长季结束时间（End of Greening Season, EGS）和生长季长度（Length of Greening Season, LGS）。

由于提取整个研究区物候指数的计算量较大，需要对 62 万个像元/水文年组合应用奇异波谱分解。因此为了提高计算效率，在程序编写的时候采用了多核心并行处理方式（parallel computation）。并行计算是指将多条指令在不同中央处理器（central processing unit, CPU）上同时进行运算的一种计算模式。本章研究采用 R 科学计算语言（R core team, 2013）中的 Snowfall 扩展（版本 1.84-4）（Knaus, 2010），将单线程程序改写为多核心并行计算模式，并在研究组的服务器上计算了整个研究区（138 万平方公里）逐像元十三年的物候指数。在优化了程序代码并采用并行计算之后，整个计算时间大大缩短，极大的提高了研究效率。。

### 6.2.3 统计方法

为了研究降水量和植被物候的年际变化，分别计算了标准变异（standardised anomaly）和变异系数（coefficient of variation, CV）两个统计指标。标准变异的计算方法如下：

$$STDA_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \tag{6.2}$$

式中 $STDA_i$ 为第 $i$ 年的标准变异，$x_i$ 为变量在第 $i$ 年的值，$\mu$ 为变量 $x$ 的平均值，$\sigma$ 为变量 $x$ 的标准差。

而变异系数的计算公式如下：

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu|} \times 100 \tag{6.3}$$

## 6.3 结　果

### 6.3.1 萨瓦纳植被物候的时空变化规律

图 6.1 显示了整个 NATT 研究区植被物候的空间变化和年际变化规律。为了分析降水量的变化对萨瓦纳植被物候空间模式的影响，从 2000 年到 2013 年中基于年降水量的标准变异选择了四个代表性年份，包括轻微干旱年份（2001-2002），极端干旱年份（2007-2008），以及两个极端湿润年份（2005-2006 和 2010-2011）。

从图上可以看到，几种植被关键物候期指数在研究区内存在非常大的空间变异（图 6.1B，C，D）。总的来说，生长季开始时间（SGS）、峰值时间（PGS）和结束时间（EGS）呈现出从北到南逐渐推迟的趋势（图 6.1B-D）。在北部湿润森林和林地，植被生长季开始的时间较早，大约集中在 9 月份和 10 月份之间，然后向南逐渐推迟到 11 月份至来年的 2 月份（图 6.1B）。而生长季峰值时间（PGS）和结束时间（EGS）的空间趋势和 SGS 类似，从在北部研究区的 1 月份和 6 月份分别逐渐推迟到南部的 6 月份和 12 月份（图 6.1C，D）。从图 6.1 上同时可以看到，降水量的变化对南部较为干旱的萨瓦纳地区的植被物候影响最大，而北部湿润地区的萨瓦纳植被物候则对降水量的年际变化不敏感。

相对来说，生长季长度（LGS）时空变化规律更复杂，特别是在南部干旱萨瓦纳地区（图 6.1E）。从图上可以看到，南部干旱萨瓦纳地区植被生长季的长度在降水量充沛的年份可以超过北部湿润萨瓦纳地区植被生长季的长度（图 6.1E）。但是到了降水量较少的年份，研究区南部植被的生长由于受到干旱的抑制而没有任何物候信息被提取出来（图 6.1E）。由此可见南部萨瓦纳植被的生长和物候对降水量的年际变化更敏感。

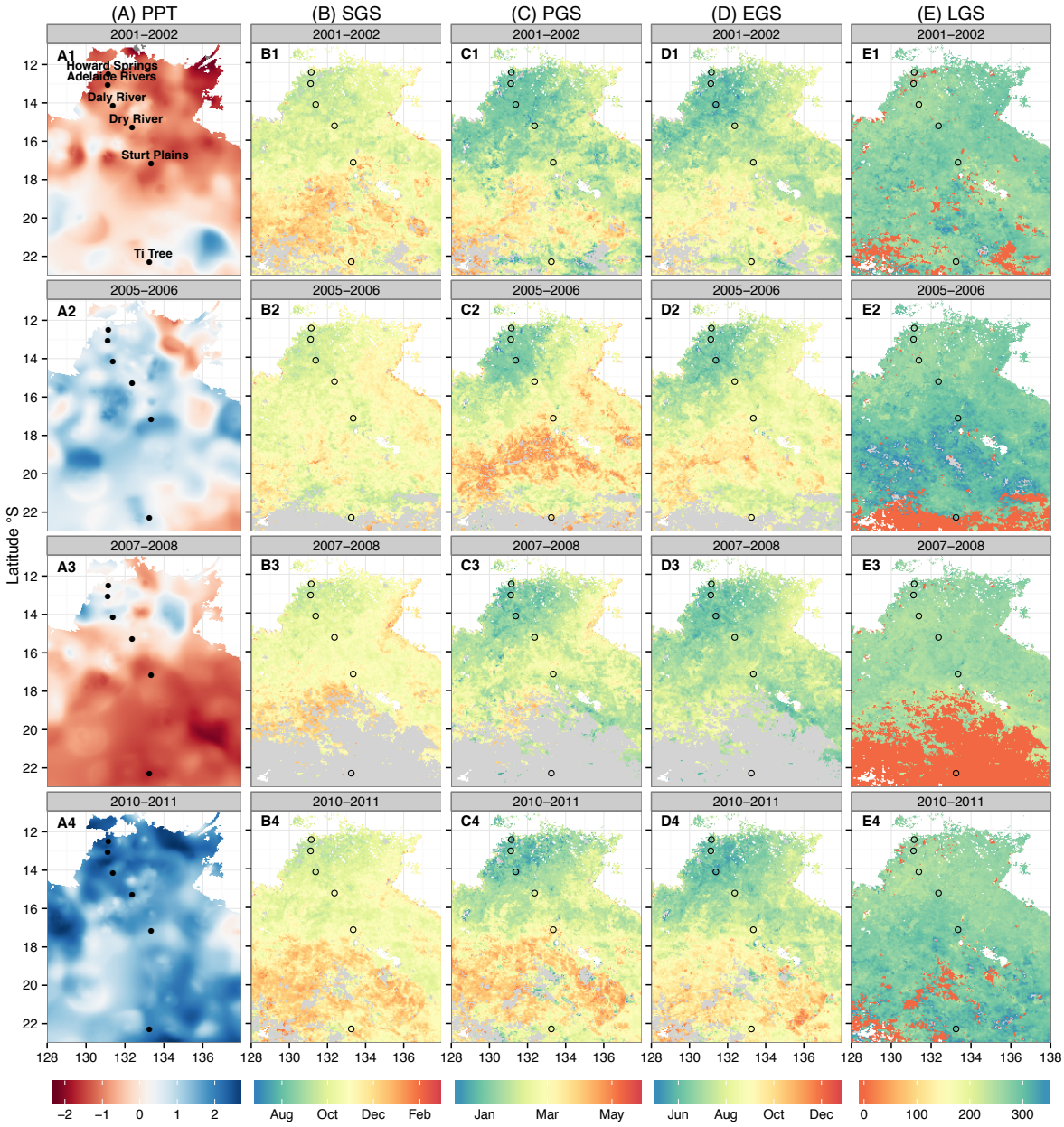


图 6.1 NATT 研究区植被物候指数和降水标准变异（ standardized anomaly）在 2000 年到 2013 年之间四个代表年份的空间分布。(A) 年降水量 (PPT) 的标准变异；(B) 生长季开始时间 (SGS)；(C) 生长季峰值时间 (PGS)；（D）生长季结束时间（EGS）；（E）生长季长度（LGS）。根据降水量标准变异所选择的四个代表年份分别为：2001-2002（轻微干旱年）；2005-2006（湿润年）；2007-2008（干旱年）；2010-2011（湿润年）。图上灰色的部分代表水体像元、MODIS 原始数据质量过低像元、或未检测出物候的像元。

Figure 6.1 Spatial patterns of vegetation phenology over the NATT study area along with rainfall anomalies across four representative hydrological years. (A) Standardized anomaly of annual precipitation; (B) Start of Greening Season (SGS); (C) Peak of Greening Season (PGS); (D) End of Greening Season (EGS); (E) Length of Greening Season (LGS). Four representative years we selected were: 2001–2002 (normal/light drought year); 2005–2006 (wet year); 2007–2008 (drought year); 2010–2011 (wet year). The filled pixels (gray shaded areas) are either water body, low MODIS QA, or without detectable phenology.

### 6.3.2 萨瓦纳植被物候沿 NATT 降水样带的纬度变化趋势

图 5.2 显示了萨瓦纳植被物候沿 1100 公里的 NATT 生态-降水样带从最北端的 Howard Springs 到最南端的 Ti Tree 的纬度变化趋势。为了研究萨瓦纳植被物候的纬度趋势在干旱年份和湿润年份的差异，图 5.2 同时显示了物候纬度趋势在 2000-2012 年间降水量最高的三个年份的平均值（wet average），以及在降水量最少的三个年份的平均值（dry average）。

从图上可以看到，植被生长季的开始时间（SGS）、峰值时间（PGS）和结束时间（EGS）在 NATT 样带北部（12.5°S-17.7°S）呈现出明显的从北到南的推迟趋势（图 5.2A）。有趣的是，17.7°S 这个位置恰好是北部由桉树建群的萨瓦纳（*Eucalyptus* savanas）和南部圆丘草地（hummock grasslands）以及合金欢树建群的萨瓦纳（*Acacia* savannas）之间的地理分界线（图 5.2A）。

植被生长季在 NATT 最北端开始的最早，大约在 9 月份左右，然后到了 17.7°S 已经推迟到了 11 月份，之后再向南则呈现出明显的波动，没有出现类似 NATT 样带北部那样非常平缓的纬度变化趋势（图 5.2A）。而植被生长季峰值时间和结束时间沿 NATT 降水样带的纬度趋势也呈现出从北向南逐渐推迟的趋势（图 6.2A）。生长季峰值时间和结束时间从 NATT 最北端的 1 月份和 5 月份推迟到最南端的 3 月份和 9 月份，分别推迟了两个月和四个月（图 6.2A）。相比较生长季开始的时间，峰值时间和结束时间在纬度上的空间变化更为明显（图 6.2A）。

总的来说，生长季长度（LGS）在 12.5°S 到 15.5°S 这段范围内的空间变异非常小，而在 15.5°S 以南的变化则明显加强（图 6.2B）。除了整体上的沿纬度从北到南推迟的趋势之外，萨瓦纳植被物候在空间上也呈现出了许多局部的变化，反映出由于环境变化（譬如地形和土壤类型）以及植被结构和组成的变化对植被物候的影响（图 6.2）。

图 6.2 同时显示了降水量的变化对植被物候纬度变化趋势的影响。可以看到 NATT 北部地区萨瓦纳的植被物候无论是在湿润年份（wet average）还是干旱年份（dry average）保持了相似的空间模式，对降水量的变化并不敏感（图 6.2）。与之相反，降水量的变化对 NATT 南部地区的植被物候影响则相当明显，特别是生长季开始时间在湿润年份出现了明显的提前趋势，而在干旱年份则出现了推迟（图 6.2A）。从图上可以看到在整个 NATT 降水样带上植被对降水量的变化最为敏感的空间范围大约为 17°S 到 21°S 之间，这一范围的主要植被类型为圆丘草地（hummock grasslands）（图 6.2A）。

在相对比较湿润的年份，NATT 研究区北部（12°S - 15.5°S）植被生长季的长度大约在 240 天到 280 天之间，然后在 17.7°S 增加到了 300 天，接着再向南又减少到

280 天左右（图 6.2B）。而在干旱年份，NATT 研究区南部（15.5°S - 19°S）植被生长季的长度出现明显的减少，并且在南部的很多地区植被由于受到干旱抑制，没有任何物候期信息可以从遥感观测中提取出来（图 6.2B）。

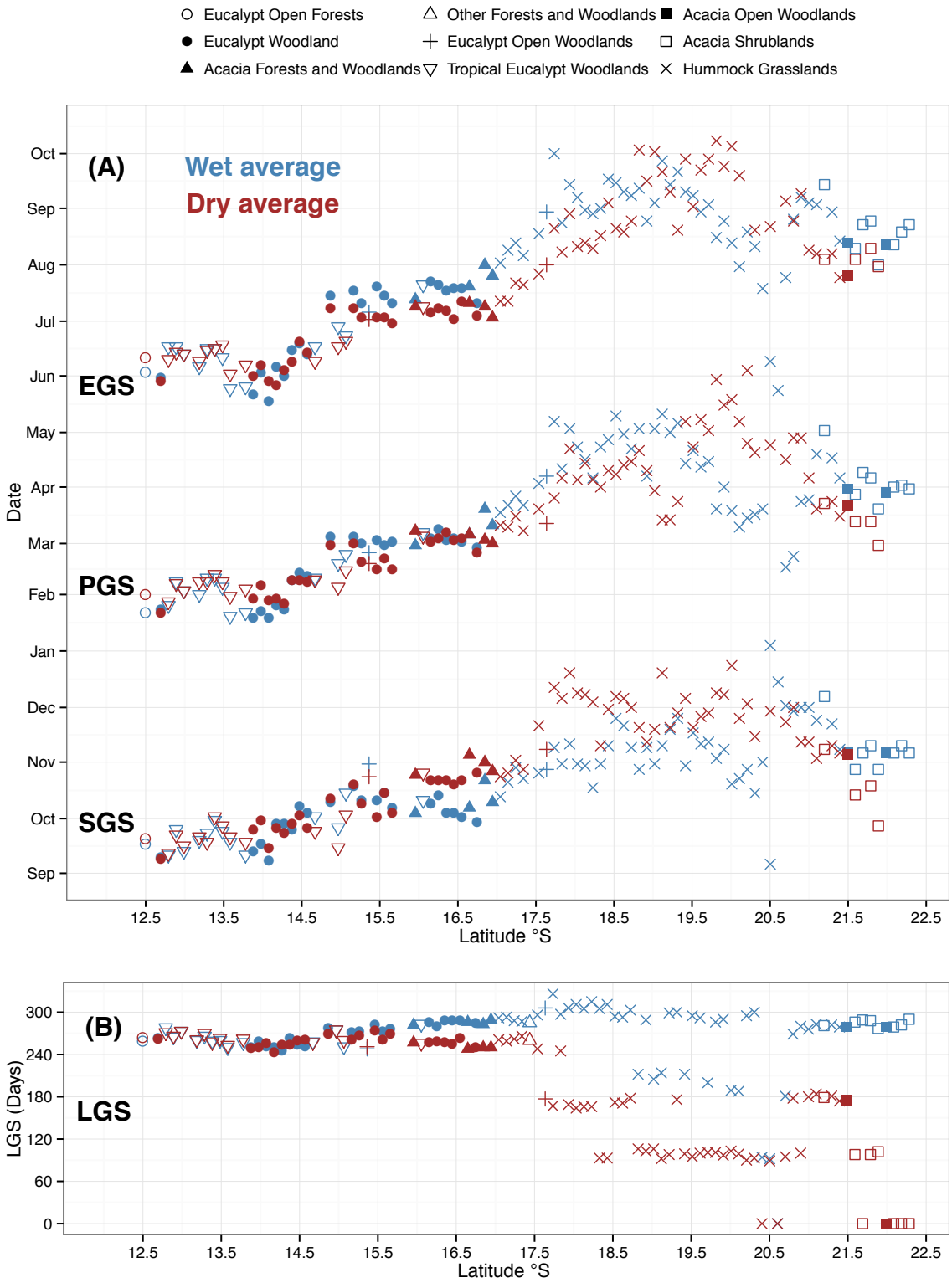

图 6.2 萨瓦纳植被物候沿 NATT 降水样带从 12.5°S 到 22.5°S 的纬度变化。对于每一个样点，首先根据降水量将 2000 年到 2012 年这十二年进行排序，选出降水量最高的三个年份和降水量最低的三个年份。然后分别计算了物候指数在降水量最高三个年份的平均值和降水量最低三个年份的平均值，分别记为“wet average”和“dry average”。

Figure 6.2 Latitudinal gradients of vegetation phenology along the NATT from 12.5°S to 22.5°S. For each transect sample, to produce the wet average and dry average, we first ranked the 12 years based on annual precipitation and then averaged the phenological metrics of the three wettest years and three driest years to form “wet average” and “dry average”.

### 6.3.3 不同萨瓦纳植被类型之间植被物候和降水之间的关系

为了研究不同萨瓦纳植被类型之间植被物候与降水的关系，图 5.3 显示了 NATT 研究区 9 个主要植被类型的生长季长度年际变率（Mean LGS CV）与年平均降水量（Mean annual precipitation）和降水年际变率（Mean PPT CV）之间的关系。从图 6.3A 上可以看到生长季长度年际变率和年平均降水量之间存在非常强的负相关（$R = -0.80$, $p < 0.01$），亦即在湿润地区植被生长季长度年际变率相对较小，而在干旱区变率呈增加趋势（图 6.3A）。同时，生长季长度年际变率的增加伴随着植被类型从热带桉树森林和林地过渡为丛生草地、合金欢森林和林地、桉树开阔林地，以及 NATT 研究区内植被生长季年际变率最高的几个植被类型：圆丘草地、合金欢开阔林地和合金欢灌木林（图 6.3A）。

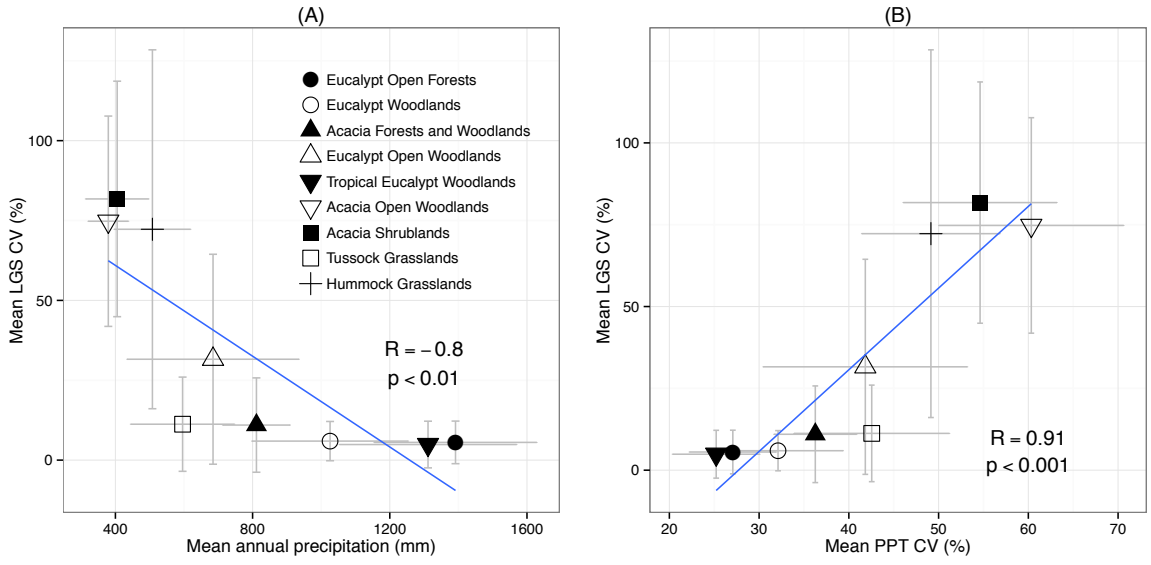


图 6.3 NATT 研究区主要植被类型生长季长度年际变率和降水之间的关系。(A) 生长季长度年际变率（Mean LGS CV，%）和年平均降水（Mean annual precipitation, mm）之间的关系；（B）生长季长度年际变率和降水量年际变率（Mean PPT CV，%）之间的关系。在计算每个植被类型数据的时候使用了在 NATT 地区该植被类型所有像元的平均值。图上的灰色竖直和水平线条为±1 个标准差（standard deviation）。蓝色线条为对数据的最小二乘线性拟合。图上同时标注了数据之间的 Pearson 相关系数（R）和显著性水平（p）。

Figure 6.3 Regional averaged (A) mean CV (coefficient of variance, %) of length of greening season (LGS) versus mean annual precipitation (PPT), and (B) mean CV of LGS versus mean CV of PPT for nine major

vegetation groups.

在 NATT 研究区内年平均降水量最高的两个萨瓦纳植被类型，桉树疏林（1391 mm）和热带桉树林地（1311 mm），其植被生长季长度的年际变率也最小，分别为 5.2% 和 5%（图 6.3A）。而植被生长季长度年际变率最高的三个植被类型，合金欢灌木林（80.9%）、合金欢开阔林地（74%）和圆丘草地（71.9%），其平均年降水分别为 405 mm、379 mm 和 508 mm（图 6.3A）。

图 6.3B 显示生长季长度的年际变率和年降水的年际变率存在非常强的正相关（$R = 0.91$, $p < 0.001$）。生长季长度的年际变率一开始增加比较缓慢，但是当降水年际变率超过 40%时，生长季长度的年际变率迅速增加，直至当降水年际变率超过 55%的时候生长季长度年际变率达到最高值 81%（图 6.3B）。从以上分析可看到，在整个 NATT 研究区内，从树木较多的萨瓦纳植被类型（桉树森林和林地）到树木较少的植被类型（合金欢灌木林、合金欢林地和圆丘草地），植被生长季年际变率的增加伴随着萨瓦纳植被群落内树-草比例的减少。

## 6.4 讨 论

### 6.4.1 萨瓦纳植被物候的空间变化规律

本论文使用基于奇异波谱分析的遥感物候反演方法从 13 年的 MODIS EVI 数据中提取了整个 NATT 萨瓦纳研究区的多种植被物候指数，并在此基础上研究了萨瓦纳植被物候在空间上的变化规律以及年际变率。结果显示 NATT 北部地区（12°S-17.7°S）的植被物候具有非常明显的纬度变化规律，这一范围和澳大利亚夏季季雨（Australian summer monsoon）能够影响到的范围大约一致（Bowman et al., 1988）。在 12°S 到 17.7°S 之间，由于植被生长季开始时间和结束时间同时呈现出从北向南逐渐推迟的趋势，因此植被生长季长度在这段范围（12°S-17.7°S）内变化很小，基本上在 240 天到 280 天之间变动，尽管年降水量在这段范围内从 1800 毫米减少到 800 毫米。

植被物候的年际变率从北部的桉树森林和林地向南部的圆丘草地和合金欢林地、灌木林呈现出明显的增加趋势，而这一趋势和夏季季雨的影响在南部逐渐变弱有关。由对流风暴（convective storm）带来的不规则的年内降水分布模式，以及极高的降水量年际变率成为南部 NATT 地区气候模式的主要特点（Cook & Heerdegen, 2001）。

在 NATT 北部萨瓦纳地区，林下层草地的种子萌发和生长需要土壤水分的支持，因此在经过了一整个旱季之后，植被生长季开始的时间一般在雨季开始之后。在这一地区植被物候较低的年际变率和以往研究中发现的该地区雨季开始时间较低的年际变率一致（Lo et al., 2007）。从本章研究中可以看到，NATT 北部地区的植被物候对降水量的改变并未表现出明显的响应，说明该地区植被物候与雨季的开始时间和长度

等关系更为密切，而对降水量的变化并不敏感（Cook et al., 1998）。

与 NATT 北部湿润萨瓦纳截然相反，南部干旱萨瓦纳地区（15°S 以南）的植被生长和物候受降水量变化的影响非常明显。沿着 NATT 降水样带从北向南，雨季之外（extra-monsoonal）的降水在年降水量中所占的比例逐渐增加，而这些降水虽然量比较小，但是却对该地区植被的生长有非常重要的生态作用（Eamus et al., 2001）。除此之外，研究发现南部地区雨季开始和结束时间的年际变率相比较北部 NATT 地区更高，雨季开始时间的年际标准差在NATT南部能够达到55天以上（Lo et al., 2007），而这符合本次研究中观测到的植被物候年际变率沿着 NATT 从北到南逐渐增加的趋势。

### 6.4.2 萨瓦纳的植被物候和气候变化

通过分析萨瓦纳植被物候和降水之间的关系，可以看到萨瓦纳植被物候的空间变异、纬度趋势和年际变率等与降水模式之间具有密切的关系，特别是在干旱萨瓦纳地区。在整个 NATT 研究区，植被生长季长度的年际变率和平均年降水以及降水量年际变率之间均存在非常强的关系，而降水量的年际变率可以解释生长季长度年际变率中 80%以上的变异。

然而，通过引入植被类型数据进行分析，可以看到萨瓦纳植被结构对植被物候也存在一定的影响。譬如，从北部桉树萨瓦纳到南部合金欢树萨瓦纳，树木在群落中的生物量逐渐减少（亦即树-草比例逐渐减少）（Bowman, 1996）。与此同时，植被物候对降水量变化的敏感性从北到南呈增加趋势。因此萨瓦纳的植被结构，或者更具体一点来说是群落中的树-草比例，和萨瓦纳植被物候的年际变率之间也有一定的关系。在 NATT 最南端降水量小于 450 毫米的干旱萨瓦纳地区，年内降水分布非常不规则，且单次降水量较低，这些使得植物的根系倾向于生长在较浅的土层中，以充分的利用每次降水所带来土壤水分的增加，因此表现出比北部湿润萨瓦纳地区植被对降水变化更高的敏感性（Cook et al., 2002; Hutley et al., 2011）。

在过去的三百万年，NATT 北部地区降水的季节性变得更强，同时火灾的发生更为频繁，而这一地区萨瓦纳的建群树种桉树经过长时间的进化，对于干旱还是火灾都已经具有了很好的耐受性（Bowman et al., 2010）。而在南部 NATT 地区，生长在贫瘠土壤上的圆丘草地需要忍受干旱以及降水量极高的年际变率，因此其在生理和形态特征上进化出了对于干旱极强的适应性（Beard, 1981; Griffin, 1984）。譬如圆丘草地的建群种 *Triodia spp.* （在澳洲当地称作 spinifex），是一种常绿的、生长非常缓慢的多年生草种（Lazarides, 1997）。*Triodia* 草的叶子高度硬化（sclerophyllous）（Lazarides, 1997），根系可以达到 10 米以上（Nicholas et al., 2011）。这些特征都使得 *Triodia* 草对于干旱有极强的耐受能力。

而 NATT 更南端的合金欢树（*Acacia aneura*）则已经在极端干旱的气候条件下生存了超过了 50 万年以上（Martin, 2006; Morton et al., 1995）。因此从一定程度上来说，是 *Triodia* 草和合金欢树（*Acacia aneura*）使得澳大利亚内陆干旱地区没有成为像撒哈拉那样荒芜的沙漠。基于这些物种对干旱和降水变率较强的适应能力，很难说这些植被类型（圆丘草地和合金欢树萨瓦纳）对未来气候变化下降水变率的增加会特别敏感。但是从本章的分析中同时可以看到，南部 NATT 干旱萨瓦纳地区植被物候对降水量变化的响应非常明显，在干旱年份植被的生长受到极大的抑制（譬如 2007-2008 干旱年份）。因此接下来的研究可以重点关注萨瓦纳生态系统，尤其是干旱萨瓦纳，对气候变化的敏感性以及对干旱适应能力的极限，以便更好的了解这一全球重要生物群系在未来气候变化背景下的命运以及可能发生的改变。

## 6.5 结 论

本章通过遥感手段分析了萨瓦纳植被物候在 NATT 生态-降水样带上的空间变化和年际变化规律。通过引入降水数据和植被类型数据，对植被物候和平均年降水以及降水年际变率之间的关系，以及与植被结构类型之间的关系进行了分析。

在 NATT 研究区南北两部分，萨瓦纳的植被物候呈现出两种截然不同的空间变化模式。在 NATT 北部地区，生长季的开始、峰值和结束时间在 12°S 到 17.7°S 之间表现出了沿纬度逐渐推迟的趋势。而在 17.7°S 以南，这种推迟趋势逐渐消失，取而代之的是植被物候更高的空间波动和年际变率。

在不同萨瓦纳植被类型上，降水量的年际变异系数可以解释植被物候（生长季长度）年际变率中的 80%以上的变异。植被物候的年际变率在北部湿润萨瓦纳地区较低，然后向南逐渐增加。在 NATT 研究区的九种主要植被类型中，合金欢林地、合金欢灌木林和圆丘草地的植被物候表现出了最高的年际变率，说明这几种植被类型对降水的年际变化更为敏感。

研究发现从北部树-草比例更高的湿润萨瓦纳到南部树-草比例更低的草地和干旱萨瓦纳，植被物候的年际变率呈现出明显增加的趋势。这一发现说明萨瓦纳对气候变化的敏感性可能和群落中的树-草比例有关。群落中树-草比例越高，则群落对气候变率的适应力和在干扰后的恢复能力可能会更强。本章研究所发现的萨瓦纳地区植被物候高度的时空变化说明，模型中只有对植被物候进行准确的描述，才有可能对萨瓦纳地区植被-大气之间碳、水和能量的交换进行准确模拟。

# 第七章 基于 MODIS EVI 和太阳辐射的萨瓦纳植被总初级生产力遥感反演模型

## 摘 要

对陆地生态系统碳通量的准确测量是全球变化研究中的核心任务之一。站点尺度上的涡度相关测量得到的碳通量只有在空间拓展之后，才能获得对区域和全球尺度上碳平衡更为准确的计算。卫星遥感观测以其较大的空间覆盖范围和时间上的连续重复观测，是将站点尺度上通过涡度相关通量塔测量得到的碳通量数据扩展到区域尺度上的最有效手段。目前常见的基于遥感观测的总初级生产力（Gross Primary Production, GPP）反演模型大多基于光能利用效率（Light-Use-Efficiency, LUE），需要大量的输入数据，包括从地面气象站插值得到的气象数据、植物光合有效辐射吸收分量（fraction of absorbed photosynthetically active radiation, fPAR）以及从查询表（look-up table）得到的最大 LUE 等。基于 LUE 的遥感 GPP 模型由于需要大量的输入数据，且每一种输入数据均有其误差，因此无疑增加了模拟结果的不确定性。同时，对于混合了多种植被功能性（Plant Functional Types, PFTs）的生物群系譬如萨瓦纳来说，由于其树和草之间不同的生理特征（譬如 LUE）和对环境要素不同的响应方式，因此其生理生态参数很难在模型中被准确参数化。本章研究的主要目标是，通过将遥感观测和地面通量塔测量相结合，探索并发展一种完全基于遥感数据的萨瓦纳 GPP 反演模型。为了实现这一目标，首先比较了五种 MODIS 遥感产品在六个萨瓦纳通量塔站点上和 GPP 之间的关系，包括 MODIS GPP，MODIS LAI/fPAR，和 MODIS NDVI/EVI。同时，分析了几种基于植被指数的遥感 GPP 模型在热带萨瓦纳地区的适用性，并在此基础上提出一个新的基于 MODIS EVI 和太阳辐射的萨瓦纳 GPP 遥感反演模型。

研究发现五种 MODIS 产品在六个萨瓦纳站点上与通量塔 GPP 之间的关系各有高低，没有一种 MODIS 产品在所有站点上均表现出与通量塔 GPP 最好的关系。但是如果将所有六个通量站的 GPP 数据放在一起之后，MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间的关系最好（$R^2 = 0.83$, $p < 0.0001$，RMSE = 0.85 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。相比之下，MODIS 全球 GPP 产品（MOD17A2）和通量塔 GPP 之间的关系非常一般（$R^2 = 0.59$, $p < 0.0001$，RMSE = 1.40 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。在对几种基于 EVI 的遥感 GPP 模型进行比较之后发现，将 EVI 和 MODIS 地表温度（land surface temperature）结合并不能提高对萨瓦纳 GPP 的模拟效果。而将 EVI 和 PAR（光合有效辐射，Photosynthetically Active Radiation）结合之后，与通量塔 GPP 之间的关系比仅使用 MODIS EVI 有了改善。但是通量塔直接测量的 PAR 本身噪音较大，且在区域上很难获得对 PAR 的准确估算。因此本论文提出一个新的遥感 GPP 模型。该模型将 EVI 和大气层之上太阳辐射（top-of-atmosphere

solar radiation, $R_{TOA}$）相结合（EVI × $R_{TOA}$），可以在不需要地面气象资料的情况下完全使用遥感数据对萨瓦纳 GPP 进行估算。在研究区六个萨瓦纳涡度相关通量站点上的比较发现，该模型对通量塔 GPP 具有较好的模拟能力（$R^2$ = 0.85, $p$ < 0.0001, RMSE = 0.78 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$），远优于 MODIS 全球 GPP 产品（MOD17A2）对通量塔 GPP 的模拟精度。该模型充分地利用了遥感和通量塔观测的优势，将两者进行有效结合以简化对萨瓦纳区域植被生产力的估算。该模型结构简单，且所需数据较易获取，因此有潜力被应用到全球其它植被类型。

## 关键字

热带萨瓦纳，总初级生产力，MODIS，EVI，太阳辐射

## 7.1 引 言

对于碳通量在空间和时间尺度上的准确估算是对区域尺度和全球尺度上碳平衡进行准确评估的首要前提，因此对碳通量的测量和模拟在全球变化研究中中有着非常重要的作用（Baldocchi et al., 2001; Gitelson et al., 2006）。目前基于遥感观测的两种对 GPP 进行估算的技术路线分别是：（1）基于光能利用效率的 GPP 反演模型（Light-Use-Efficiency, LUE）（Running et al., 2004; Xiao et al., 2005）；（2）基于 GPP 和遥感光谱指数之间关系的经验或半经验模型（Rahman et al., 2005; Sims et al., 2006; Huete et al., 2008; Sims et al., 2008; Sjöström et al., 2011）。

光能利用效率（以下简称 LUE）的概念最早由 Monteith 提出（Monteith, 1972），并已被广泛的应用到对全球和区域植被初级生产力的计算中（Running et al., 2004）。基于 LUE 的初级生产力模型通过两个转换系数，LUE 和 fPAR，将太阳辐射中的光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation, PAR, 400-700 nm）换算为初级生产力（GPP 或 NPP）（Monteith, 1972; Running et al., 2004；Zhao et al., 2005）。譬如基于 LUE 模型的 MODIS 全球 GPP 产品（MOD17A2），通过搭载于 EOS-MODIS 传感器的观测首次实现了对于全球尺度 GPP 接近实时的反演（Running et al., 2004; Zhao et al., 2005）。

在 LUE 模型的两个转换系数里，尽管 fPAR 可以通过植被指数（Vegetation Indices，VI）和 fPAR 之间的线性关系较为准确的计算得到（Sellers, 1985; Goward & Huemmrich, 1992; Ruimy et al., 1994; Carlson & Ripley, 1997），或使用更为复杂的三维辐射传输模型来计算 fPAR（Myneni et al., 2002）。然而，LUE 却很难在区域尺度上进行准确估算。因为 LUE 不仅随植被类型变化而变化（Field et al., 1995; Turner, 2003），也随季节变化而变化（Sims et al., 2006; Jenkins et al., 2007; Gitelson et al., 2006），而且受不同环境压力（譬如低温和水分亏缺）的影响而变化（Ruimy et al., 1995）。目前的观测技术尚

无法在时空尺度上对 LUE 进行准确测量，这些无疑增加了使用 LUE 模型来估算区域尺度上 GPP 的难度。由于无法得到 LUE 的直接测量或估算数据，现有的基于 LUE 的遥感 GPP 反演模型通常对不同植被类型设定一个固定的最大 LUE，然后使用地面气象插值数据对最大 LUE 进行调节，由于气象数据本身的误差以及无法对所有影响光合作用的环境压力都进行参数化（譬如土壤水分胁迫, Leuning et al., 2005; Kanniah et al., 2009），这些都增加了最终对 GPP 模拟结果的不确定性（Heinsch et al., 2006; Yuan et al., 2010; Sjöström et al., 2013）。

目前在快速发展的涡度相关（Eddy Covariance, EC）通量网络提供了在站点尺度对生态系统过程（譬如光合和蒸散）的连续测量（Glenn et al., 2008）。作为在冠层之上的直接观测，EC 通量塔在计算碳、水和能量通量的时候并不需要知道叶面积指数或详细的植被结构，而且 EC 通量塔的测量足迹（footprint）和现有的中尺度遥感卫星传感器（譬如 MODIS）的空间分辨率具有很好的可比性（Glenn et al. 2008）。通过对大尺度上生态系统功能的观测，遥感可以和空间上离散分布的 EC 通量塔之间在时空尺度上形成非常好的互补。随着全球通量网络（FLUXNET）和区域通量网络（譬如 OzFLUX 和 ChinaFLUX）的快速发展，可以将遥感卫星观测和地面 EC 通量塔两种独立的观测源更好地结合起来以完成对区域上 GPP 和碳平衡更为准确的估算（Huete et al., 2008）。

以往已经有许多使用遥感光谱指数（spectral indices）将 EC 通量塔测量的碳通量扩展到区域上的研究。譬如 Wylie 等（2003）发现在灌木蒿-干草原（sagebrush-steppe）生态系统， NDVI 和 $CO_2$ 日通量之间存在非常强的关系。在北美不同生态系统，Rahman 等（2005）发现 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间存在非常好的关系，进而基于此关系可以对区域上的 GPP 进行估算。Sims 等（2006）进一步发现如果将冬季休眠期的通量观测数据去除掉之后，MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间的关系要比 MOD17 GPP 产品与通量塔 GPP 之间的关系更好。在南美洲亚马逊热带雨林地区（Amazonia），Huete 等（2006）发现 EVI 和通量塔 GPP 之间存在较强的线性关系，且在生物量非常高的热带雨林地区 EVI 和 GPP 之间未出现饱和现象。Huete 等（2008）在东南亚亚洲季风区（Monsoon Asia）的三个不同的热带森林通量站点发现在 EVI 和 GPP 之间同样存在非常好的线性关系，这提供了对植被结构异质性非常高的东南亚地区碳通量进行估算的手段。

在欧洲北部，Olofsson 等（2008）发现在 EVI 和 GPP 之间存在较好的关系，而 NDVI 则在高生物量地区出现饱和现象。在非洲萨瓦纳，Sjöström 等（2011）发现 MOD17 GPP 对主要站点的 GPP 都存在低估的现象，而 EVI 和 GPP 之间在季节变化

上非常一致。在全球 21 个 FLUXNET 通量站点上，Hashimoto 等（2012）在比较了几种主要的遥感产品，包括 MOD15 LAI/fPAR (Myneni et al., 2002)和 MODIS NDVI，发现 EVI 对通量塔观测得到 GPP 的季节性描述最好。本论文第四章的研究发现在澳洲北部湿润和干旱萨瓦纳地区的三个通量塔站点上，EVI 和 GPP 之间存在较好的相关性，从而肯定了将遥感观测和地面通量塔观测结合起来以获得对萨瓦纳区域尺度 GPP 准确估算的潜力。

而除了仅仅使用 MODIS EVI 来建立和通量塔 GPP 之间的经验模型以对区域 GPP 进行估算之外，一些研究探索了将 EVI 和其它一些遥感反演得到的地表参数结合起来以获得对 GPP 更为准确估算的方法。譬如，在北美温带地区，Sims 等（2008）发现将 EVI 和 MODIS 反演的地表温度（Land Surface Temerature, LST, Wan, 2008）结合之后与通量塔 GPP 之间的关系相比较仅适用 EVI 得到了显著的提高。Gitelson 等（2006）发现将与冠层叶绿素含量相关性较好的植被指数和 PAR 结合起来可以提供对农作物 GPP 非常准确的估算。而 Wu 等（2011）在落叶森林和常绿森林比较了将 EVI 和 LST，以及将 EVI 和 PAR 结合起来对 GPP 的模拟效果，发现将 EVI 与 PAR 结合起来的预测效果更好。Peng 等（2013）进而发展出了一种基于植被指数和潜在 PAR（potential PAR，以及当云层覆盖及气溶胶含量最低时的 PAR）来估算作物 GPP 的遥感模型，并在灌溉和雨养作物上都得到了非常准确的模拟效果。

从以上综述可以看到，区域尺度的总初级生产力可以完全使用遥感数据来进行估算，不必依赖地面气象观测数据，也不需要估算 LUE。然而，要获得一个普遍适用的基于遥感观测的 GPP 反演模型，需要在代表不同植被类型和气象条件的地区对模型效果进行分析。在过去的十几年中（2000-2013），研究者在澳大利亚北部热带萨瓦纳地区安装了数个 EC 通量塔，这些通量塔跨越了南北长约 1100 公里的纬度范围，代表了从 1800 毫米年降水量到 400 毫米年降水量的降水梯度，同时覆盖了从北部湿润萨瓦纳到南部干旱萨瓦纳等多个萨瓦纳植被类型（Beringer et al., 2011; Hutley et al., 2011; Eamus et al., 2013; Cleverly et al., 2013）。到目前为止，这几个站点已经有多年的通量观测数据积累，提供了非常好的机会来将遥感观测和地面通量观测进行结合，以实现在区域尺度上对萨瓦纳 GPP 更为准确的估算。

本章的研究目的主要有三点：（1）在澳大利亚北部热带萨瓦纳地区比较多种遥感产品（包括 MODIS LAI，fPAR，NDVI，EVI 和 GPP）与 EC 通量塔观测 GPP 之间的关系；（2）比较几种基于光谱指数的遥感反演模型对萨瓦纳 GPP 的模拟效果；（3）在以上研究基础上，探索并发展新的完全基于遥感数据的萨瓦纳 GPP 反演模型。

## 7.2 数据和方法

### 7.2.1 研究区和通量站点介绍

研究区设定在北澳大利亚热带样带（Northern Australian Tropical Transect, NATT），对研究区的详细介绍请参见学位论文第二章。

本章研究用到了由澳大利亚-新西兰通量研究和观测网络（Australian and New Zealand Flux Research and Monitoring network, OzFlux）提供的六个热带萨瓦纳通量站点的数据，包括 Howard Springs（桉树林地， *Eucalytus* woodlands），Adelaide River（热带桉树林地），Daly River（桉树林地），Dry River（桉树疏林），Sturt Plains（圆丘草地）和 Ti Tree（合金欢树林地， *Acacia* woodlands）。对这六个站点情况的详细介绍请参见论文第二章 2.4 小节。

在使用由 OzFlux 网络提供的 Level-3 通量测量数据之前，本论文对原始数据进行了一系列预处理，以确保几个站点之间数据的一致性。对通量数据的处理方法请参见论文第四章第二小节 4.2.1 部分。因为本次研究的主要目的是获取稳定可靠的连续 GPP 数据，因此将日分辨率的 GPP 数据合并为 8 日平均值以与 8 天分辨率的 MODISI 数据进行比较。

### 7.2.2 遥感数据

#### 7.2.2.1 MOD09A1 地表反射率和植被指数产品

本章研究使用了从美国地质调查局（USGS）网站上下载的 13 年左右（2000.02-2013-07）的 MOD09A1 地表反射率（surface reflectances）产品（Collection 5，tile h30v10 和 h30v11）（Vermote et al., 2002）。对 MOD09A1 数据的介绍请参见论文第三章第二小节 3.2.1 部分。

#### 7.2.2.2 MOD15A2 叶面积指数和光合有效辐射吸收分数产品

为了与植被指数产品进行比较，同时从 USGS 服务器上下载了 13 年（2000.02-2013.05）的 MODIS LAI 和 fPAR 数据（MOD15A2, Collection 5, tiles h30v10 和 h30v11）（Myneni et al., 2002）。MOD15 产品在计算 LAI 和 fPAR 时的主算法为在数学上解一个三维辐射传输模型（3-D radiative transfer model），当主算法无解时，则使用备份算法，亦即使用基于 NDVI 和 LAI 以及 fPAR 之间的经验关系来计算（Myneni et al., 2002）。

对于每个通量站点，提取了一个 MOD15A2 像元（1 $km^2$）的 LAI 和 fPAR 时间序列。MOD15A2 产品在 USGS 服务器上有部分时间的数据缺失，包括 2000.02.18，2000.08.12，2001.06.18, 2001.06.26 和 2002.03.22，对这些缺失数据在时间序列上进行了空值填充，不做任何插值处理。根据随 MOD15A2 产品一同发布的数据质量控制信

息，在提取出的数据中只保留完全满足以下条件的高质量数据：（1）仅使用了主算法（即 3D 辐射传输模型），数据精度最高且没有出现饱和（main (RT) algorithm used, best results possible and no saturation）；（2）无显著云层覆盖（significant clouds not present）；（3）大气中气溶胶含量处于低水平或平均水平（no or low atmospheric aerosol）。

#### 7.2.2.3 MOD17A2 总初级生产力产品

MOD17A2 为目前广泛使用的全球遥感 GPP 产品（Running et al., 2004）。本次研究从美国蒙大拿大学（University of Montana）陆面动态数值模型研究组（Numerical Terradynamic Simulation Group）的 FTP 服务器（http://www.ntsg.umt.edu/project/mod17）上下载了从 2000 年 1 月至 2012 年 12 月，空间分辨率为 1 公里，时间分辨率为 8 天的 MOD17A2 GPP 产品（Collection 055, tiles h30v10 和 h30v11）。C055 版本的 MOD17A2 数据相比较 C005 的数据有以下两点主要改进（Zhao et al., 2005）：（1）对于受大气影响比较严重的观测进行时间序列线性插值；（2）使用由美国国家环境预测 - 国家大气研究中心（NCEP/NCAR，National Centres for Environmental Prediction/National Centre for Atmospheric Research）提供的 Reanalysis-II 气象数据集（Kanamitsu et al., 2002）。

MOD17A2 在计算 GPP 的时候主要使用了太阳辐射，最大光能利用效率，fPAR，温度和 VPD 等数据（Running et al., 2004）：

$$\mathrm{GPP} = \varepsilon_{\max} \times 0.45 \times \mathrm{SW}_{\mathrm{rad}} \times \mathrm{fPAR} \times f(\mathrm{VPD}) \times f(\mathrm{T}_{\min}) \tag{7.3}$$

其中 $\varepsilon_{max}$ 为最大光能利用效率（g C $m^{-2}$ $MJ^{-1}$），每种生物群系（biome）都不同，预先设定并在实际计算中通过查询表（look-up table）来获得；$SW_{rad}$ 为短波下行太阳辐射（incoming shortwave solar radiation）（MJ $m^{-2}$ $d^{-1}$），其中 45%为光合有效辐射 PAR（400-700 nm, MJ $m^{-2}$ $d^{-1}$）；*f*PAR 为光合吸收辐射分数，由 MOD15A2 数据提供；*f*(VPD) 和 $f(T_{min})$分别为水分亏缺（高 VPD）和低温对植被光合的限制（Running et al., 2004）。

对于每个通量站点提取了一个像元（1 $km^2$）的 GPP 时间序列。根据随 MOD17A2 产品一同发布的数据质量控制信息，只保留完全满足以下条件的高质量数据：（1）MODLAND_QC 显示数据质量良好（MODLAND_QC bits indicate good quality）；（2）通道 1 和 2 中超过 50%以上的检测器良好（detectors apparently fine for up to 50% of channels 1, 2）；（3）无显著云层覆盖（no significant clouds present）。

#### 7.2.2.4 MOD11A2 陆面温度产品

为了分析将植被指数和陆面温度结合起来对通量塔 GPP 的模拟效果，本章研究同时从 USGS 服务器上下载了 13 年（2000.02-2013.07）的 MODIS 陆面温度 LST 产品（MOD11A2, Collection 5, tiles h30v10 和 h30v11）（Wan, 2008）。MOD11A2 LST 产品的空间分辨率为 1 公里，时间分辨率为 8 天。MOD11A2 通过计算 8 天内晴天

LST 的平均值来将逐日的数据转换到 8 天分辨率。MOD11A2 在计算 LST 的时候使用分裂窗算法（generalised split-window algorithm）（Wan & Dozier, 1996）。

### 7.2.3 基于 EVI 的几种 GPP 模型

除了比较几种遥感产品和通量 GPP 之间的关系之外，本研究还比较了几种基于 EVI 的 GPP 反演模型，以下将分别予以介绍。

#### 7.2.3.1 温度和绿度模型

温度和绿度模型（Temperature and Greenness model, 以下简称 TG 模型）最早由 Sims 等提出，用来模拟北美洲温带生态系统的 GPP（Sims et al., 2008）。Sims 等（2008）的研究发现，通过将 EVI 和 MODIS 陆面温度（LST）结合起来，可以对通量塔观测的 GPP 进行非常好的模拟，而且模拟效果要显著优于 MOD17 GPP 产品或仅使用 EVI（Sims et al., 2008; Wu et al., 2010）。TG 模型的构造如下（Sims et al., 2008）：

$$GPP \propto EVI_{scaled} \times LST_{scaled} \tag{7.4}$$

其中 $EVI_{scaled}$ 可以通过下式计算：

$$EVI_{scaled} = EVI - 0.1 \tag{7.5}$$

其中 0.1 为考虑土壤背景对 EVI 的贡献。而 $LST_{scaled}$ 可以通过下式计算：

$$LST_{scaled} = \min[(LST / 30); (2.5 - (0.05 \times LST))] \tag{7.6}$$

$LST_{scaled}$ 的作用是当 LST 为零的时候将 GPP 设为 0，或在 0-30°C 之间引入低温对植被光合作用的限制，以及当 LST 超过 30°C 时高温对植被光合的胁迫（Sims et al., 2008）。

#### 7.2.3.2 辐射和绿度模型

Giltelson 等（2006）提出了一个新的将和叶绿素含量关系比较好的植被指数（$VI_{chl}$）和 PAR 结合起来计算作物 GPP 的模型，称之为 Radiation and Greenness 模型（以下简称 RG 模型）。RG 模型已经被成功的应用到对农作物和自然植被 GPP 的模拟（Gitelson et al., 2006; Wu et al., 2009; Gitelson et al., 2012; Peng et al., 2013；Wu et al., 2014）。RG 模型的构造如下（Gitelson et al., 2006）：

$$GPP \propto VI_{chl} \times PAR \tag{7.7}$$

其中 $VI_{chl}$ 为与叶绿素含量关系较好的植被指数，在本次研究中采用 EVI（Xiao et al., 2004; Wu et al., 2014）；PAR 为通量塔测量的光合有效辐射（W $m^{-2}$）。

#### 7.2.3.3 辐射和光合能力模型

PAR 在站点尺度上可以通过观测获得，但是现有的观测手段无法在整个研究区尺度上获得空间上连续且准确的 PAR 测量数据。因此在 RG 模型（EVI×PAR）的基

础之上，本次论文研究中对 RG 模型进行了一些改进，将原公式中地面测量的 PAR 替换大气层之上太阳辐射（top-of-atmosphere solar radiation，$R_{TOA}$），从而使得模型能够被更方便的应用到区域尺度。在使用 $R_{TOA}$ 替换 PAR 之前，需要做出一些合理性假设。首先，前期分析发现，在研究区六个通量站点中，$R_{TOA}$ 和 PAR 之间的相关系数（$R$）在其中四个站点上都达到 0.44 以上（$p < 0.0001$），而在最南部 Ti Tree 站点上相关系数达到 0.72（$p < 0.0001$），说明 $R_{TOA}$ 可以在部分程度上反映 PAR 的季节变化信息，尤其是在南部雨季时间较短的干旱萨瓦纳地区。因此相比较仅使用 EVI 来建立经验模型来模拟 GPP，将 EVI 和 $R_{TOA}$ 结合可以在模型中引入太阳辐射的年内季节变化对植被生长季节性的影响。但是 $R_{TOA}$ 和 PAR 在湿润萨瓦纳站点（Howard Springs 和 Adelaide River）不存在显著相关，说明使用 $R_{TOA}$ 替换 PAR 在这些站点会忽略由于天气变化而导致的 PAR 高频波动对植被光合的影响。然而，之前的研究发现萨瓦纳植被对太阳辐射的变化具有非常好的适应能力。譬如 Kanniah 等（2013）发现，在云层覆被导致 PAR 减少 63%的情况下，由于散射辐射的增加导致光能利用效率增加，因此 GPP 的减少幅度仅为 26%。这说明萨瓦纳植被光合对由于天气变化而导致的 PAR 的高频变化具有很好的适应能力，在一定程度上减少了由于使用 $R_{TOA}$ 来替换实测 PAR 所带来的模拟误差。

在实际效果上，$R_{TOA}$ 和 Gitelson 等（2012）提出的潜在 PAR（$PAR_{potential}$）非常类似，因为两者的目的都是在遥感反演模型中取代实际测量的 PAR，在最大程度上减少对地面气象观测数据的依赖，以利于使用遥感观测将模型拓展到空间尺度。$PAR_{potential}$ 的定义为，在一年中某一个时刻大气中气体和气溶胶量含量最小时的 PAR（Gitelson et al., 2012）。然而 $PAR_{potential}$ 的计算需要长时间序列的 PAR 测量数据（Gitelson et al., 2012; Peng et al., 2013），或使用辐射传输模型进行模拟（Kotchenova & Vermote, 2007; Vermote et al., 1997），增加了整个计算过程的复杂程度。而 $R_{TOA}$ 的计算仅仅需要使用几个相对容易获取的参数，譬如站点位置、儒略日等，简化了模型从通量塔尺度向区域尺度的拓展。

由于 EVI 反映了植被的光合能力，所以将该模型命名为辐射和光合能力模型（Radiation and Photosynthetic Capacity，简称 RPC 模型）。与 RG 模型类似，RPC 模型的构造如下：

$$\mathrm{GPP} \propto \mathrm{EVI} \times \mathrm{R_{TOA}} \tag{7.8}$$

其中 $R_{TOA}$ 为大气层之上太阳辐射（top-of-atmosphere solar radiation, W $m^{-2}$）。$R_{TOA}$ 可以通过地球-太阳之间的几何关系计算得到：

$$\mathrm{R_{TOA}} = \frac{\mathrm{S_0}}{\pi}\left(\frac{\mathrm{r_0}}{\mathrm{r}}\right)^2 (\mathrm{H}\sin\phi\sin\delta + \sin\mathrm{H}\cos\phi\cos\delta) \tag{7.9}$$

其中 $S_0$ 为太阳常数（1366 W $m^{-2}$）；$r$ 为地日距离，$r_0$ 为地日平均距离；$H$ 为日落时分

太阳时角（°）；$\phi$为纬度（°）；δ 为太阳倾斜角（°）。

## 7.3 结　果

### 7.3.1 MODIS 产品和通量塔 GPP 之间的关系

图 7.1-7.5 显示了在 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上对五种 MODIS 遥感产品和通量塔测量 GPP（$GPP_{EC}$）之间关系的比较。首先可以看到 MOD17 GPP 产品（$GPP_{MOD17}$）和 $GPP_{EC}$ 之间的关系在所有站点上都很一般，$R^2$ 的范围在 0.33（Ti Tree）和 0.65（Adelaide River）之间，RMSE 则在 0.92 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ (Ti Tree)到 1.52 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（Howard Springs）之间（图 7.1）。而 MOD15 LAI（$LAI_{MOD15}$）和 $GPP_{EC}$ 之间具有更强的相关性，$R^2$ 的范围在 0.45（Sturt Plains）和 0.9（Adelaide River）之间，RMSE 则在 0.56 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ (Dry River)到 1.03 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（Howard Springs）之间（图 7.2）。MOD15 fPAR 与 $GPP_{EC}$ 之间的关系则相对较弱，$R^2$ 的范围在 0.31（Sturt Plains）到 0.78（Adelaide River）之间，RMSE 则在 0.73 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ (Daly River)到 1.34 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（Howard Springs）之间（图 7.3）。

MODIS NDVI 与 $GPP_{EC}$ 之间的关系虽然较 $LAI_{MOD15}$ 和 $GPP_{EC}$ 之间的关系较弱，但是却比 $GPP_{MOD17}$ 或 $fPAR_{MOD15}$ 与 $GPP_{EC}$ 之间的关系要好，$R^2$ 分布在 0.54（Ti Tree）到 0.77（Adelaide River）之间，RMSE 则在 0.70 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ (Dry River 和 Ti Tree)到 1.21 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（Howard Springs）之间（图 7.4）。MODIS EVI 和 $GPP_{EC}$ 之间的关系非常好，在 Howard Springs（$R^2$ = 0.78）和 Ti Tree（$R^2$ = 0.69）两个站点上 EVI 和 GPP 之间的关系在几种 MODIS 产品中最好。并且，EVI 和 $GPP_{EC}$ 之间的关系非常稳定，$R^2$ 在所有六个站点上均在都在 0.65 以上，而 RMSE 则在 0.57 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ (Ti Tree) 到 0.93 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（Howard Springs）之间（图 7.5）。在六个站点上，$LAI_{MOD15}$ 和 $EVI_{MOD09}$ 和通量塔 GPP 之间的关系最好，其中 $EVI_{MOD09}$ 在四个站点上的 $R^2$ 最高且 RMSE 最低。

**表 7.2** NATT 研究区六个萨瓦纳站点上 MODIS 遥感产品和通量塔 GPP 之间的关系。表中的数字为每种遥感产品和 GPP 之间的确定性系数 $R^2$。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.001。$LST_{scaled}$ 为调整后的 MOD11 陆面温度（公式 7.6）；$R_{TOA}$ 为大气层之上太阳辐射（top-of-atmosphere solar radiation, W $m^{-2}$）。

Table 7.2 Summary of the regression analysis between EC tower measured GPP and MOD15A2 LAI/fPAR, NDVI/EVI, MOD17A2 GPP and the products of EVI and MOD11A2 LST, tower measured PAR, and $R_{TOA}$ at six NATT sites.

| 遥感产品 | Cross-sites | Howard Springs | Adelaide River | Daly River | Dry River | Sturt Plains | Ti Tree |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$LAI_{MOD15}$** | 0.80 | 0.70 | **0.90** | 0.71 | **0.76** | 0.45 | 0.64 |
| **$fPAR_{MOD15}$** | 0.70 | 0.49 | 0.78 | 0.67 | 0.52 | 0.31 | 0.43 |
| **$GPP_{MOD17}$** | 0.59 | 0.50 | 0.67 | 0.44 | 0.51 | 0.55 | 0.34 |
| **NDVI** | 0.75 | 0.62 | 0.77 | 0.69 | 0.62 | 0.74 | 0.54 |
| **EVI** | 0.83 | 0.78 | 0.83 | 0.71 | 0.65 | 0.79 | 0.69 |
| **EVI × $LST_{scaled}$** | 0.76 | 0.68 | 0.76 | 0.60 | 0.56 | 0.65 | 0.44 |
| **EVI × PAR** | 0.80 | 0.64 | 0.84 | 0.69 | 0.47 | 0.7 | 0.65 |
| **EVI × $R_{TOA}$** | **0.85** | **0.82** | 0.87 | **0.74** | 0.53 | **0.86** | **0.81** |

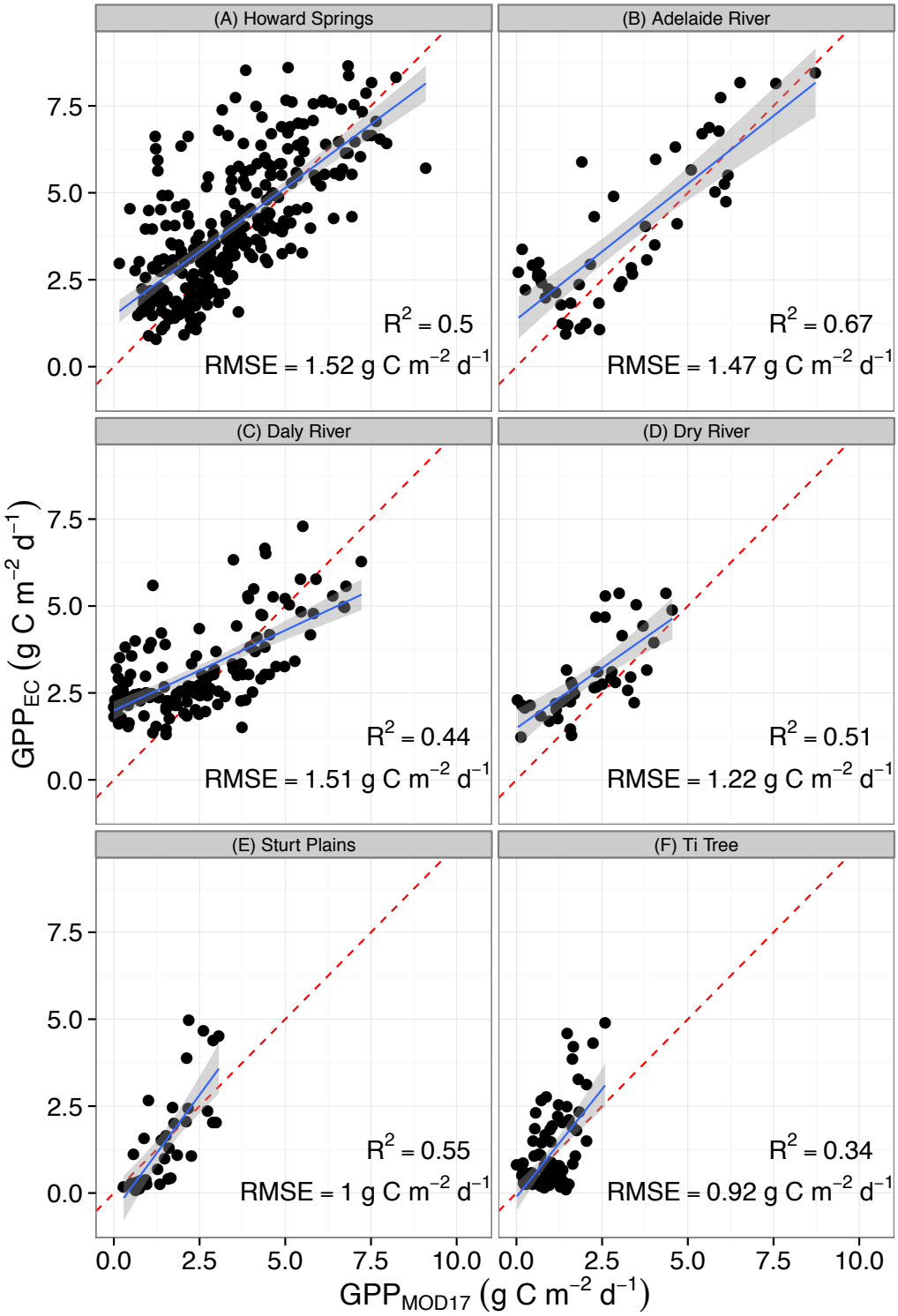


图 7.1 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上 MOD17A2 GPP（$GPP_{MOD17}$）和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。图上红色的虚线为 1:1 对称线。

Figure 7.1 Site-level relationships between MOD17 GPP ($GPP_{MOD17}$) and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. All $p < 0.0001$. Red dashed line is the 1:1 symmetric line, blue solid line is the linear regression line, and grey shaded area represents the confidence interval of the linear regression line.

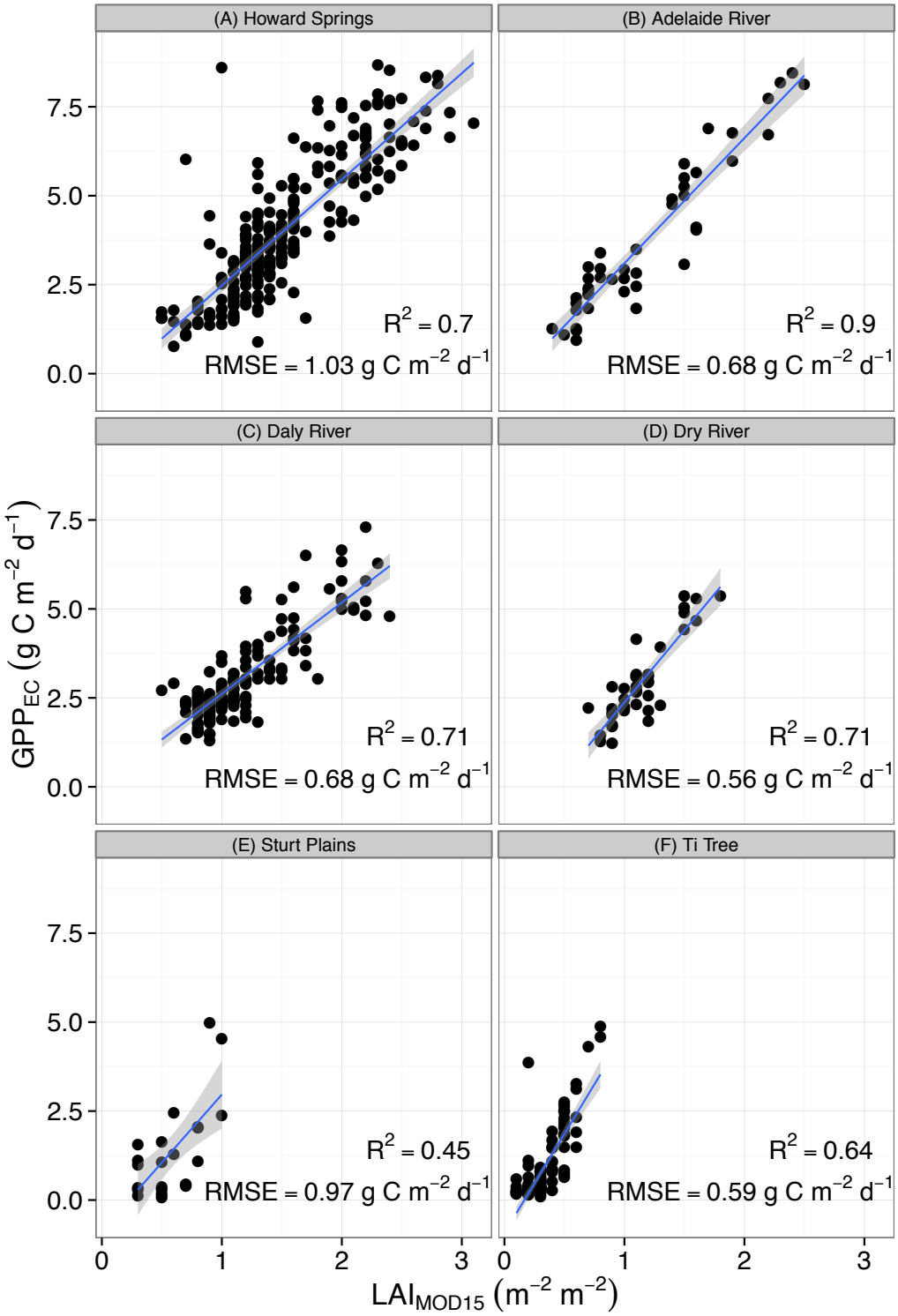


图 7.2 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上 MOD15A2 LAI（$LAI_{MOD15}$）和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。$R^2$ 在 Sturt Plains 站点上的显著性水平（p 值）小于 0.001，在其它站点上的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.2 Site-level relationships between MOD15 LAI ($LAI_{MOD15}$) and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. The p-value at Sturt Plains < 0.001, and the p-value at other sites < 0.0001. All satellite indices are at 8-d temporal resolution.

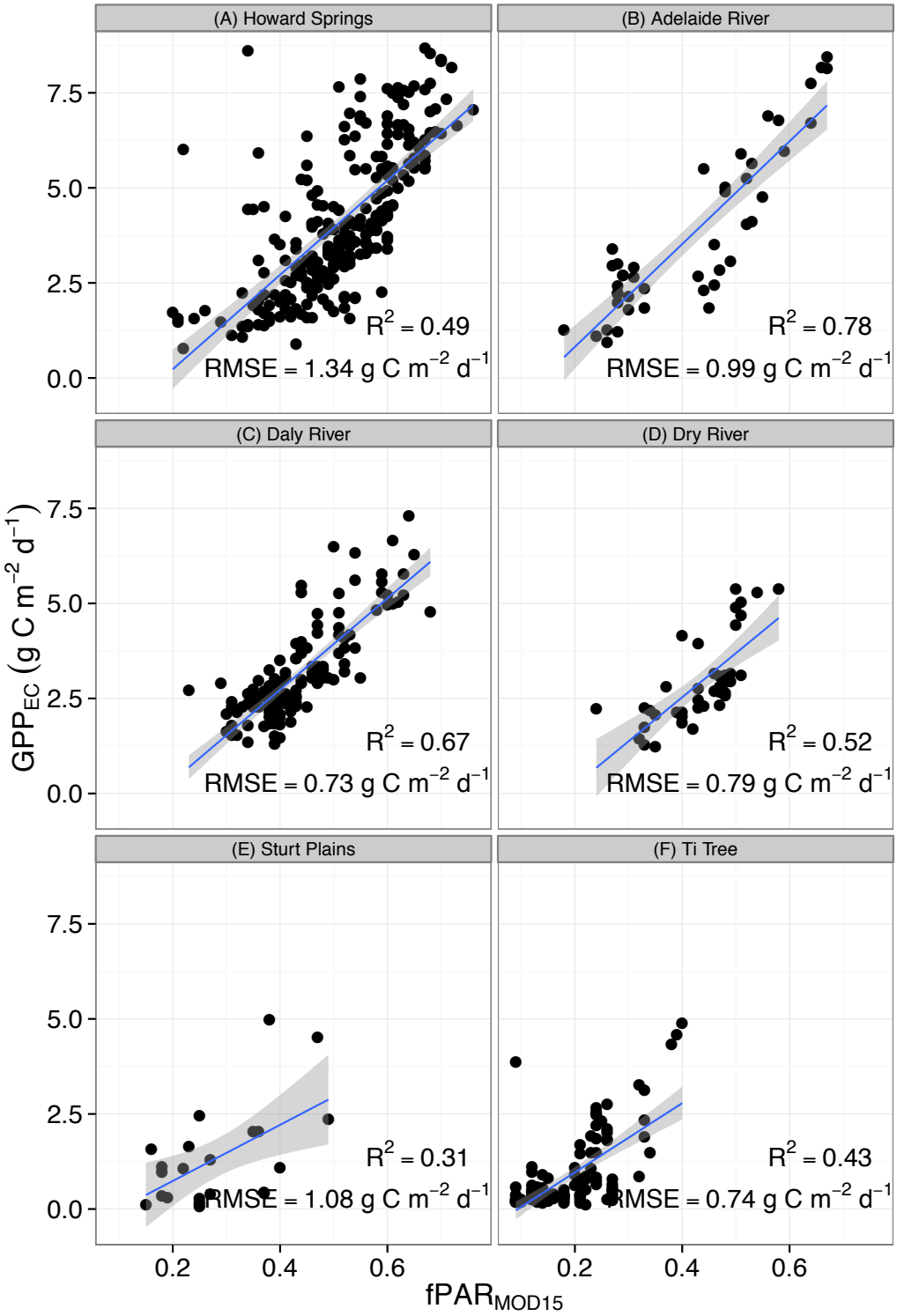


图 7.3 NATT 研究区六个萨瓦纳站点 MOD15A2 fPAR（$fPAR_{MOD15}$）和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。$R^2$ 在 Sturt Plains 站点上的显著性水平（p 值）小于 0.01，在其它站点上的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.3 Site-level relationships between MOD15 fPAR ($fPAR_{MOD15}$) and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. The p-value at Sturt Plains < 0.01, the p-value at other sites < 0.0001. All satellite indices are at 8-d temporal resolution.

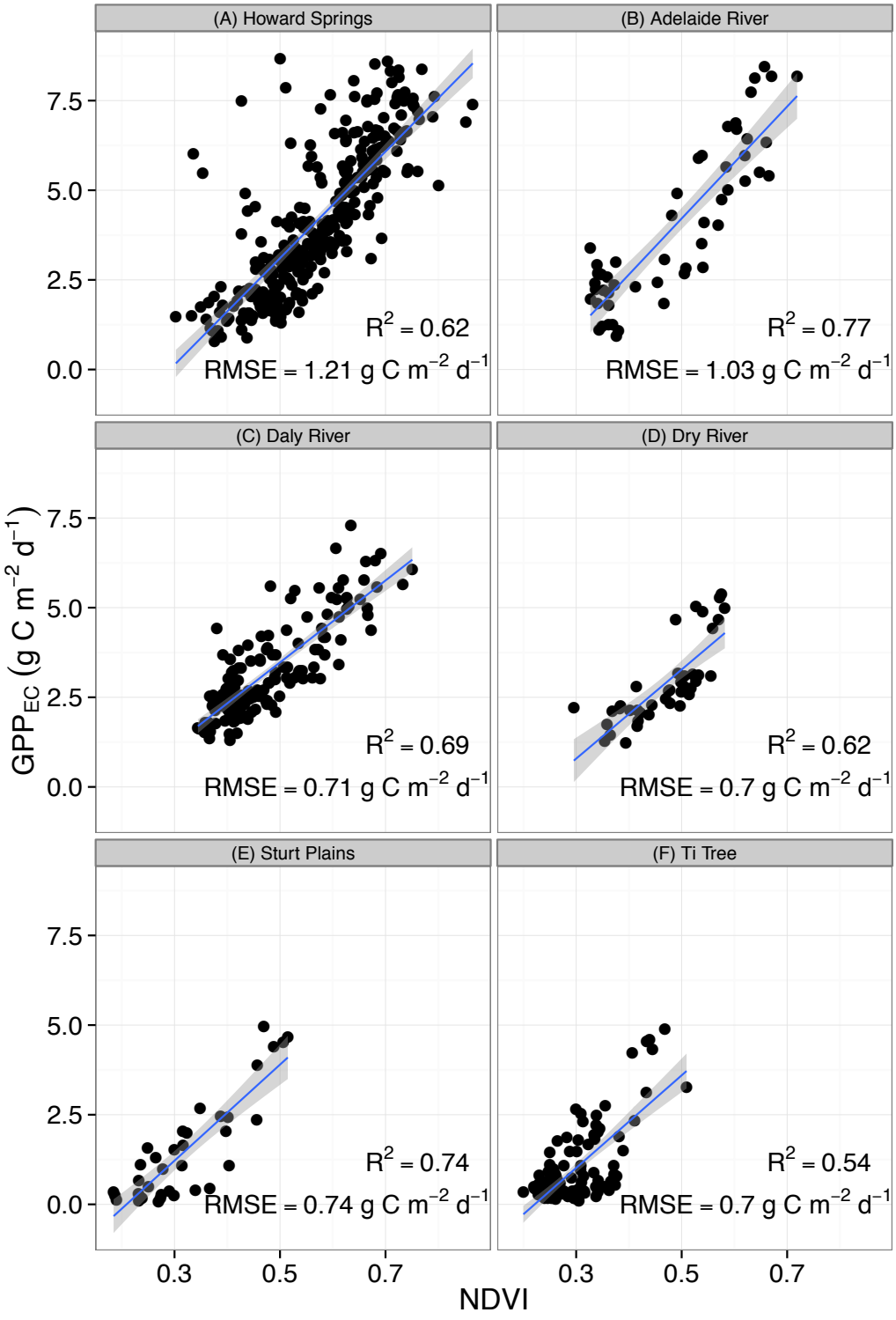


图 7.4 NATT 研究区六个萨瓦纳站点 MODIS NDVI 和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.4 Site-level relationships between MODIS NDVI and EC tower measured GPP (GPPEC) across six NATT sites. All $p < 0.0001$. All satellite indices are at 8-d temporal resolution.

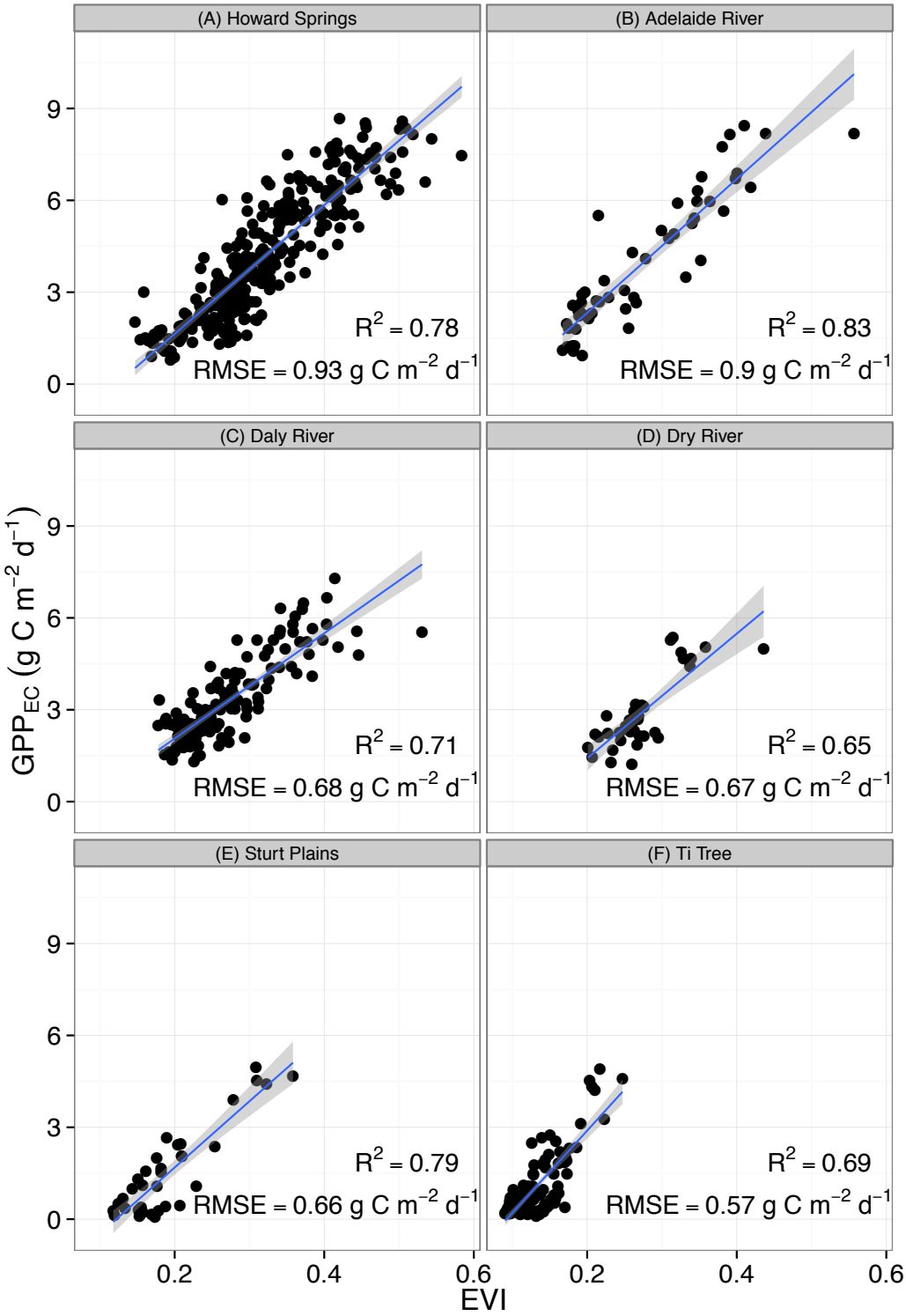


图 7.5 NATT 研究区六个萨瓦纳站点 MODIS EVI 和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.5 Site-level relationships between MODIS EVI and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. All $p < 0.0001$. All satellite indices are at 8-d temporal resolution.

图 7.6 显示了当把 NATT 六个通量站的 GPP 数据放在一起之后，五种 MODIS 产品和通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。从图上可以看到，$LAI_{MOD15}$，$fPAR_{MOD15}$ 和 $GPP_{MOD17}$ 在 8 天时间分辨率上分别可以解释 $GPP_{EC}$ 变异的 80%，70%和 59%，而 RMSE 则分别为 0.88, 1.1 和 1.4 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（图 7.6A-C）。而两种 MODIS 植被指数 NDVI 和 EVI，则分别能够在 8 天时间分辨率上解释 $GPP_{EC}$ 中 75%和 83%的变异，而 RMSE 则分别为 1.03 和 0.85 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（图 7.6D-E）。

表 7.3 将六个通量观测站的数据放在一起后，各个遥感产品和通量塔 GPP 之间的回归分析结果，包括确定系数（$R^2$），斜率，Y 轴截距和显著性水平（p 值）。$LST_{scaled}$ 为调整后的 MOD11 陆面温度（公式 7.6）；$R_{TOA}$ 为大气层之上太阳辐射（top-of-atmosphere solar radiation, W $m^{-2}$）。

Table 7.3 Summary of the cross-sites regression coefficients between $GPP_{EC}$ and satellite indices.

| 遥感产品 | Y 轴截距 | 斜率 | $R^2$ | 观测数目 | *p* 值 |
|---|---|---|---|---|---|
| **$LAI_{MOD15}$** | -0.1993 | 2.8467 | 0.80 | 612 | < 0.0001 |
| **$fPAR_{MOD15}$** | -1.4049 | 10.8363 | 0.70 | 612 | < 0.0001 |
| **$GPP_{MOD17}$** | 1.0789 | 0.7898 | 0.59 | 641 | < 0.0001 |
| **NDVI** | -2.8476 | 12.6051 | 0.75 | 713 | < 0.0001 |
| **EVI** | -1.7919 | 18.9125 | 0.83 | 713 | < 0.0001 |
| **EVI × $LST_{scaled}$** | 0.4560 | 19.2015 | 0.81 | 713 | < 0.0001 |
| **EVI × PAR** | 0.1735 | 0.0350 | 0.84 | 505 | < 0.0001 |
| **EVI × $R_{TOA}$** | 0.3070 | 0.0192 | 0.85 | 713 | < 0.0001 |

从图 7.6 上可以看到，$GPP_{MOD17}$ 和 $GPP_{EC}$ 之间关系的离散程度非常高（图 7.6A），且对 $GPP_{EC}$ 存在一定程度的低估。譬如在 Howard Springs 站，$GPP_{EC}$ 的平均值为 4.46±1.99 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，而 $GPP_{MOD17}$ 的平均值为 3.49±1.80，$GPP_{MOD17}$ 对 $GPP_{EC}$ 的低估达到了 22%。而在 Ti Tree 站，$GPP_{EC}$ 的平均值为 1.16±1.19 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，而 $GPP_{MOD17}$ 的平均值为 0.86±0.47 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$,$GPP_{MOD17}$ 对 $GPP_{EC}$ 的低估达到了 26%。

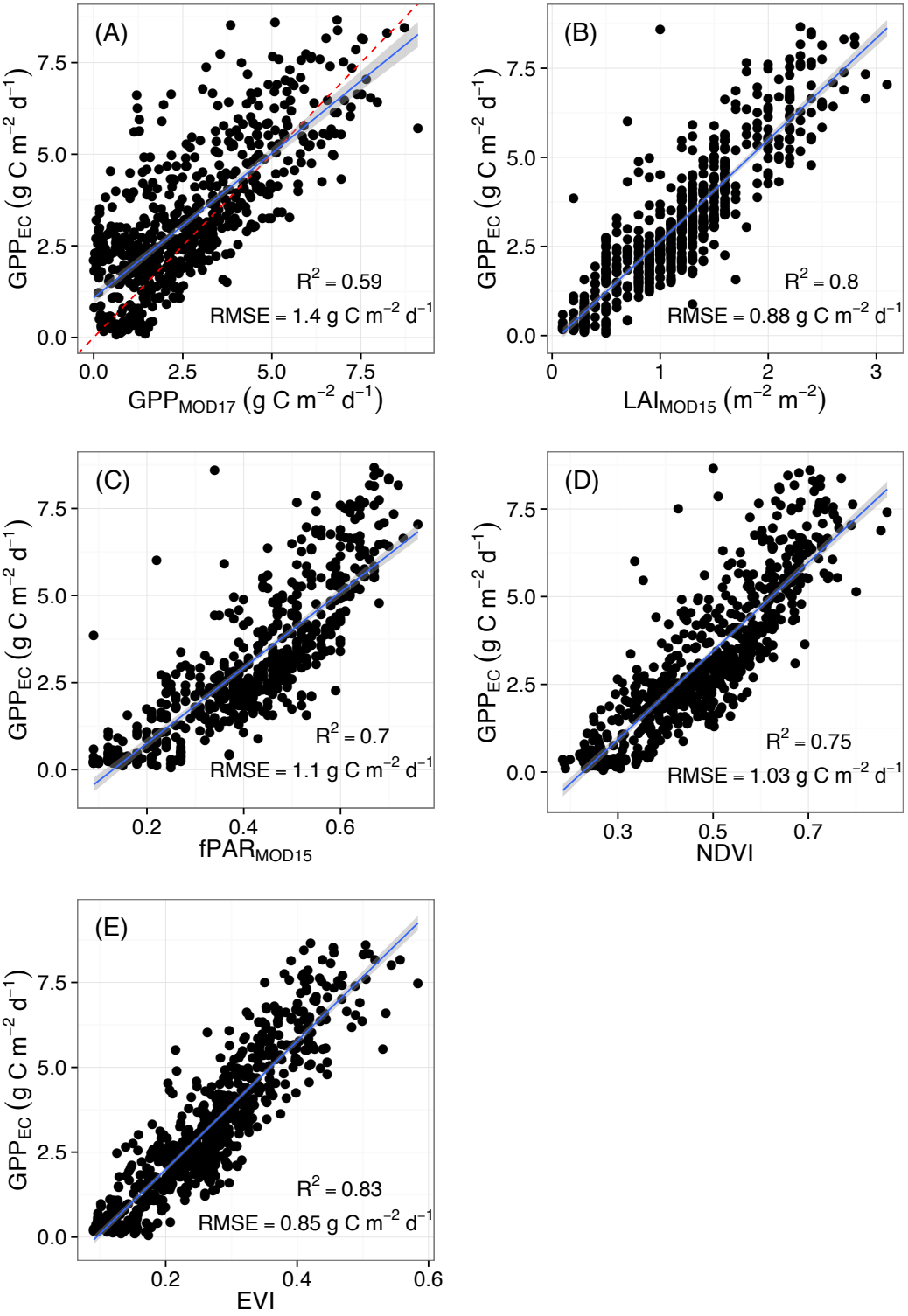


图 7.6 NATT 研究区六个萨瓦纳站点的数据放在一起之后，五种 MODIS 遥感产品和通量塔 GPP 之间的关系，包括 MOD17 GPP（$GPP_{MOD17}$），MOD15 LAI（$LAI_{MOD15}$），MOD15 fPAR（$fPAR_{MOD15}$），NDVI 和 EVI。图（A）上的红色虚线为 1：1 对称线。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.6 Cross-sites relationships between $GPP_{MOD17}$, $LAI_{MOD15}$, $fPAR_{MOD15}$, NDVI/EVI and $GPP_{EC}$ across six NATT sites. The red dashed line in panel (A) is the 1:1 symmetric line.

从图 7.6 上同时可以看到，$fPAR_{MOD15}$ 和 NDVI 在 GPP 较高（> 5 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）的时候出现了一定的饱和现象（图 7.6C-D），而 $LAI_{MOD15}$ 和 EVI 在在整个 $GPP_{EC}$ 动态范围内均保持了较为稳定的线性关系（图 7.6B，E）。

### 7.3.2 基于 EVI 的 GPP 反演模型对通量塔 GPP 的预测效果

除了比较单个 MODIS 产品和通量塔 GPP 之间的关系之外，本章同时比较了基于 EVI 的几种遥感 GPP 模型在萨瓦纳研究区的效果。结果显示，将 EVI 和气象要素结合起来之后，对 $GPP_{EC}$ 的模拟能力并没有在所有站点上都得到普遍的提高（图 7.7-图 7.9）。譬如说将 EVI 和 $LST_{scaled}$ 结合起来之后（EVI × $LST_{scaled}$，亦即温度和绿度模型，TG 模型），在所有六个 NATT 站点上与 $GPP_{EC}$ 之间的关系相比 EVI 和 $GPP_{EC}$ 之间的关系甚至要更差（图 7.7）。

然而，将 EVI 和 PAR 结合之后（EVI × PAR，亦即辐射和绿度模型，RG 模型），在两个站点上提高了和 $GPP_{EC}$ 之间的相关性并降低了 RMSE，包括 Adelaide Rivers（$R^2$ = 0.75, $p$ < 0.0001, RMSE = 0.83 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）和 Ti Tree（$R^2$ = 0.79, $p$ < 0.0001）（图 7.8）。将 EVI 和大气层之上太阳辐射 $R_{TOA}$ 结合起来之后（EVI × $R_{TOA}$，亦即本论文提出的辐射和光合能力模型，RPC 模型），在其中五个站点上对 $GPP_{EC}$ 的模拟效果均相比较仅使用 EVI 的回归模型提高了 $R^2$ 并降低了 RMSE（图 7.9）。

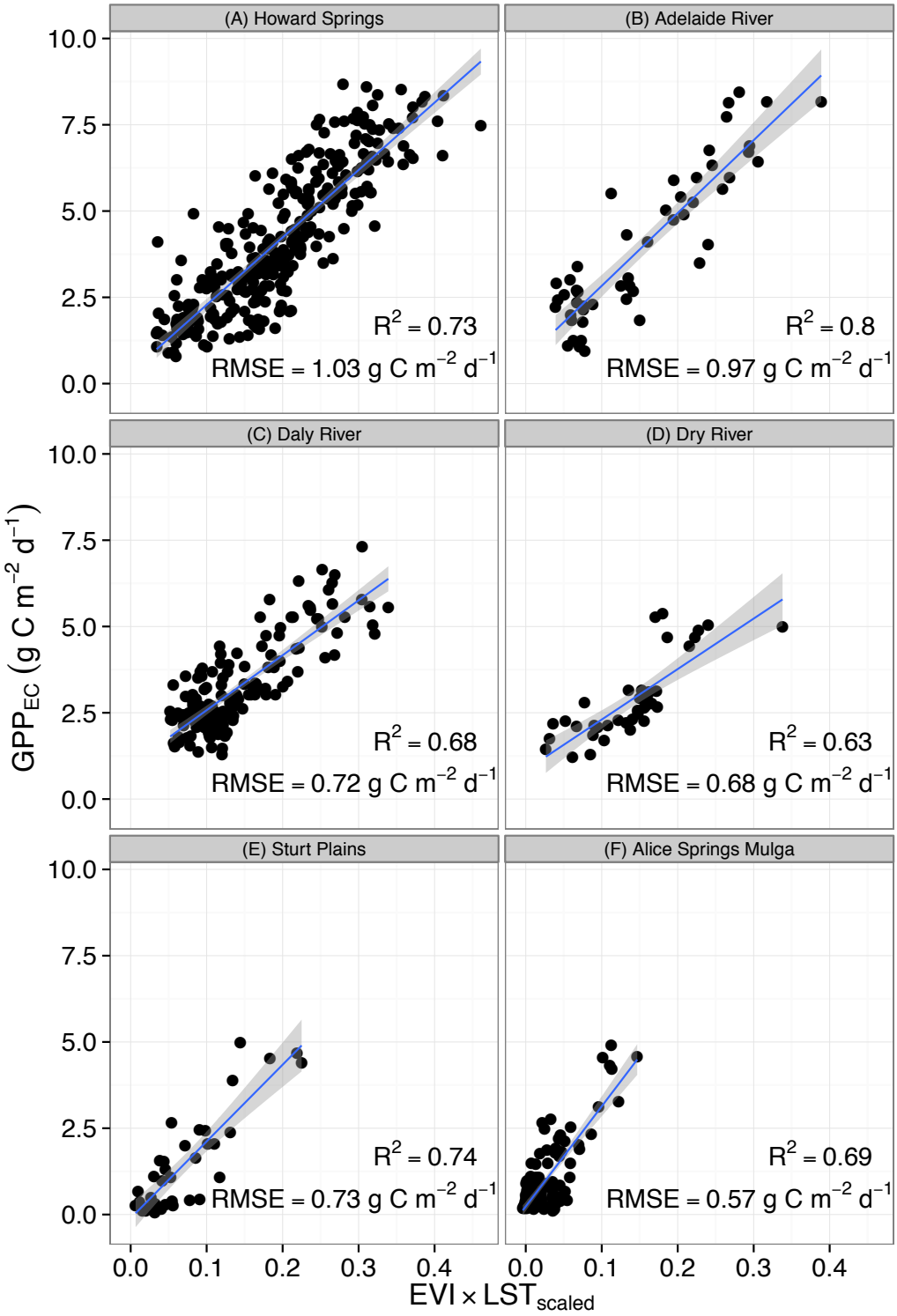


图 7.7 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上 EVI × $LST_{scaled}$（温度和绿度模型，亦即 TG 模型）和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.7 Site-level relationships between EVI × $LST_{scaled}$ (TG model) and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. All $p < 0.0001$. All satellite indices are at 8-d temporal resolution.

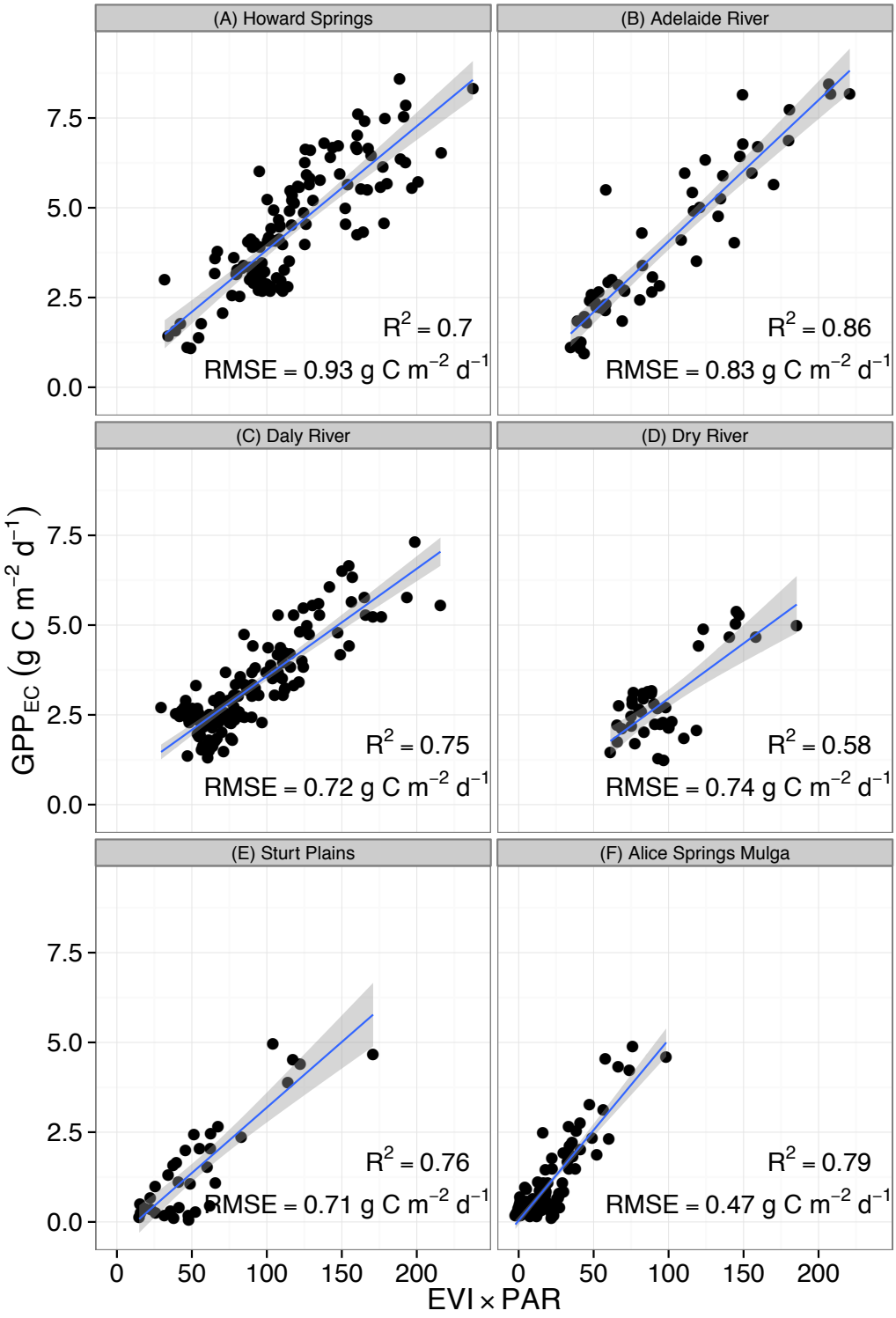


图 7.8 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上 EVI × PAR（辐射和绿度模型，亦即 GR 模型）和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.8 Site-level relationships between EVI × PAR (RG model) and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. All $p < 0.0001$. All satellite indices are at 8-d temporal resolution.

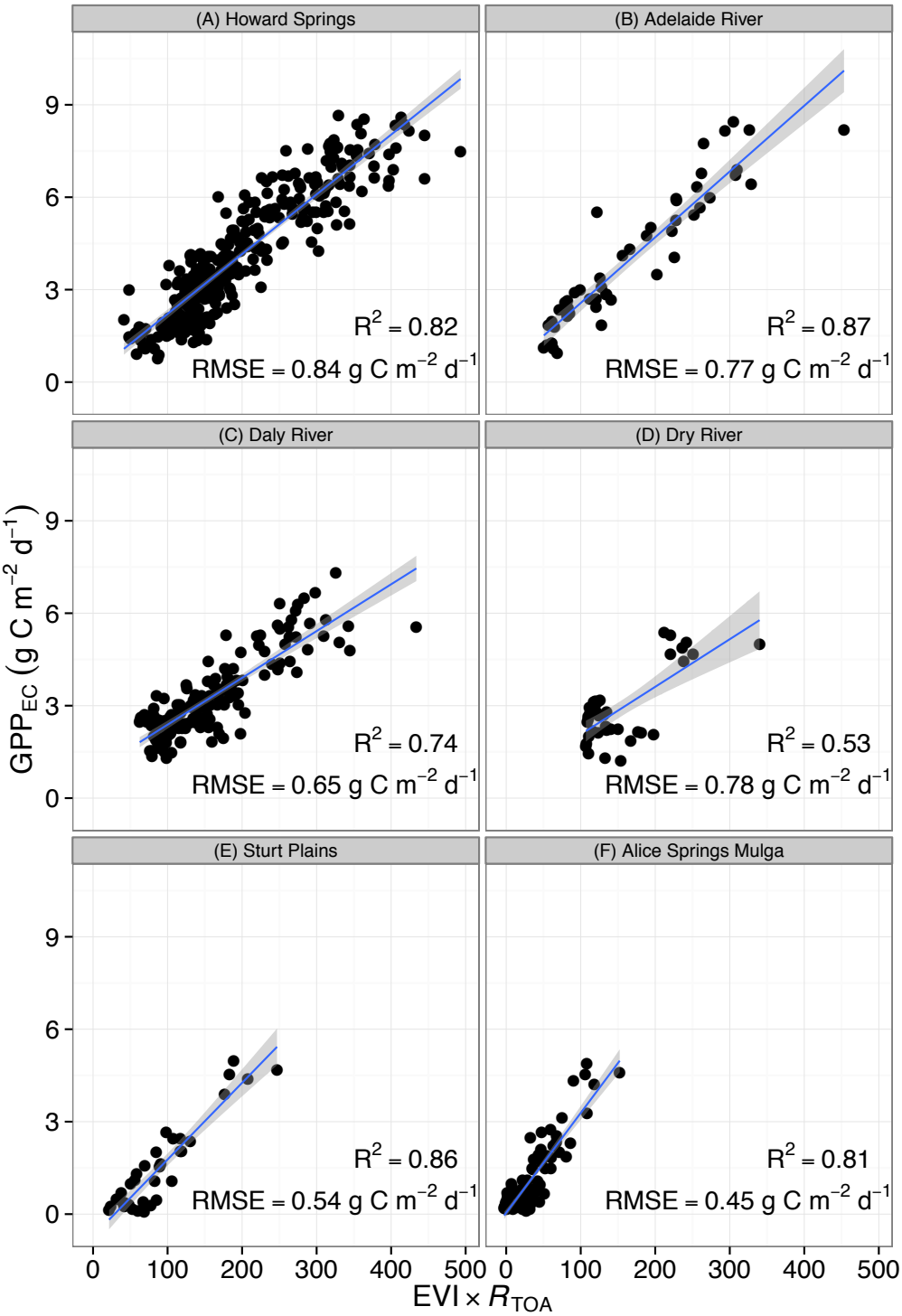


图 7.9 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上 EVI × $R_{TOA}$（辐射和光合能力模型，亦即 RPC 模型）和 EC 通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间的关系。$R_{TOA}$（W $m^{-2}$）为大气层之上太阳辐射（top-of-atmosphere solar radiation）。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.9 Site-level relationships between EVI × $R_{TOA}$ and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. All $p < 0.0001$. All satellite indices are at 8-d temporal resolution. $R_{TOA}$ (W $m^{-2}$) is the top-of-atmosphere solar radiation.

图 7.10 显示了当把六个站点的通量数据放在一起之后，对基于 EVI 的遥感 GPP 反演模型和通量塔 GPP 之间关系的比较。为了方便比较，图 7.10 上同时显示了 EVI 和 $GPP_{EC}$（图 7.10A），以及 $GPP_{MOD17}$ 和 $GPP_{EC}$（图 7.10B）之间的关系。结果显示 TG 模型（$EVI \times LST_{scaled}$）能够解释 $GPP_{EC}$ 中 81%的变异（$p < 0.0001$），且 RMSE 为 0.9 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，优于 $GPP_{MOD17}$（$R^2 = 0.59$, $p < 0.0001$, RMSE = 1.40 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$），但是比 EVI 要差（$R^2 = 0.83$, $p < 0.0001$, RMSE = 0.85 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）（图 7.10C）。相比较，RG 模型（$EVI \times PAR$）能够解释 $GPP_{EC}$ 中 84%的变异（$p < 0.0001$），RMSE 为 0.8 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，比 EVI、$GPP_{MOD17}$ 和 TG 模型的表现都要好（图 7.10D）。而本论文提出的 RPC 模型（$EVI \times R_{TOA}$）则能够解释 $GPP_{EC}$ 中 85%的变异（$p < 0.0001$），RMSE 为 0.78 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 是本次研究中所有比较过的 MODIS 遥感产品或 GPP 模型中对通量塔 GPP 模拟效果最好的（图 7.10E）。

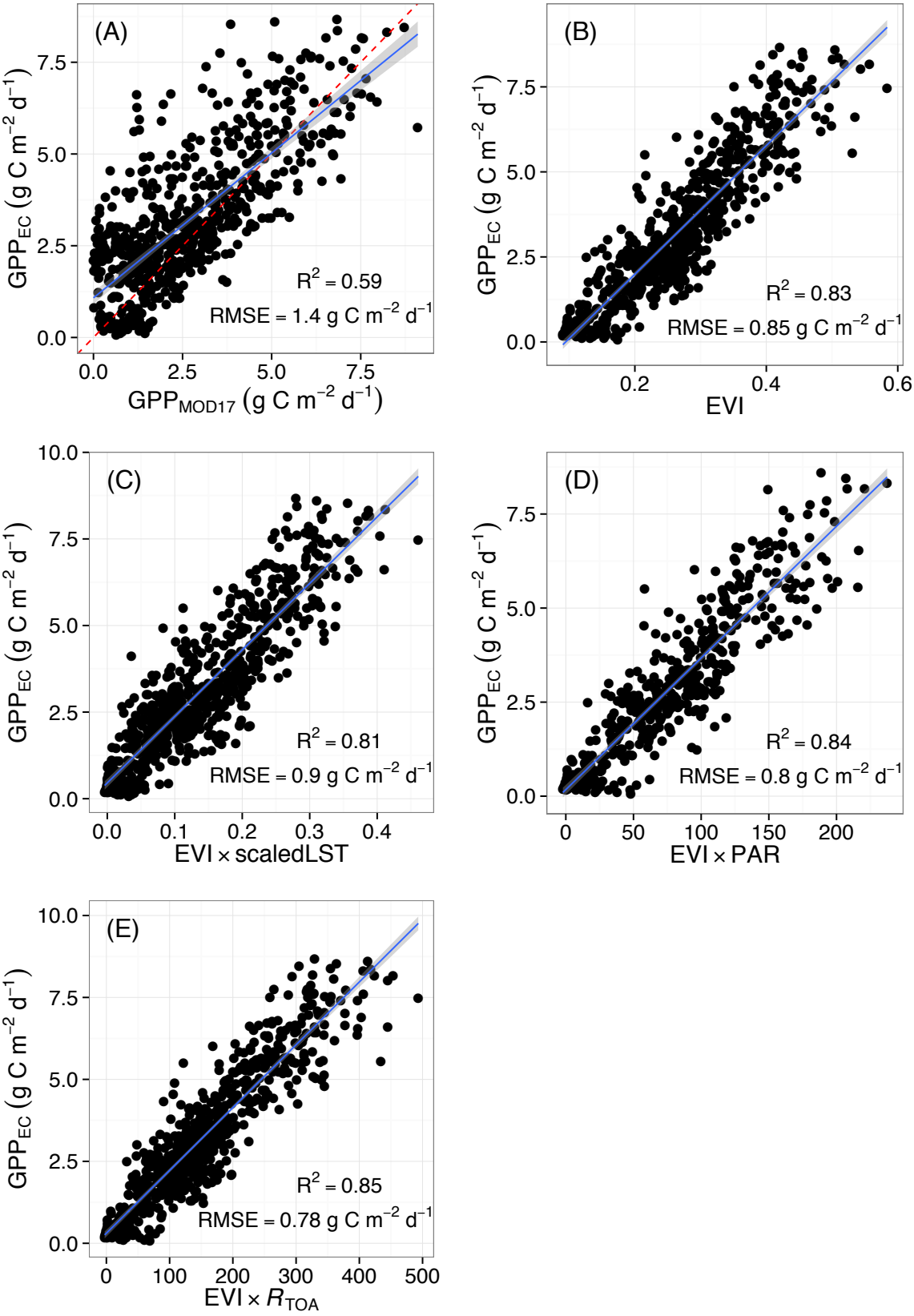


图 7.10 NATT 研究区六个萨瓦纳站点的通量数据放在一起之后，遥感 GPP 模型和通量塔 GPP（$GPP_{EC}$）之间

的关系。（A）和（B）分别为 $GPP_{MOD17}$ 和 EVI 与 $GPP_{EC}$ 之间的关系。（C）EVI × $LST_{scaled}$（TG 模型）；（D）EVI × PAR（TG 模型）；（D）EVI × $R_{TOA}$（RPC 模型）。所有 $R^2$ 的显著性水平（p 值）均小于 0.0001。

Figure 7.10 Site-level relationships between GPP simulated using EVI , RTOA and LSTday-night, and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. All p < 0.0001. Red dashed line is the 1:1 symmetric line. For comparison, panel (A) and (B) show the relationships between $GPP_{MOD17}$ and EVI with $GPP_{EC}$ respectively.

基于以上的分析，在所有本次研究中比较过的遥感产品和 GPP 反演模型之中，EVI 和 $R_{TOA}$ 结合起来之后（亦即 RPC 模型）对 $GPP_{EC}$ 的预测能力最好，包括在湿润萨瓦纳站点（譬如 Howard Springs）以及干旱萨瓦纳站点（Ti Tree）。因此，在 NATT 研究区，区域尺度上的 GPP 可以通过 RPC 模型来进行估算。通过将六个通量站的 GPP 数据和 EVI×$R_{TOA}$ 进行回归分析，可以得到以下经验模型：

$$\mathrm{GPP} = (\mathrm{EVI} - d) \times R_{\mathrm{TOA}} \times 0.0416 + 0.307 \tag{7.11}$$

其中 $R_{TOA}$（W $m^{-2}$）为大气层之上太阳辐射（top-of-atmosphere solar radiation）；GPP 的单位为 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$；$d$ 为一个调节参数，以去除土壤背景对 EVI 的贡献。$d$ 可以通过将 GPP 和 EVI 之间的线性回归模型进行反推（inversion）而得到，亦即当 GPP 为 0 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 时 EVI 的大小。本次研究中估算出 $d$ 的大小为 0.09。

### 7.3.3 遥感计算 GPP 和通量测量 GPP 之间时间序列的比较

图 7.11 显示了用 RPC 模型（公式 7.11）模拟的 GPP（以下简称为 $GPP_{RPC}$）时间序列在 NATT 六个通量站点上与 $GPP_{EC}$ 时间序列之间的对比。可以看到 $GPP_{RPC}$ 和 $GPP_{EC}$ 之间的无论是在量值大小还是季节性上的契合程度都非常好（图 7.11）。同时，误差分析显示 RPC 模型对 $GPP_{EC}$ 的误差 RMSE 为 0.78 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（表 7.3）。相比较，$GPP_{MOD17}$ 对 $GPP_{EC}$ 的误差 RMSE 为 1.40 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（表 7.3）。

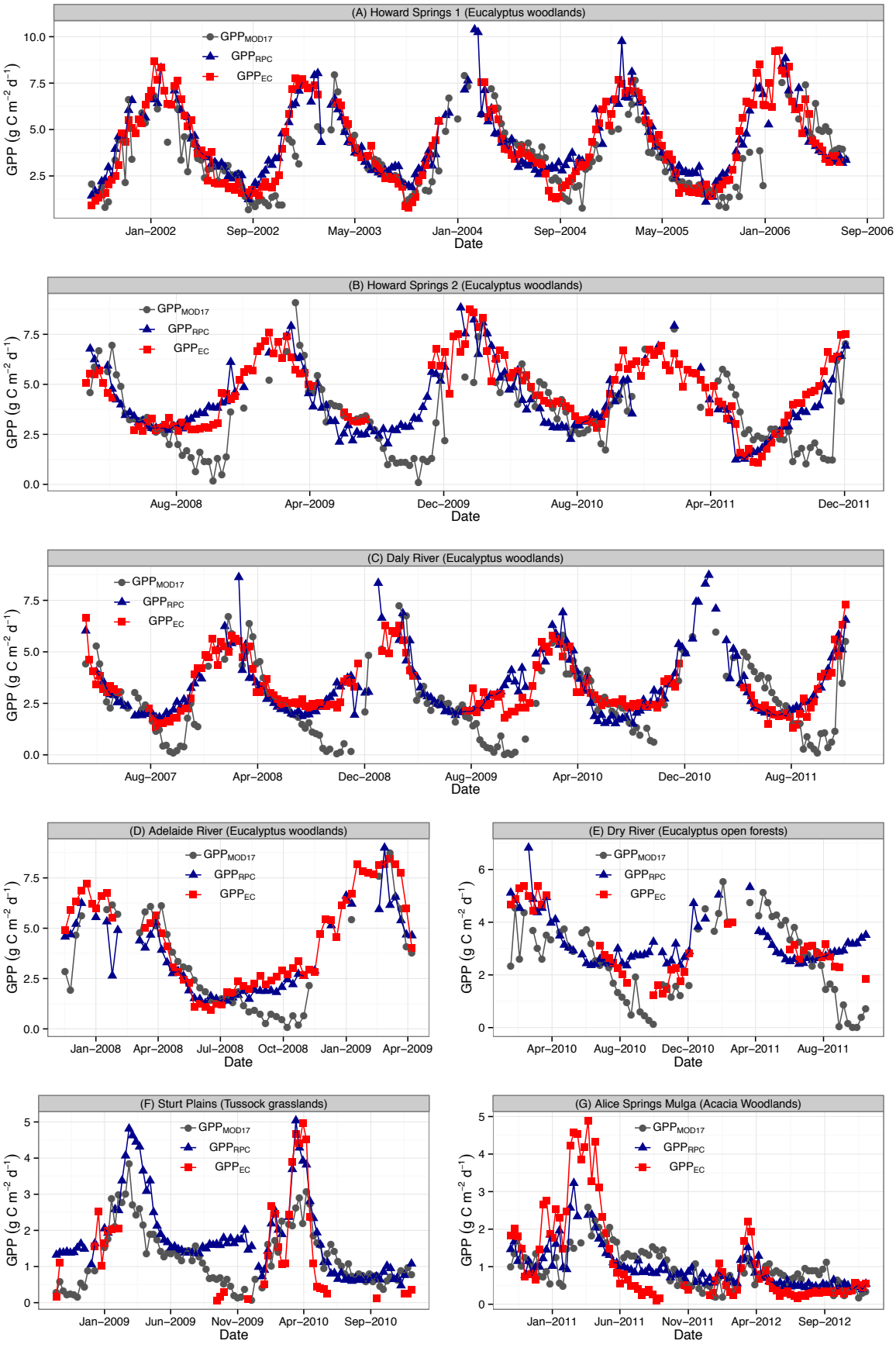
(A) Howard Springs 1 (Eucalyptus woodlands)
(B) Howard Springs 2 (Eucalyptus woodlands)
(C) Daly River (Eucalyptus woodlands)
(D) Adelaide River (Eucalyptus woodlands)
(E) Dry River (Eucalyptus open forests)
(F) Sturt Plains (Tussock grasslands)
(G) Alice Springs Mulga (Acacia Woodlands)
GPP_MOD17
GPP_RPC
GPP_EC
GPP (g C m⁻² d⁻¹)
Date

图 7.11 NATT 研究区六个萨瓦纳站点遥感估算 GPP 和 EC 通量塔测量的 GPP 之间的时间序列比较。图上 $GPP_{MOD17}$ 为 MOD17 GPP，$GPP_{RPC}$ 为 RPC 模型（Eq. 7.11）计算出的 GPP，$GPP_{EC}$ 为通量塔测量 GPP。

Figure 7. 11 Time series comparison between GPP simulated using EVI × RTOA ($GPP_{RPC}$), MOD17 GPP ($GPP_{MOD17}$) and EC tower measured GPP ($GPP_{EC}$) across six NATT sites. All data are at 8-d temporal resolution.

### 7.3.4 遥感反演萨瓦纳区域 GPP 的空间分布

图 7.12 显示了用 RPC 模型（公式 7.11）估算的整个 NATT 地区从 2000 年到 2013 年间年平均 GPP（g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）的空间分布模式。从图上可以看到在 NATT 研究区，植被生产力（GPP）呈现出从北到南显著减少的趋势（图 7.12）。GPP 在北部沿海地区受澳大利亚夏季季雨影响较强的部分最高，普遍达到了 1500 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 以上（图 7.12），该地区的主要植被类型为桉树森林和桉树林地。而 GPP 在南部干旱内陆地区最低，大约在 500 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 以下（图 7.12），该地区的主要植被类型为圆丘草地、合金欢林地和灌木林。回顾第二章图 2.2 和图 2.4 所描述的降水在 NATT 地区的空间分布，可以看到 GPP 和降水量的空间变化趋势几乎一致，说明了降水对萨瓦纳植被生产力的决定性作用。

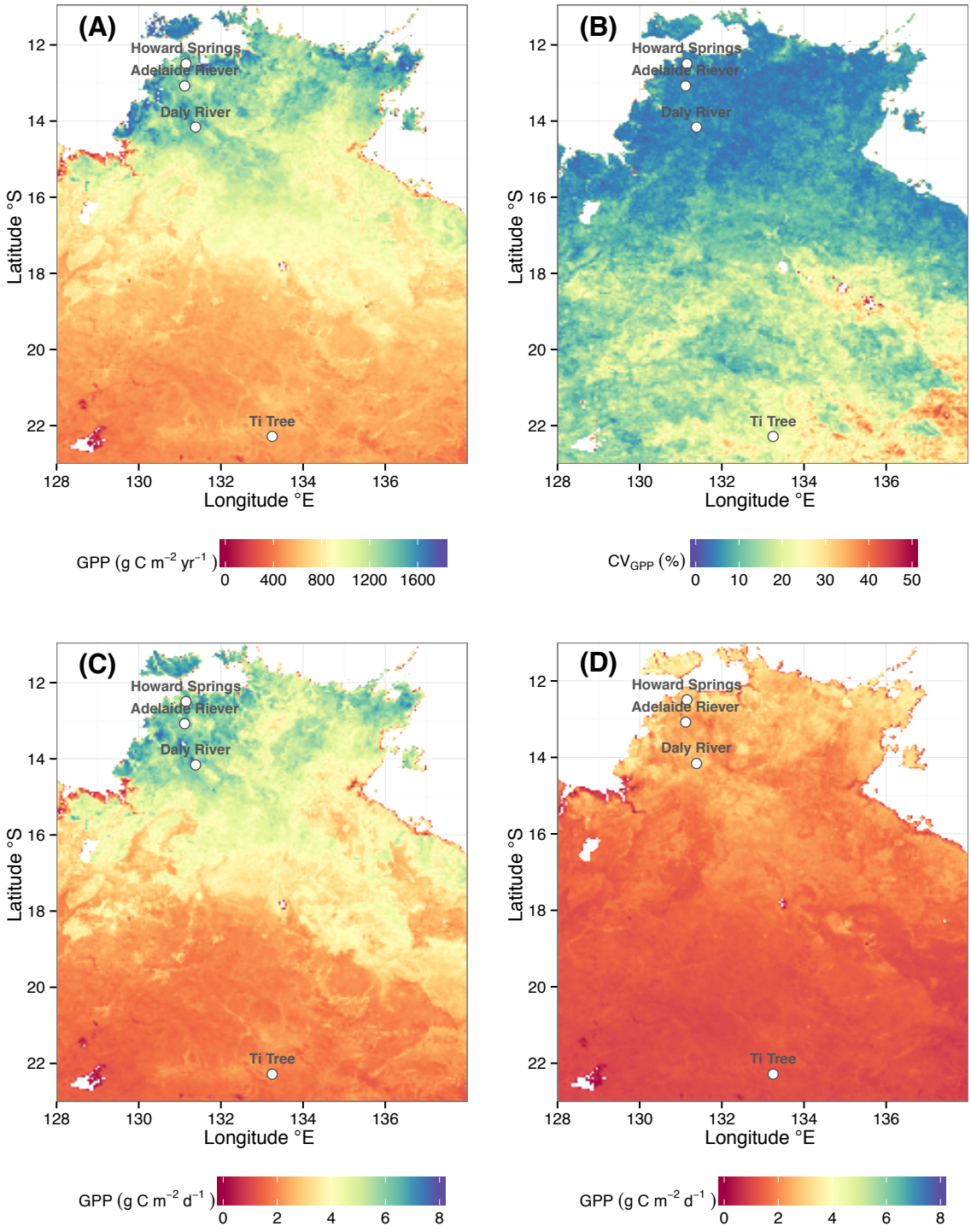


图 7.12 NATT 研究区使用 RPC 模型（EVI×$R_{TOA}$，公式 7.11）计算的萨瓦纳 GPP 的空间模式，2000-2012。（A）年平均 GPP（g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）；（B）GPP 的年际变异系数（$CV_{GPP}$，%）；（C）雨季（一月至三月）日平均 GPP（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）；（D）旱季（七月至九月）日平均 GPP（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。

Figure 7.12 Biogeographic patterns of GPP over the NATT study area during 2000-2013. (1) Mean annual GPP (g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$); (B) coefficient of variance (CV, %) of annual GPP; (C) Mean daily GPP (g C $m^{-2}$ $d^{-1}$) during the wet season (January-March); (D) mean daily GPP (g C $m^{-2}$ $d^{-1}$) during the dry season (July-September).

## 7.4 讨 论

### 7.4.1 使用遥感观测对通量塔 GPP 进行区域上的尺度拓展

在 NATT 萨瓦纳研究区，本论文发现在所有五种 MODIS 产品中，MODIS EVI 与通量塔 GPP 之间的关系当把六个站点的数据放在一起之后最好（$R^2$ = 0.83, $p$ < 0.0001, RMSE = 0.85 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ ）。通过进一步将 EVI 和大气层之上太阳辐射（$R_{TOA}$）结合起来，与通量塔 GPP 之间的关系得到了进一步的增强（$R^2$ = 0.85, $p$ < 0.0001, RMSE = 0.78 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。这些结果说明在区域尺度上，萨瓦纳 GPP 可以在不需要依赖任何地面插值气象数据，也不需要估算各个植被类型的光能利用效率（LUE）的情况下，完全使用遥感数据（MODIS EVI 和 $R_{TOA}$）来进行相对准确的估算。

本章研究发现作为全球 MODIS GPP 产品，MOD17 在 NATT 萨瓦纳地区与通量塔 GPP 之间的关系很一般（$R^2$ = 0.59, $p$ < 0.0001, RMSE = 1.40 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。所有本论文比较过的其它 MODIS 产品与通量塔 GPP 之间的关系都要优于 MOD17 GPP 产品与通量塔 GPP 之间的关系。这样的结果可以说有些出乎意料，因为基于 LUE 的 MOD17 GPP 模型需要包括 fPAR、LUE、温度、VPD、植被类型、PAR 等多种输入参数，而其在 NATT 的六个站点上的结果显示，其与 GPP 之间的关系只在其中的一个站点上比 MOD15 fPAR 更好，而 MOD15 fPAR 只是 MOD17 GPP 众多输入参数中的其中之一。这样的结果说明，增加模型的复杂度并引入过多的输入数据并不一定能够增加模型的模拟精度，因为每种输入数据都会带来一定的不确定性，这些误差将会增加最终计算出的 GPP 的不确定性。

在澳大利亚另外两个萨瓦纳站点上，Leuning 等（2005）发现 MOD17 GPP 产品和通量 GPP 之间的关系主要归因于 GPP 和 LAI 之间较强的关系，而 APAR 则解释了通量 GPP 变异中最多的部分。Leuning 等（2005）进一步发现在模型中增加温度限制和湿度亏缺调节因子并不能提高 LUE 模型对 GPP 的模拟精度。在澳大利亚北部萨瓦纳地区，Cernusak 等（2011）的研究发现主导萨瓦纳生态系统间碳水交换的主要因素是 LAI 而不是 LUE。在 Howard Springs，Kanniah 等（2011）发现温度并非限制萨瓦纳植被光能利用效率的主要因素，并且 VPD 与 LUE 之间的关系在雨季很一般。而另一方面，LUE 与土壤水分含量之间的关系非常好，特别是在旱季（Kanniah et al., 2011）。但是 MOD17 GPP 产品并没有考虑土壤水分对植被光合的限制，这严重限制其在萨瓦纳地区对 GPP 的模拟精度，特别是干旱和半干旱萨瓦纳（Kanniah et al., 2009）。

在 NATT 降水样带最南端的干旱萨瓦纳站点 Ti Tree，Cleverly 等（2013）发现 $C_3$ 树木（*Acacia aneura*）和 $C_4$ 草地的生长主要在间雨期（inter-storm periods），因为这段时间既有充足的太阳辐射，同时土壤中也有足够的水分含量。在这样干旱的气候条件下，萨瓦纳植被在间雨期光合速率既不受高温的限制，也不受高 VPD 的限制（Cleverly et al., 2013）。这些说明了在模型中准确参数化环境要素对萨瓦纳植被光合

作用的影响非常困难。

在北半球温带生态系统，研究发现将 EVI 和 LST 或者 PAR 结合起来之后，对通量塔 GPP 的预测能力可以得到显著的提高（Gitelson et al., 2006; Sims et al., 2008; Wu et al., 2011; Peng et al., 2013）。譬如在北美洲温带地区，Sims 等 (2008)发现将 EVI 和 LST 结合（亦即 TG 模型），可以极大的提高对 GPP 的预测能力。但是本论文在 NATT 地区的研究发现，相比较仅使用 EVI，使用 TG 模型降低了对萨瓦纳 GPP 的预测能力（图 7.10）。Wu 等(2011)发现将 EVI 和 PAR 结合（亦即 RG 模型）可以提供比 TG 模型对 GPP 更好的模拟效果。在 NATT 地区，RG 模型的确能在三个站点上提高对 GPP 的模拟能力。当把所有六个站点的数据放在一起之后，EVI×PAR 和 GPP 之间的 $R^2$ 为 0.84，相比较 EVI 与 GPP 之间的关系（$R^2$ = 0.83）有所提高。这样的结果说明相比较 TG 模型（EVI × $LST_{scaled}$），RG 模型可以在更为多样的生态系统上（包括温带植被和热带萨瓦纳）提供对站点和区域 GPP 更为准确的估算。

本章研究发现将 EVI 和大气层之上太阳辐射（$R_{TOA}$）结合（亦即 RPC 模型）与通量塔 GPP 之间的关系非常好（$R^2$ = 0.85），并且模拟误差也是所有模型中最小的（RMSE = 0.78 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$），甚至优于将 EVI 和通量塔测量的 PAR 所结合的 RG 模型。Gitelson 等(2012)在农田生态系统上的研究也发现，将 EVI 和潜在 PAR（$PAR_{potential}$，亦即在某一段时间内 PAR 在大气层中云层和气溶胶量最小时的 PAR）结合起来之后，对通量塔 GPP 的模拟效果要比直接将 EVI 和瞬时 PAR 结合（亦即 RG 模型）更好。后续的研究可以进一步从机理上分析为何使用 EVI×$R_{TOA}$ 对 GPP 的模拟效果要优于 EVI×PAR 的原因，以更好地将遥感观测和通量塔测量结合起来实现对区域上萨瓦纳植被生产力的准确模拟。

### 7.4.2 EVI 作为反映植被生产力简单有效的遥感光谱指数

本章研究发现 EVI 作为一个遥感光谱指数，其在 NATT 研究区所有六个萨瓦纳站点上和通量塔 GPP 之间均存在较强的关系。基于对遥感和植物生理方面的认识，EVI 和 GPP 之间的关系主要是因为以下原因。第一，植被指数和植物吸收光合有效辐射 APAR 之间存在着一定程度的线性关系（Sellers, 1987; Glenn et al., 2008），进一步和冠层尺度上依赖光照的生理过程，譬如光合和蒸散之间存在较好的关系（Glenn et al., 2008）。第二，植被指数本身包含了环境要素对植被生长影响的信息，譬如水分亏缺压力等（Prince & Goward, 1995; Schloss et al., 1999）。由于植物光合速率和植物吸收光合有效辐射之间存在线性关系（McKee, 1971; Monteith, 1972），因此植被指数和冠层光吸收之间的紧密关系在一定程度上解释了为什么植被指数和 GPP 之间有较强的关系。

EVI 和 GPP 之间的关系在已经在许多不同的自然生态系统和农田上被发现（譬如农田：Wang et al., 2010; 灌木蒿-干草原：Wylei et al., 2003; 常绿阔叶灌丛：Sims et

al., 2006, 2008;热带森林：Huete et al., 2006, 2008; 常绿针叶林：Xiao et al., 2004; 温带落叶林：Rahman et al., 2005; Olofsson et al., 2008; Nagai et al., 2009）。在全球萨瓦纳地区，本章在澳大利亚萨瓦纳地区的研究与 Sjöstroöm 等(2011)在非洲萨瓦纳的研究共同证实，萨瓦纳植被的 GPP 可以通过基于 EVI 的遥感模型来进行较为准确的估算。随着更多通量和卫星观测数据的积累，可以将这两种独立的数据源结合起来，以提高我们对全球陆地生态系统植被生产力的估算能力（Huete et al., 2008）。随着超过 30 年的遥感数据积累（Tucker et al., 2004），和正在快速发展的遥感卫星譬如 VIIRS，植被指数可以继续和地面测量作为互补，在诸如农作物产量估算、生态系统适应力和全球变化研究中发挥重要作用（Justice et al., 2013; Zhang et al., 2013; Ponce Canpos et al., 2013; Ichii et al., 2013; Vicente-Serrano et al., 2013）。

## 7.5 结 论

如何将通量塔在站点尺度上测量得到的生态系统过程（譬如 GPP 和 ET 等）通过尺度拓展外插到区域尺度，是目前遥感研究和通量研究中共同面对的一个重要挑战。现有的基于 LUE 模型的遥感 GPP 产品需要非常多的输入数据，因此增加模型复杂度的同时降低了模拟结果的可靠性。本章研究比较了几种 MODIS 遥感产品和 GPP 反演模型在澳大利亚萨瓦纳上六个通量塔站点上和 GPP 之间的关系。研究发现在 NATT 地区 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间存在非常好的关系（$R^2$ = 0.83, RMSE = 0.85 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$），远优于基于 LUE 模型的 MOD17 GPP 产品与通量塔 GPP 之间的关系（$R^2$ = 0.59, RMSE = 1.40 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。在进一步对基于 EVI 的几种 GPP 反演模型进行比较的基础上，本论文提出了一个新的萨瓦纳 GPP 遥感反演模型。该模型通过将 EVI 和大气层之上太阳辐射进行结合，能够提高对通量塔 GPP 的模拟能力（$R^2$ = 0.85, RMSE = 0.78 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$），不仅优于 MOD17 GPP 产品，而且优于其它两种基于 EVI 的 GPP 模型，包括 TG 模型和 GR 模型。将该模型应用到整个 NATT 区域尺度上之后，发现模拟结果较好的反映了该地区植被生产力随降水量而变化的空间分布模式。本章研究结果说明，热带萨瓦纳地区区域尺度上的植被生产力可以完全使用基于遥感数据的模型进行估算，既不需要依赖地面气象插值数据，也不需要对光能利用效率 LUE 的估算，因此大大降低了遥感反演 GPP 在萨瓦纳地区的不确定性。接下来的研究可以在更多的生态系统上通过和通量塔数据的结合以对模型的模拟能力进行检验。

# 第八章 基于遥感观测将萨瓦纳 GPP 在像元尺度上分解为树和草


## 摘 要

对于地面植被异质性的准确描述，是准确模拟生态系统-大气之间物质和能量交换的前提。萨瓦纳作为全球重要生物群系之一，其复杂性主要体现在由不同植被功能性（Plant Functional Types, PFTs）构成的树-草分层结构，且每一层均有其独特的生理生态特征及对环境要素的响应方式。同时，萨瓦纳植被的树-草比例无论是在空间上还是在时间尺度上都处于连续的变化之中，这无疑增加了在模型中对萨瓦纳植被结构异质性进行准确参数化的难度。虽然将热带萨瓦纳植被分解为树和草是一个非常重要的问题，但是到目前为止，无论是冠层尺度上的涡度相关通量塔测量，还是区域尺度上的遥感观测，所获得的观测均为来自于树和草的混合。本章研究基于澳大利亚热带萨瓦纳植被树和草之间在生长季节性和物候特征上的差异，探索了将遥感反演得到的 GPP 时间序列在像元尺度上分解为来自树木和来自林下草两部分的方法。进而将该方法应用到整个澳大利亚北部热带样带（NATT）之后，得到了研究区从 2000 年到 2013 年间逐像元 16 天时间分辨率的树木 GPP 时间序列（$GPP_{tree}$）和林下草 GPP 时间序列（$GPP_{grass}$），并使用这些数据对区域尺度上树-草生产力的时空动态进行了研究。

研究发现在 NATT 研究区从北部由桉树建群的湿润萨瓦纳到南部由合金欢树建群的干旱萨瓦纳，$GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 均呈现出沿纬度逐渐减少的趋势。在北部 NATT 地区，$GPP_{tree}$ 在像元总的 GPP 中占的比例要高于 $GPP_{grass}$，亦即北部萨瓦纳植被具有更高的树-草比例。而在中部和南部干旱圆丘草地上，$GPP_{grass}$ 在像元总的 GPP 中占的比重大大增加，而 $GPP_{tree}$ 占的比例却显著减少。但是到了 NATT 最南端，$GPP_{tree}$ 所占的比例再次增加，这对应了植被类型从圆丘草地过渡到合金欢树林地和灌木林，同时也对应了其它包括降水、温度和土壤类型的改变等。在 2000 年到 2013 年间，南部干旱萨瓦纳地区的植被生产力和树-草比例都表现出较高的年际变率，而北部湿润萨瓦纳则对降水量的年际变化不敏感。通过结合降水数据的分析发现，热带萨瓦纳植被生产力在降水充沛年份的增加，或是在干旱年份的减少，主要是因为 $GPP_{grass}$ 的增加或减少，而 $GPP_{tree}$ 则对年降水量的巨大差异没有表现出明显的响应。



## 关键字

热带萨瓦纳，总初级生产力、树-草比例、MODIS、气候变化

## 8.1 引 言

萨瓦纳（savannas，也称稀树草原）一般被定义为在树木冠层之下存在多年生或一年生草地覆被的植被类型（Walker & Gillison, 1982）。为了获得对萨瓦纳生态系统功能更为详细的认识，且更为准确的预测其对未来气候变化和人类活动干扰的响应程度，非常有必要将萨瓦纳植被分解为树和草，然后分别计算树和草在重要生态系统变量（譬如光合和蒸散）中各自所占的比例。这样的分解具有许多非常重要的应用。譬如说，以往的研究发现萨瓦纳植被的生产力具有非常高的年际变率（Kanniah et al., 2013），但只有了解树和草其各自分别的生产力大小和年际变化，才可能准确知道萨瓦纳植被生产力非常高的年际变率究竟是因为树木生产力的变率所引起的，还是因为草地生产力的变率所引起的。除此之外，萨瓦纳地区火灾的发生频率非常高（Beringer et al., 2007; Russell-Smith et al., 2013）。因为萨瓦纳地区火灾的主要燃料来源是是旱季林下层的枯草（Anderson et al., 1998），所以要获得对火灾风险的预警和评估，就必须知道区域中林下草的生物量大小。同时，以往的研究发现陆地生态系统中碳的滞留时间（carbon residency time）和生态系统中木本植物和草本植物的比例具有紧密的联系（Still et al., 2003）。因此，萨瓦纳的树-草分解无论是在区域生态学研究，还是在全球变化研究中都具有非常重要的作用。但是到目前为止对萨瓦纳植被生产力进行树与草的分解尚未在通量塔测量尺度上实现，也没有通过遥感观测实现。这限制了我们对于萨瓦纳生态系统更为详细和准确的认识。

传统的地面观测一般在单个植株或者群落尺度上进行，对于量化某一特定位置萨瓦纳植被结构的特征非常有用（Williams et al., 1999）。尽管如此，地面测量的空间代表性较差，很难描述景观尺度上或区域尺度上萨瓦纳植被结构的空间变异特点（Williams et al., 1996）。更重要的是，在时间尺度上萨瓦纳植被结构（树-草比例）也在不断地发生着变化，需要在一个生长季内进行足够多次的测量才有可能捕捉到这些变化。以上这些问题使得通过地面观测来了解整个区域上萨瓦纳植被结构时空变化变得非常困难。作为对地面观测非常好的补充，遥感观测以其较大的空间覆盖范围和对同一区域高频率的重复观测，成为在区域、大陆或甚至全球尺度上对高度异质的萨瓦纳植被结构和功能进行观测的最佳手段（Roderick et al., 1999; Lu et al., 2003; Hansen et al., 2003）。

基于遥感观测对萨瓦纳植被结构和功能的所进行的研究通常利用三个方面的信息，（1）电磁波谱特征（spectrum）；（2）三维几何结构（geometry）；（3）物候特征（phenology）。譬如，使用光谱分解技术（spectrum unmixing）可以从航空或卫星遥感获得的高光谱（hyperspectral）影像中中计算出像元内树、草和裸土的比例（Bateson et al., 2000; Asner et al., 2003; Chen et al., 2006）。而高分辨率航空遥感影像也被用来提取树木盖度在时间上的变化（Hudak et al., 1998; Fensham et al., 2003）。除了在光谱和

三维结构上的差异之外，在植被生长的季节性，亦即物候特征上，萨瓦纳的树和草之间也具有各自的特点，而这些使得我们有可能从时间序列的角度对萨瓦纳进行树和草的分解。

传统上物候研究主要关注动植物的生命周期及其与气候和其他季节性环境要素之间的关系（Lieth, 1974）。从遥感的角度来说，地表物候反映的是光谱指数的年内和年际变化规律，并进而从光谱指数时间序列中提取出关键物候期事件（譬如生长季开始和结束的时间等）（Zhang et al., 2003）。以往的研究证明从遥感卫星观测中提取出的物候信息对于反演植被结构信息，譬如树和草的覆被度等非常有用。比如 DeFries 和 Hasen 等使用一组从 AVHRR 或 MODIS 中提取出的物候指数，计算了全球植被中每个像元内树的覆盖度（DeFries et al., 1999; Hansen et al., 2003）。而 Waring 等（2006）使用一组从 MODIS EVI 中提取得到的物候指数，对美国森林地区的树种丰富度和生产力进行了模拟和预测。Hill 等（2011）进一步探索了使用遥感反演物候指数来对全球萨瓦纳植被进行分类的可行性，并从物候指数中提取出有关萨瓦纳植被结构的信息。

为了估算像元内的树木盖度，以往的研究中通常使用较为复杂的统计模型（譬如回归树算法，Hansen et al., 2003）,将多种遥感反演物候指数作为模型输入。根据澳大利亚热带萨瓦纳植被树和草之间在生长季节性特点上的显著差异，遥感物候信息可以被更加明确的用来提取像元内树和草的比例。

在澳大利亚萨瓦纳地区，建群树种主要为 $C_3$ 常绿树种（桉树 *Eucalyptus* 和合金欢树 *Acacia*）（Walker et al., 1999）。这些树木的根系通常比较深，能够汲取到深层土壤和地下水（Eamus et al., 2000），因此在旱季也可以保持生长，并维持与雨季时几乎相同的叶面积指数（Williams et al., 1997; O'Grady et al., 2009; Eamus et al., 2013）。与树木相反，澳大利亚萨瓦纳林下层草地包括一年生和多年生草种（主要为 $C_4$ 光合途径）（Eamus et al., 2001; Walker et al., 1999）。这些林下草的根系相对较浅，因此生长主要受降水驱动，其年内生长模式和降水的年内分布大约一致，呈现出明显的季节性差异（Eamus et al., 2001; Hutley et al., 2001; Eamus et al., 2013）。在澳大利亚萨瓦纳地区，地面测量发现植被碳-水通量的季节性主要来自于林下层草地在雨季的活动（Eamus et al., 2001; Hutley et al., 2001; O'Grady et al., 2009; Eamus et al., 2013）。

从以上分析可以看到，澳大利亚热带萨瓦纳植被树和草之间在生长季节性上具有明显的差异，而这些差异可以被用来使用时间序列分解模型将遥感在像元尺度上的观测分解为树和草两部分。譬如 Roderick 等（1999）使用 AVHRR 数据，通过时间序列分解模型估算出了澳大利亚区域尺度上逐像元常绿树木叶片投影盖度（foliage projective cover, FPC）。Lu 等（2003）进一步发展出一个非常精致的数学模型来将遥感反演得到的 FPC 时间序列分解为树和草两部分。Dohohue 等（2009）通过类似的树-草分解方法，发现在澳洲大陆常绿树木的盖度在过去的二十多年间（1981-2006）

呈现出增加的趋势。

这些基于时间序列分解模型的萨瓦纳树-草分解方法可以类比为遥感分析方法中的线性光谱分解（linear spectral unmixing），区别是将线性分解应用到“物候谱”（phenological spectrum）而不是光谱（light spectrum）上。相比较其它方法（譬如回归树模型）只能提供树木盖度的年平均值（譬如 MOD44B 产品，Hansen et al., 2003），基于时间序列分析的树-草分解模型可以在更高时间分辨率上获得树和草在像元内的季节变化特征（Roderick et al., 1999; Lu et al., 2003; Gill et al., 2009）。

然而之前基于遥感对萨瓦纳的树-草进行分解的研究主要关注一些植被结构变量（譬如 FPC 和 LAI）（Roderick et al., 1999），或者是功能变量（譬如 fPAR）（Donohue et al., 2009）。这些变量对于研究区域上萨瓦纳植被结构和功能非常有用（Lu et al., 2003; Gill et al., 2009），并且可以用来研究气候变化对萨瓦纳生态系统的影响（Donohue et al., 2009）。然而到目前为止，对于一些非常重要的生态系统过程，譬如总初级生产力和蒸散发，在像元尺度上的树-草分解尚未实现。本章将探索利用澳大利亚萨瓦纳树和草之间在物候特点上的差异，将 GPP 时间序列在像元尺度上分解为树和草两部分。要达成这一目标的首要前提是对于 GPP 的准确估算，本论文第七章中发展的萨瓦纳 GPP 遥感反演模型可以用来对区域上 GPP 的时空分布进行计算。本章将重点探讨树-草分解部分。

本章研究的具体目标有：（1）使用时间序列分解模型将遥感反演得到的萨瓦纳 GPP 在像元尺度内分解为树和草两部分，并在 1100 公里的 NATT 生态降水样带上研究萨瓦纳树-草两部分 GPP 的大小、以及树-草比例的空间变化规律；（2）在整个 NATT 研究区上分析萨瓦纳植被生产力、树-草比例与降水和植被结构类型之间的关系；（3）在 13 年的时间尺度上（2000-2013）研究萨瓦纳植被生产力及树-草比例对降水量年内分布和年际年际变率的响应，并探讨树和草两部分对降水变率响应程度的差异。

## 8.2 数据和方法

### 8.2.1 研究区介绍

论文的研究区域设定在澳大利亚一个南北长约 1100 公里的生态-降水样带上，简称为北澳热带样带（Northern Australian Tropical Transect, NATT）（Koch et al., 1995）。对 NATT 研究区的详细介绍请参见论文第二章。

在 NATT 上选取六个代表不同降水量和萨瓦纳植被类型的站点，包括 Howard Springs（桉树林地，年平均降水量 1722 mm），Adelaide River（热带桉树林地，年平均降水量 1692 mm），Daly River（桉树林地，1295 mm），Dry River（桉树疏林，1063 mm），Sturt Plains（丛生草地，778 mm），Ti Tree（合金欢林地，443 mm）。关于六个站点的详细介绍请参加论文第二章 2.4 小节。

### 8.2.2 遥感数据

本章研究主要用到了 MOD13C1 增强型植被指数 EVI（Enhanced Vegetation Index）。MOD13C1 数据的介绍及预处理请参见论文第五章第二小节 5.2.1。

### 8.2.3 降水数据

为了分析植被生产力和降水之间的关系，本论文使用了由澳大利亚气象局（Australian Bureau of Meteorology）国家气候中心（National Climate Centre）提供的逐日降水数据（Daily Rain Gauge Precipitation - Gridded, Australia coverage, http://www.auscover.org.au）（Jones et al., 2009）。对降水数据的介绍请参见论文第五章第二小节 5.2.3。

### 8.2.5 植被类型数据

为了研究区内植被生产力和树草比例在不同植被类型之间的差异，采用了由澳大利亚国家植被信息系统（National Vegetation Information System, NVIS）提供的主要植被组数据（Major Vegetation Groups, MVGs）（NVIS, 2011）。对 NVIS 植被类型数据的介绍请参见论文第五章第二小节 5.2.4。

### 8.2.6 基于 EVI 和太阳辐射的萨瓦纳 GPP 模型

对于区域尺度上逐像元 GPP 的计算，采用了论文第七章中发展的基于 EVI 和太阳辐射的 GPP 模型（辐射和光合能力模型）。该模型的数学描述如下：

$$\mathrm{GPP} = (\mathrm{EVI} - d) \times R_{\mathrm{TOA}} \times 0.0416 + 0.307 \tag{8.2}$$

其中 $R_{TOA}$（W $m^{-2}$）为大气层之上日均太阳辐射量（top-of-atmosphere solar radiation）；GPP 的单位为 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$；$d$ 为一个调节参数，以去除土壤背景对 EVI 的贡献（$d = 0.09$）。

### 8.2.7 树-草分解模型

本论文使用了基于时间序列分析方法的树-草分解模型。该模型主要利用萨瓦纳树和草之间不同的物候特点，将遥感估算的 GPP 时间序列在像元尺度内分解为树和草两部分。模型的主要假设为：在澳洲萨瓦纳常绿树木的季节性非常弱，而 GPP 时间序列的季节性主要来自于林下层草地在雨季的生长。该假设可以通过以下地面观测得到支持。

在 NATT 研究区，树木主要为 $C_3$ 常绿树种，包括桉树（*Eucalyptus*）和合金欢树（*Acacia*）等（Wullschleger, 1993; Williams et al., 1997）。这些常绿树种一般都有较长的根系，在旱季时也可以通过汲取深层土壤和地下水而维持相对雨季来说较为完整的叶面积指数（Borchert et al., 1994）。而与这些常绿树木相反的是，NATT 地区萨瓦纳林下层草地主要由一年生或多年生 $C_4$ 草种组成，这些草种的根系较浅，因此其生长主要集中在雨季并在旱季枯萎，呈现出非常强的季节性（Hutley et al., 2000; Eamus et

al., 2013）。

地面通量塔的测量也支持树与草之间在年内季节性上存在显著差异这一事实。譬如在 NATT 最北端的通量站点 Howard Springs，地面通量测量显示 $CO_2$ 通量在雨季时有 70%来自于林下层草地，而整个生态系统 $CO_2$ 通量在旱季的显著减少是因为草地生长季在旱季的结束（Eamus et al., 2001; Eamus et al., 2013）。而在旱季，生态系统 $CO_2$ 通量主要来自于常绿树木，因为这些树木在旱季也保持了几乎完整的冠层盖度和蒸腾水平（Williams et al., 1997; Hutley et al., 2001; O'Grady et al., 2009; Eamus et al., 2013）。

基于以上分析，林下层草地的生长决定了澳州北部萨瓦纳叶面积指数、光合能力和冠层气体交换的季节性大小，而常绿树木则呈现出比较弱的季节性（Hutley et al., 2001; O'Grady et al., 2009; Eamus et al., 2013; Cleverly et al., 2013）。假设遥感反演得到整个像元内的 GPP 来自于树木和草地两部分。在旱季由于林下层草地干枯，此时的 GPP 应主要（或完全）来自于常绿树木。因此旱季的 GPP 可以作为整个 GPP 时间序列的基线值（baseline），代表树木 GPP 的大小。同时基于对常绿树木年内生长季节性的认识，可知这些常绿树木的 GPP 在年内变化幅度比较小。因此可以将整个 GPP 时间序列和旱季基线 GPP 相减之后得到对林下层草地 GPP 的估算。当然假设群落内树木全部为常绿树木是一种简化，因为地面调查显示澳洲萨瓦纳树木既有常绿树种，又有落叶树种（Williams et al., 1997）。但是在 Howard Springs 附近的地面测量数据显示，群落内两种建群种（*Eucalyptus miniata* 和 *E. tetrodonata*）均为常绿树种，且这两种树种的生物量占了群落内树木生物量（standing biomass）的 80%左右（Duff et al., 1997; Williams et al., 1997; O'Grady et al., 2000）。因此，树-草分解模型中假设树木主要为常绿树种是一种合理简化。而在模型中会进一步通过设定一个参数，来考虑树木 GPP 在年内较小的季节变化以得到更为符合地面真实情况的树-草分解结果。

为了更为直观的表述整个树-草分解流程，图 8.1 显示了从原始遥感反演得到的 GPP 时间序列到最后分解出的常绿树木 GPP 时间序列和林下层草 GPP 时间序列。为了简明表达，以下将将树木 GPP 和草地 GPP 分别表述为 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$，而 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 的总和，亦即像元内 GPP 的总量将表述为 $GPP_{total}$。

本论文采用了由 Lu et al. (2003)最早提出的基于时间序列分析方法的萨瓦纳树-草分解模型。该模型最初被用于分解由 AVHRR NDVI 转换得到的 FPC（foliage projective cover）时间序列。在本论文中对该模型进行了一些调整，使之更加适应于对 GPP 时间序列的分解。这包括对原始模型中的时间序列分析方法的更新以及部分参数的重新设置等。以下将对该模型的数学结构进行简要介绍。

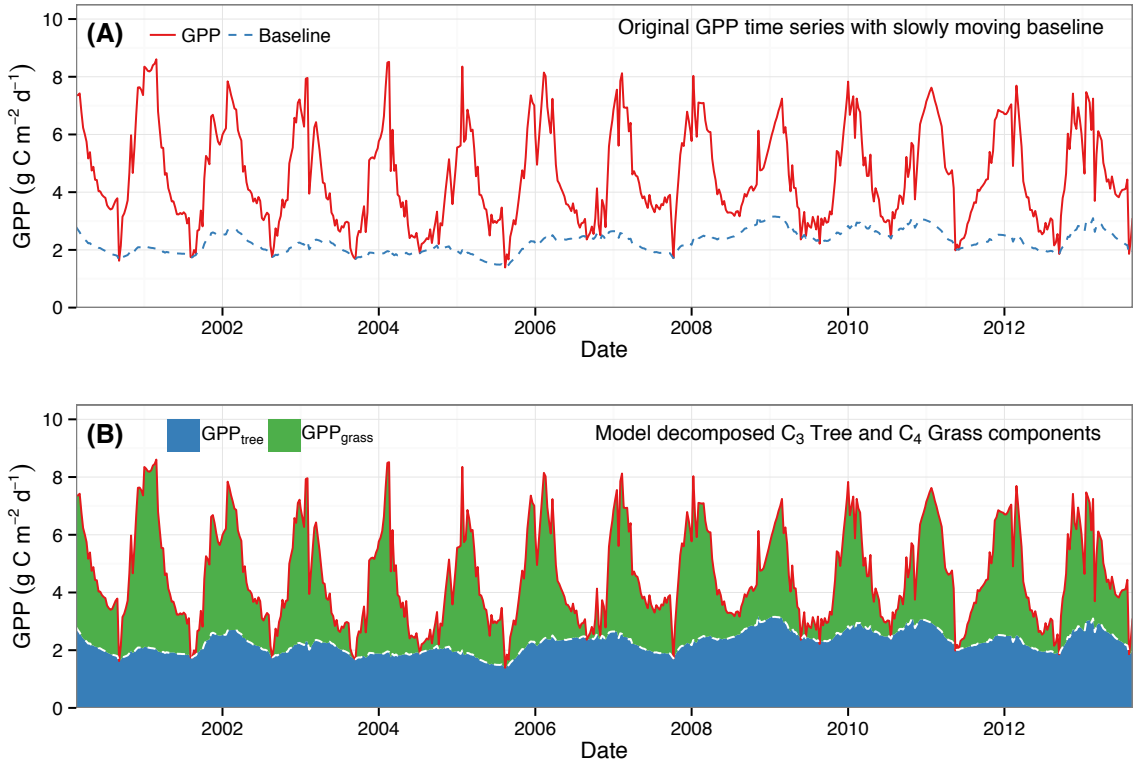


图 8.1 图示基于时间序列分析的树-草分解流程。（A）遥感反演得到的 NATT 研究区 Howard Springs 站点 2000 年到 2013 年之间 8 天分辨率 GPP 时间序列，图中虚线为 GPP 时间序列的基线值（baseline），反映常绿树木 GPP 的大小；（B）模型分解得到的树-草两部分 GPP，绿色部分为林下草 GPP（$GPP_{grass}$），蓝色部分为树木 GPP（$GPP_{tree}$）。

Figure 8.1 Tree-Grass decomposition methodology schematic diagram. (A) RPC model simulated 8-d GPP time series with slowly moving baseline for Howard Springs from 2000 to 2013; (B) Model decomposed GPP time series of C3 trees ($GPP_{tree}$), GPP time series of C4 grasses ($GPP_{grass}$).

首先，假设整个像元内总的 GPP（$GPP_{total}$）时间序列的来自 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 两部分（Lu et al., 2003）：

$$GPP(t) = GPP_{\mathrm{tree}}(t) + GPP_{\mathrm{grass}}(t) \tag{8.3}$$

由于常绿树木 GPP 的生长季节性较小，而林下层草地具有非常强的季节性，公式 8.3 中的 $GPP_{tree}(t)$和 $GPP_{grass}(t)$可以进一步表示为（Lu et al., 2003）：

$$\begin{aligned} GPP_{\mathrm{tree}}(t) &= [1 + \lambda S(t)]GPP_{\mathrm{treeB}}(t) \\ GPP_{\mathrm{grass}}(t) &= S(t)GPP_{\mathrm{grassA}}(t) \end{aligned} \tag{8.4}$$

式中 $GPP_{treeB}(t)$为缓慢变化的 $GPP_{tree}(t)$的基线值（baseline）；$GPP_{grassA}(t)$为 $GPP_{grass}(t)$生长季内变化幅度（amplitude）；$S(t)$为一个无维时间序列波形因子（non-dimensional shape factor），决定每个生长季内 GPP 变化的强度（$0 \leqslant S(t) \leqslant 1$）；而 $\lambda$ 为一个乘

数（multiply factor），确定生长季内 $GPP_{tree}$(t)相对于旱季基线 GPP（$GPP_{treeB}$）的增加幅度（Lu et al., 2003）。基于 NATT 研究区内多个站点对树木生长季节性的观测数据（O'Grady et al., 2000; Whitley et al., 2011; Eamus et al., 2013; Cleverly et al., 2013），在本次研究中将 $\lambda$ 设定为 0.27。

接下来，$GPP_{treeB}$(t)和 $GPP_{grassA}$(t)可以分别通过以下公式进行计算（Lu et al., 2003）：

$$\begin{aligned} GPP_{\mathrm{treeB}} &= GPP_{\mathrm{T}} - sGPP_{\mathrm{A}} \\ GPP_{\mathrm{grassA}} &= (1+\lambda s)GPP_{\mathrm{A}} - \lambda GPP_{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{8.5}$$

式中 $GPP_T$ 为 $GPP$(t)的长期趋势（trend），$GPP_A$ 为 $GPP$(t)在年内生长幅度的大小，$s$ 为 $S$(t)的平均值（Lu et al., 2003）。

将公式 8.4 和公式 8.5 联立，可以分别得到 $GPP_{tree}$(t)和 $GPP_{grass}$(t)的计算公式（Lu et al., 2003）：

$$\begin{aligned} GPP_{\mathrm{tree}} &= (1+\lambda S(t))[(GPP_{\mathrm{T}} - sGPP_{\mathrm{A}}] \\ GPP_{\mathrm{grass}} &= S(t)[(1+\lambda s)GPP_{\mathrm{A}} - \lambda GPP_{\mathrm{T}}] \end{aligned} \tag{8.6}$$

公式中，$GPP_{tree}$+$GPP_{grass}$ = $GPP_T$ + $GPP_A$[$S$(t) - $s$]，即在图 8.1 上 $GPP_{tree}$(t)和 $GPP_{grass}$(t)两部分相加之后的总和应为 $GPP$(t)。需要注意的是，公式 8.6 和 Lu et al. (2003)中的原始公式有所不同。因为在遥感反演 GPP 之前，土壤对于 EVI 的贡献（公式 8.2 中的 $d$）已经提前被消除掉了，因此 Lu et al. (2003)中公式 8.6 中的土壤调节项在本论文中没有使用。

$GPP$(t)从峰值到低值（peak to trough）的变化幅度大小 $GPP_A$ 可以通过一个三通数字滤波得到（three-pass digital filter）（Lu et al., 2003）：

$$\begin{aligned} GPP_{\mathrm{A}} &= GPP_{\mathrm{C(max)}}(t) - GPP_{\mathrm{C(min)}}(t) \\ GPP_{\mathrm{C(min)}}(t) &= \min(GPP_{\mathrm{C}}(t), \frac{p}{2-p}GPP_{\mathrm{C(min)}}(t-\Delta t) + \frac{1-p}{2-p}GPP_{\mathrm{C}}(t)) \\ GPP_{\mathrm{C(max)}}(t) &= \max(GPP_{\mathrm{C}}(t), \frac{p}{2-p}GPP_{\mathrm{C(max)}}(t-\Delta t) + \frac{1-p}{2-p}GPP_{\mathrm{C}}(t)) \end{aligned} \tag{8.7}$$

$\Delta t$ 为 $GPP$(t)的时间分辨率，$p$ 为数字滤波参数，$p$ = 0.99。$GPP_{C(max)}$和 $GPP_{C(min)}$分别为 $GPP$(t)在生长季内峰值（peak）和低值（trough）的大小。在对 $GPP$(t)应用公式 8.7 进行数字滤波时，第一次和第三次滤波以时间为顺序进行升序滤波（ascending filter），而在第二次以时间为顺序进行降序滤波（descending filter），亦即将公式中的 $t$ - $\Delta t$ 替换为 $t$ + $\Delta t$。在进行第二和第三次滤波时，$GPP_C$ 替换为上一次滤波之后的数值（Lu et al., 2003）。

最后，GPP 时间序列波形因子 $S$(t)可以通过下式计算（Lu et al., 2003）：

$$S(t) = \frac{GPP_{\mathrm{C}}(t)}{GPP_{\mathrm{A}}(t)} + s = \frac{GPP_{\mathrm{C}}(t) - GPP_{\mathrm{C(min)}}(t)}{GPP_{\mathrm{A}}(t)} \tag{8.8}$$

式中 $GPP_{\mathrm{C}}$ 和 $GPP_{\mathrm{A}}$ 的定义与之前公式中的定义相同。

在本次研究中，为了将原始 GPP 时间序列 *GPP*(t)拆分为树-草分解模型所需的长期趋势部分 $GPP_{\mathrm{T}}$（trend component）和季节性部分 $GPP_{\mathrm{C}}$（seasonal component），采用了奇异波谱分析方法（Singular Spectrum Analysis，以下简称为 SSA）。第三章 3.2.4 小节中已经对奇异波谱分析方法有过详细的介绍，这里不再重复。需要特别说明的是，奇异波谱分析将原始时间序列分解得到的第一个 SVD（Singular Value Decomposition）主成分对应 GPP 时间序列的长期趋势 $GPP_{\mathrm{T}}$（公式 8.5 和公式 8.6），而余下的 SVD 主成分之和对应 GPP 时间序列的季节性成分 $GPP_{\mathrm{C}}$（公式 8.5-公式 8.8）。

为了对树木和林下草之间的比例（亦即树-草比例）进行量化，使得不同时间和空间上萨瓦纳树-草比例大小的比较更为方便，本论文提出一个量化树-草比例的简单指数，称之为树-草指数（Tree-Grass Index）。树-草指数（TGI）可以通过下式计算：

$$\mathrm{TGI} = \frac{\mathrm{GPP_{tree}} - \mathrm{GPP_{grass}}}{\mathrm{GPP_{tree}} + \mathrm{GPP_{grass}}} \tag{8.9}$$

式中，$\mathrm{GPP_{tree}}$ 和 $\mathrm{GPP_{grass}}$ 分别为某一像元内（或某一站点）某一时刻树木和草地的 GPP 大小。TGI 的取值范围为-1 到 1，分别对应像元内 GPP 全被来自于草地（TGI = -1），或全部来自于树木（TGI = +1）。

TGI 以非线性的形式对应于 $\mathrm{GPP_{tree}}$ 和 $\mathrm{GPP_{grass}}$ 之间的简单比值（$\mathrm{GPP_{tree}}$ / $\mathrm{GPP_{grass}}$）。使用 TGI 而非简单比值的原因在于，简单比值的取值范围为 0 到正无穷，而 TGI 具有有限的取值范围（-1 ~ +1），因此方便了计算和比较。在以下分析中，TGI 和树-草比例将作为在生态学意义上对等，但在数学上非线性关联的名词共同使用。

### 8.2.8 地面验证

到目前为止，在群落尺度上对于萨瓦纳树木和草地两部分的碳通量尚未由通量塔分别测量。且由于萨瓦纳植被的高度异质性，这样的测量势必是非常具有挑战性的。因此为了确认遥感分解得到的结果是否在季节性上符合地面观测结果，本论文使用了来自 NATT 研究区两个萨瓦纳站点上叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）测量数据。这些叶面积指数测量中既包括了对树木冠层 LAI 的测量，也同时包括了对林下层草地 LAI 的测量，且均为一年或一年以上的长期测量，能够反映树-草两部分的生长季节性。

第一组 LAI 数据测量于 NATT 降水样带最北端的 Howard Springs 站点（桉树林地，131.150°E, 12.495°S，年平均降水量 1722 毫米）（Whitley et al., 2011），包括 2000

年逐月对树木和草地的 LAI 测量数据（O'Grady et al., 2000）。而第二组测量数据来自于 NATT 降水样带最南端的 Ti Tree 站点（合金欢树林地，133.249°E, 22.283°S，年平均降水量 443 毫米）（Eamus et al., 2013）。在该站点的测量中，从 2010 年 8 月到 2012 年 4 月之间，以通量塔为中心分别向五个方向建立起了长度约为 100 米的五个样带，然后在每个样带上以每隔 10 米的间隔分别测量树木冠层和林下草地的 LAI，共得到时间跨度约为 1.7 年的测量数据（Eamus et al., 2013）。这两组地面 LAI 测量分别位于 NATT 研究区北端湿润区和南部干旱区，同时代表了澳大利亚最主要的两种萨瓦纳类型：桉树林地和合金欢树林地。

## 8.3 结　果

### 8.3.1 萨瓦纳植被树-草生长的年内季节性

图 8.2 显示了 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上多年平均的 $GPP_{total}$、分解之后的 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$、以及树-草指数（TGI）的季节变化特征。从图上可以看到，分解得到的萨瓦纳 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 展示出了截然不同的季节性，$GPP_{tree}$ 的季节性相对较小，但是在旱季和雨季都保持了一定的水平（图 8.2A）。而林下层草地展示出了非常强的季节性，但是主要集中在雨季，在旱季维持在一个较低（或完全为零）的水平（图 8.2A）。

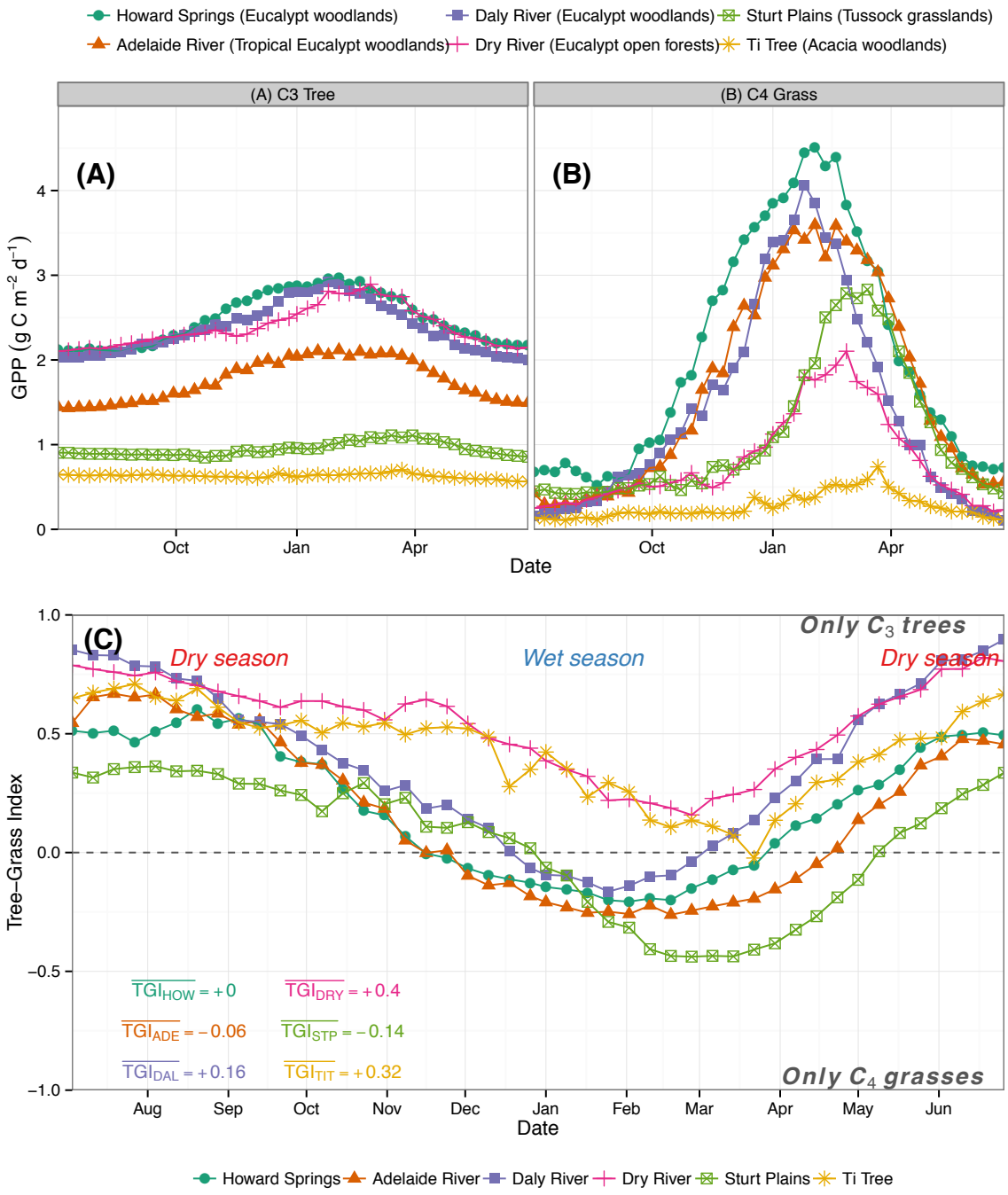


图 8.2 NATT 研究六个萨瓦纳站点上 GPP 和树-草指数的季节变化。（A）$GPP_{tree}$ 的季节变化；（B）$GPP_{grass}$ 的季节变化；（C）树-草指数（TGI, Tree-Grass Index）的季节变化。树草指数 TGI 的计算公式为：$TGI = (GPP_{tree} - GPP_{grass}) / (GPP_{tree} + GPP_{grass})$。树草指数 TGI 如果为正值则表示像元总的 GPP 中来自 $GPP_{tree}$ 的比例更高，TGI 为负值则表示像元中来自 $GPP_{grass}$ 的比例更高。图上同时标注出了旱季和雨季的大致时间范围，以及各个站点上年平均树草指数（反映该站点年尺度上 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 的比例）。（C）中的灰色虚线表示当树-草指数 TGI 为零，亦即像元中 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 的大小相等。

Figure 8．2 Seasonal variation of the multiple years averaged (A) $GPP_{tree}$; (B) $GPP_{grass}$; and (C) Tree-Grass

Index (TGI) for six local sites during 2000-2013. The TGI was calculated as: ($GPP_{tree}$ - $GPP_{grass}$) / ($GPP_{tree}$ + $GPP_{grass}$). Positive TGI represents the GPP was primarily contributed from C3 trees, and negative TGI represents the GPP was primarily contributed from C4 grasses. The solid horizontal lines indicate the position of TGI = +1 and TGI = -1, corresponded to the conditions of carbon fluxes were purely contributed from C3 trees and C4 grasses respectively. The mean TGI for each site, and the time periods of the dry season and wet season were roughly indicated on the graph. The grey dashed line on panel (C) indicate the position of TGI = 0, i.e., tree-grass balanced in terms of GPP.

图 8.2 同时展示了六个站点上树-草指数（Tree-Grass Index, TGI）的年内变化。六个站点中，树-草比例最高的站点为 Dry River（TGI=0.4）和 Ti Tree（TGI=0.32），而树-草比例最低的站点为 Sturt Plains（TGI = -0.14）和 Adelaide River（TGI = -0.06）（图 8.2C）。

萨瓦纳树-草比例表现出了非常强的季节变化特征（图 8.2C）。对于某一站点，树-草比例最高的时间都在旱季，此时林下层草地由于土壤水分的减少已经干枯掉（图 8.2C）。林下层草地对整个像元 GPP 的贡献从旱季到雨季呈逐渐增加的趋势，在雨季高峰时树-草比例降到全年最小值（图 8.2C）。除了 Dry River 之外，其它五个站点上在雨季时的 GPP 均更多的来自于林下层 $C_4$ 草地的贡献（图 8.2C）。

表 8.1 总结了 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上多年平均 GPP 的大小，以及分解后的 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 全年总和的多年平均值。从表 8.1 中可以看到，年平均 GPP 从 NATT 最北部站点 Howard Springs 的 1652.24±129.59 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 减少到 NATT 最南部站点 Ti Tree 的 328.78±129.61 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，相对减少达到了 80%以上（表 8.1）。

$GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 同样呈现出从北到南的减少趋势（表 8.1）。在 Howard Springs，$GPP_{tree}$（828.76±106.05 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）和 $GPP_{grass}$（827.49±121.10 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）对站点总 GPP 的贡献大致相等（表 8.1）。而在 Ti Tree，$GPP_{tree}$（217.75±81.05 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）几乎是 $GPP_{grass}$（111.03±57.95 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）的两倍之多（表 8.1），说明 NATT 南部站点 Ti Tree 的植被生产力更多的来自于 $C_3$ 常绿树木的贡献。

表 8.1 NATT 研究区六个萨瓦纳站点上的年平均降水量（Mean annual precipitation, MAP）、年平均 GPP（$GPP_{total}$）、以及模型分解得到的年平均 $GPP_{tree}$ 和年平均 $GPP_{grass}$ 的大小。表中的数值表示平均值±标准差（mean±standard deviation）。

Table 8.1 Summary of mean and standard deviation of annual precipitation and vegetation productivity (GPP) for six NATT sites during 2000-2012.

| 站点名<br>Site Name | MAP<br>(mm $yr^{-1}$) | $GPP_{total}$<br>(g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$) | $GPP_{tree}$<br>(g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$) | $GPP_{grass}$<br>(g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| **Howard Springs** | 1722 ± 341 | 1656.24±129.59 | 828.76±106.05 | 827.49±121.10 |
| **Adelaide River** | 1692 ± 373 | 1250.31±106.36 | 589.80±171.57 | 660.51±181.42 |
| **Daly River** | 1295 ± 334 | 1389.16±120.25 | 804.54±98.95 | 584.62±108.57 |
| **Dry River** | 1063 ± 277 | 1167.41±107.04 | 814.53±120.09 | 352.87±154.22 |
| **Sturt Plains** | 778 ± 304 | 743.61±163.11 | 320.59±129.56 | 423.02±176.28 |
| **Ti Tree** | 443 ± 222 | 328.78±129.61 | 217.75±81.05 | 111.03±57.95 |

### 8.3.2 萨瓦纳 GPP 和树-草比例的空间模式在雨季和旱季的差异

图 8.3 和 8.4 显示了在 NATT 研究区，$GPP_{total}$，$GPP_{tree}$，$GPP_{grass}$，以及树-草比例在雨季和旱季空间模式上的差异。基于区域内降水的年内分布模式，雨季定义为从一月到三月，而旱季定义为从七月到九月。

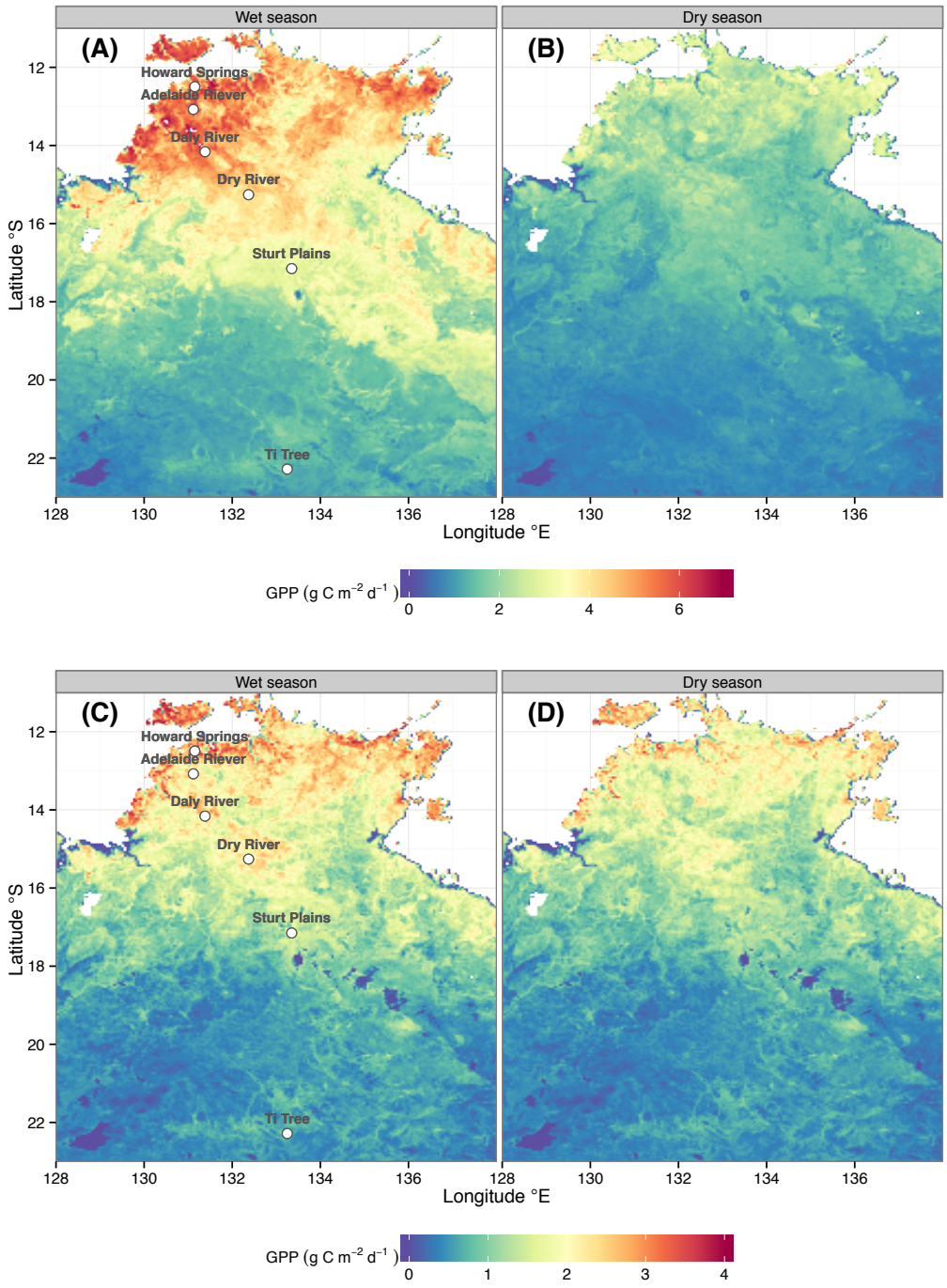


图 8.3 NATT 研究区 GPP 空间模式在雨季和旱季的变化，2000-2012 年。（A）雨季平均 $GPP_{total}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）；（B）旱季平均 $GPP_{total}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）；（C）雨季平均 $GPP_{tree}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）；（D）旱季平均 $GPP_{tree}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。雨季的时间范围定义为从一月到三月，而旱季的时间范围定义为从七月到九月。

Figure 8.3 Biogeographic patterns of seasonal variations in GPP over the NATT study area during 2000-2013. (A) Mean daily $GPP_{total}$ (g C $m^{-2}$ $d^{-1}$) during the wet season (Jan-Mar); (B) mean daily $GPP_{total}$ during the dry season (Jul-Sep); (C) Mean daily $GPP_{tree}$ (g C $m^{-2}$ $d^{-1}$) during the wet season (Jan-Mar); (D) mean daily $GPP_{tree}$ during the dry season (Jul-Sep).

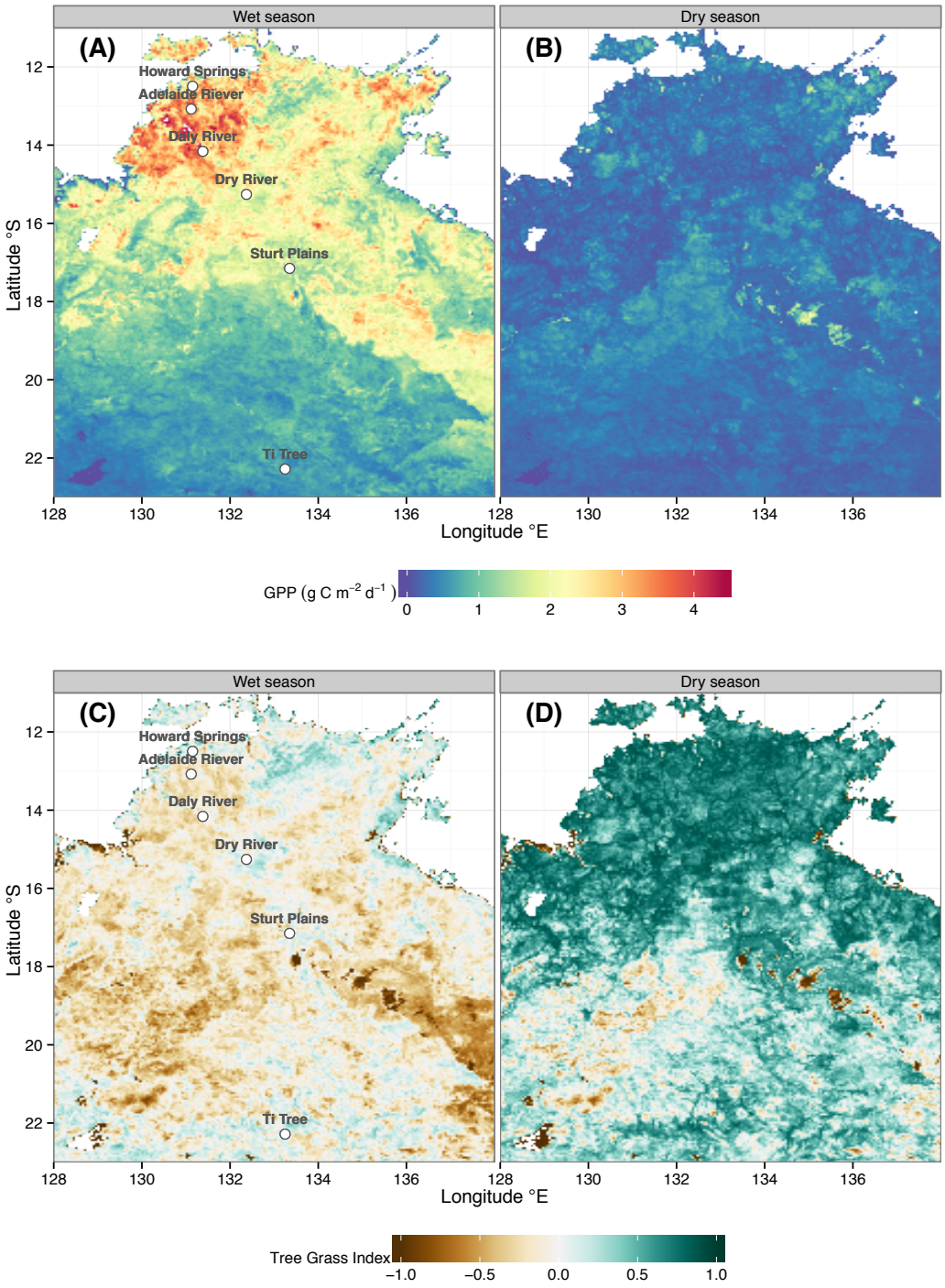


图 8.4 NATT 研究区 GPP 和树-草比例空间模式在雨季和旱季的变化，2000-2012 年。（A）雨季平均 $GPP_{grass}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）；（B）旱季平均 $GPP_{grass}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）；（C）雨季平均树-草指数 TGI（Tree-Grass Index）；（D）旱季平均树-草指数 TGI。雨季的时间范围定义为从一月到三月，而旱季的时间范围定义为从七月到九月。

Figure 8.4 Biogeographic patterns of seasonal variations in GPP and Tree-Grass Index over the NATT study area during 2000-2013. (A) Mean daily $GPP_{grass}$ (g C $m^{-2}$ $d^{-1}$) during the wet season (Jan-Mar); (B) mean daily $GPP_{grass}$ during the dry season (Jul-Sep); (C) mean TGI during the wet season; (D) mean TGI during the dry season.

在整个 NATT 研究区，雨季的 $GPP_{total}$ 从最北部湿润萨瓦纳地区的 6 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 逐渐减少到南部干旱内陆地区的 2 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（Fig 8.3A）。然而到了旱季，由于北部 NATT 地区 GPP 的显著减少，整个 NATT 研究区在植被生产力上的南北差异变得没有雨季那么明显（Fig. 8.3B）。NATT 研究区所有像元在雨季的平均 $GPP_{total}$ 为 2.54±1.44 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，为旱季平均 $GPP_{total}$（1.27±0.63 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）的两倍，显示出热带萨瓦纳植被生产力受年内降水分布的影响非常明显。

相比较 $GPP_{total}$ 和 $GPP_{tree}$，$GPP_{grass}$ 在 NATT 研究区的空间模式在雨季和旱季之间表现出更大的差异（Fig. 8.4A 和 8.4B）。在雨季， $GPP_{grass}$ 从北部湿润地区的大约 4 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 减少到南部干旱地区的小于 1 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（图 8.4A）。而到了旱季，整个研究区内的 $GPP_{grass}$ 急剧减少，研究区大多数地区的 $GPP_{grass}$ 在旱季都小于 1 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（图 8.4B）。研究区所有像元 $GPP_{grass}$ 在雨季的平均值为 1.47±0.83 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$，但是到了旱季却只有 0.35±0.17 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（图 8.4B）。

由于 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 在雨季和旱季的变化，导致了整个 NATT 研究区树-草比例从在雨季的时候由林下草占主导（图 8.4C），逐渐变为在旱季的时候由冠层常绿树木占主导（图 8.4D）。整个研究区在雨季时所有像元的平均 TGI 为-0.14±0.24（林下草占主导），而在旱季时为 0.39±0.34（树木占主导）。

为了更好的描述萨瓦纳植被生产力和树-草比例沿纬度的空间变化趋势，图 8.5 显示了多年平均 $GPP_{total}$，$GPP_{tree}$，$GPP_{grass}$ 和 TGI 在旱季和雨季沿 1100 公里的 NATT 降水样带的变化。从图 8.5A 可以看到，$GPP_{total}$ 在雨季从最北端的 6 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 逐渐减少到最南部的大约 1 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$。而到了旱季，北部湿润地区 $GPP_{total}$ 的减少幅度更为明显，因而使得整个 NATT 样带上的南北差异明显减小（图 8.5A）。

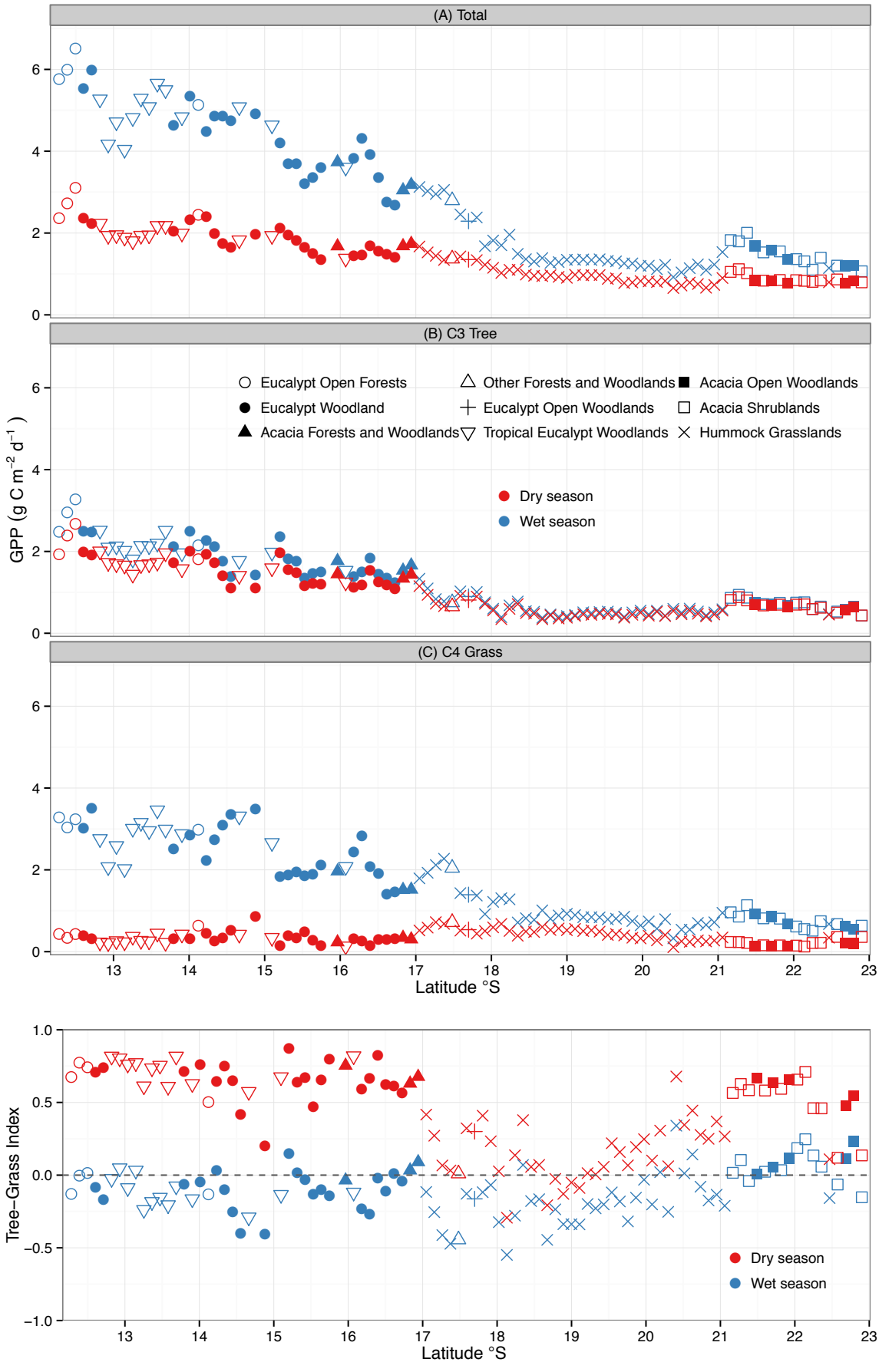
(A) Total
(B) C3 Tree
(C) C4 Grass
GPP (g C m$^{-2}$ d$^{-1}$)
Eucalypt Open Forests
Eucalypt Woodland
Acacia Forests and Woodlands
Other Forests and Woodlands
Eucalypt Open Woodlands
Tropical Eucalypt Woodlands
Acacia Open Woodlands
Acacia Shrublands
Hummock Grasslands
Dry season
Wet season
Latitude °S
Tree–Grass Index
Dry season
Wet season
Latitude °S

图 8.5 NATT 降水样带从北端 Howard Springs 到南端 Ti Tree 上 GPP 和树-草比例空间变化趋势在雨季和旱季的对比，2000-2013。（A）$GPP_{total}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）在雨季和旱季的纬度变化趋势；（B）$GPP_{tree}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）在雨季和旱季的纬度变化趋势；（C）$GPP_{grass}$（g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）在雨季和旱季的纬度变化趋势；（D）树-草指数 TGI（Tree-Grass Index）在雨季和旱季沿纬度的变化趋势。

Figure 8.5 Latitudinal gradient of the 2000-2013 (A) averaged total GPP, $GPP_{tree}$, $GPP_{grass}$, and (B) averaged Tree-Grass Index (TGI) from the north end (131.09°E, 12.171°S) to the south end (133.43°E, 22.9°S) along the 100 NATT transect samples.

沿着 NATT 生态降水样带，$GPP_{tree}$ 在雨季和旱季之间的变化幅度相对较小（图 8.5B）。在雨季， $GPP_{tree}$ 从北部的大约 3 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 向南逐渐减少到 1 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 以下（图 8.5B）。总的来说，北部湿润萨瓦纳地区 $GPP_{tree}$ 在雨季和旱季之间的变化幅度更大，而南部地区 $GPP_{tree}$ 则在雨季和旱季都处于较低的水平(< 1 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$)（图 8.5B）。

与 $GPP_{tree}$ 相反，$GPP_{grass}$ 表现出了更强烈的雨季-旱季差异，特别是在北部湿润萨瓦纳地区（图 8.5C）。在雨季， $GPP_{grass}$ 从北部的 3 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 减少到南部的 1 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$ 以下（图 8.5C）。然而到了旱季， $GPP_{grass}$ 在整个 1100 公里 NATT 样带上 80%左右的地区都小于 0.5 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$（图 8.5C）。有趣的是，在旱季的时候 NATT 样带上 $GPP_{grass}$ 最高值是在中部地区（17°S-21°S），而该地区的植被类型主要是圆丘草地，这可能是因为这些草地上的建群种 *Triodia spp.*（也称为 spinifex）具有硬度非常高的叶片（highly sclerophyll），对干旱具有非常好的适应能力且具有较长的根系，因此在旱季也能够维持一定程度的生长。

沿着 NATT 降水样带，树-草比例在雨季和旱季之间的差异非常显著（图 8.5D）。在旱季，除了中部圆丘草地的某些部分之外，整个 NATT 地区上的树草指数 TGI 都大于 0（亦即 $GPP_{total}$ 中 $GPP_{tree}$ 所占比例更大）（图 8.5D）。但是到了雨季，NATT 大多数地区上的 TGI 降低到 0 以下（亦即 $GPP_{total}$ 中 $GPP_{grass}$ 的贡献更大）（图 8.5D）。

除了整体纬度变化趋势之外，树-草比例在 NATT 样带上同样表现出了一些局部的变化特征（图 8.5D）。在雨季，整个 NATT 样带上的 TGI 大小都非常相似，大约在 -0.50 到 0 之间（图 8.5D）。但是到了旱季，在北部湿润地区的桉树森林和林地（12.5°S-17°S），TGI 保持在 0.6-0.8 之间这样一个较高的水平（图 8.5D）。但是 TGI 在 17°S 之后突然减小，这与从桉树森林和林地过渡到圆丘草地的空间位置大约一致（图 8.5D）。然而 TGI 在 NATT 最南端的干旱萨瓦纳地区重新增加到 0.6 左右，伴随 TGI 增加的是植被类型从圆丘草地过渡到合金欢树林地和灌木林（图 8.5D）。由以上分析可见遥感分解得到的结果基本上反映了 NATT 研究区不同植被结构类型之间树-草比例的空间变化趋势。

### 8.3.3 萨瓦纳植被生产力与降水和植被结构类型之间的关系

为了研究降水和植被类型差异对萨瓦纳植被生产力的影响，本论文分析了整个

NATT 研究区内九种主要的植被类型年平均降水量和年平均 GPP 之间，以及降水年际变率和 GPP 年际变率之间的关系（图 8.6）。对于每一种植被类型，都将其在 NATT 研究区内的所有像元进行平均，以得到每种植被类型降水和 GPP 的平均值。除次之外，因为总的 GPP 可以分解为 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 两部分，图 8.6 上同时显示了 $GPP_{tree}$ 以及 $GPP_{grass}$ 与降水平均值和年际变率之间的关系。

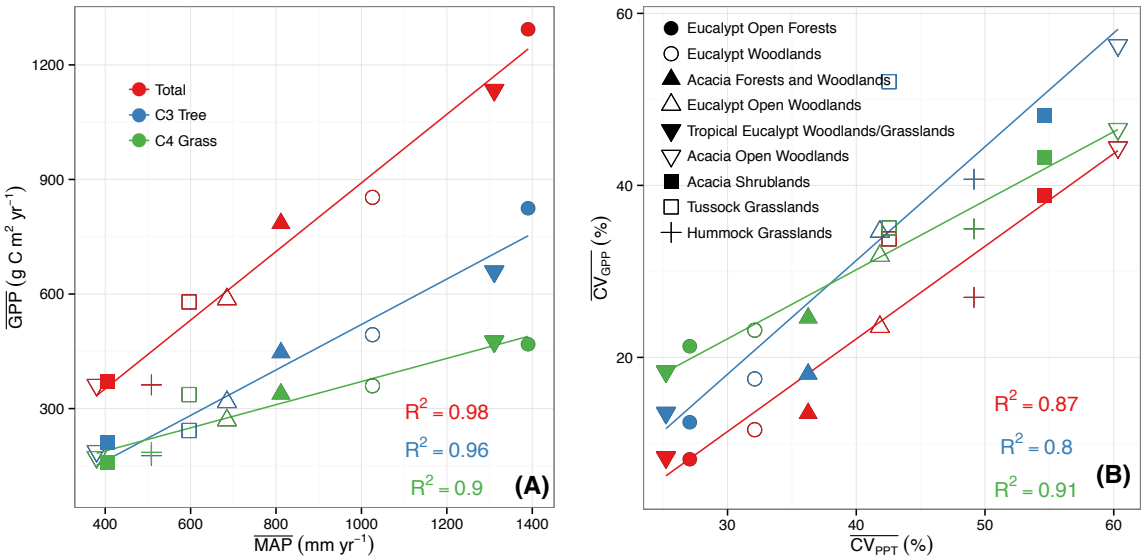


图 8.6 （A）NATT 研究区九个主要植被类型之间年平均降水量（MAP, Mean annual precipitation，mm）和年平均 GPP（包括 $GPP_{total}$，$GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$）之间的关系；（B）主要植被类型之间降水年际变率（$CV_{PPT}$，%）和 GPP 年际变率（$CV_{GPP}$，%）之间的关系。

Figure 8.6 (A) Multiple years mean annual GPP (g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$) and mean annual precipitation (MAP, mm $yr^{-1}$) averaged across major vegetation groups; (B) Coefficient of variance (CV) of annual GPP ($CV_{GPP}$, %) and CV of annual precipitation ($CV_{PPT}$, %) averaged across major vegetation groups.

从图 8.6A 上可以清楚的看到，在不同植被类型之间，年平均降水量（mean annual precipitation, MAP）对年平均 GPP 的空间变异存在极强的解释能力（$R^2 = 0.98$, $p < 0.0001$）。年平均降水量在合金欢开阔林地（*Acacia* open woodlands, MAP = 379.89 mm）和合金欢灌木林（*Acacia* shrublands, MAP = 406.11 mm）两种植被类型上最小，与此对应的年平均 GPP 在这两种植被类型上分别为 361.94 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 和 370 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$（图 8.6A；表 8.2）。年平均降水量在圆丘草地（hummock grasslands）增加到 508.3 mm，但是 GPP 却并未显示出随降水量增加而增加的趋势，圆丘草地的年平均 GPP 只有 362.1 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$（图 8.6A；表 8.2）。圆丘草地的年平均 GPP 同时相比较丛生草地的年平均 GPP（tussock grasslands, 579.29 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）也要小，尽管丛生草地的年平均降水量只比圆丘草地的年平均降水量多 88 mm（图 8.6；表 8.2）。这些反映出降水和植被类型差异对萨瓦纳植被生产力所产生的共同影响。在 NATT 研究区，年平均降水量最高的植被类型为桉树开阔森林（Eucalypt open forests, MAP = 1390.54 mm）和

热带桉树林地（tropical Eucalypt woodlands, MAP = 1311 mm），分别对应的年平均 GPP 为 1293.57 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 和 1134.32 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$（图 8.6；表 8.2）。

在研究区的九个主要植被类型中，降水量年际变率可以解释 GPP 年际变率中 87% 的变异（图 8.6）。GPP 的年际变率在桉树开阔森林最小（8.15%），对应最低的降水量年际变率（27.07%）（图 8.6）。而在合金欢灌木林和合金欢林地，GPP 的年际变率分别增加到 38.86%和 44.42%之多，与此对应的是降水量年际变率的增加，分别为 54.62%和 60.33%（图）。从图上可以看到，在 NATT 研究区的所有植被类型内，降水量的年际变率都要显著高于植被生产力的年际变率，显示出萨瓦纳对降水年际变化具有一定的适应能力。

在 NATT 研究区不同植被类型之间，$GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 的年际变率也呈现出随降水年际变率增加而增加的趋势（图 8.6）。$GPP_{grass}$ 的年际变异系数与降水量之间存在非常强的关系（$R^2 = 0.91$, $p < 0.0001$）（图 8.6）。$GPP_{grass}$ 的年际变异系数从在热带桉树林地的 18.36%逐渐增加到合金欢林地上的 46.56%（图 8.6）。相比较之下，降水年际变异系数和 $GPP_{tree}$ 年际变异系数之间的关系则更为复杂（图 8.6）。$GPP_{tree}$ 的年际变异系数首先从桉树开阔森林的 12.51%增加到合金欢树森林的 18.07%（图 8.6）。接着 $GPP_{tree}$ 的年际变异系数迅速增加，在桉树开阔林地达到了 34.61%，尽管降水年际变异系数从合金欢森林到桉树开阔林地仅仅增加了不到 5%（图 8.6）。$GPP_{tree}$ 的年际变异系数在合金欢开阔林地达到最大值 56.30%（图 8.6）。而合金欢灌木林和圆丘草地的 $GPP_{tree}$ 的年际变异系数也较高，分别为 48.18%和 40.71%（图 8.6）。

### 8.3.4 萨瓦纳 GPP 和树-草比例对极端干旱和极端湿润年份的响应

为了研究 NATT 地区萨瓦纳植被生产力及树-草比例对极端干旱和极端湿润降水年份的响应，图 8.7 显示了 $GPP_{total}$，$GPP_{tree}$，$GPP_{grass}$ 以及树草指数（TGI）沿 1100 公里 NATT 降水样带上在 2000-2013 年之间最干旱年份（driest year）和最湿润年份（wettest year）之间的差异。总的来说，萨瓦纳植被生产力受到降水量变化的影响非常明显（图 8.7）。然而，整个 NATT 南部和北部萨瓦纳地区、以及树和草之间对年降水量的变化表现出不同的敏感性（图 8.7）。在北部由桉树建群的湿润萨瓦纳地区，植被生产力在极端干旱和极端湿润年份仅呈现出微小的变化（图 8.7）。

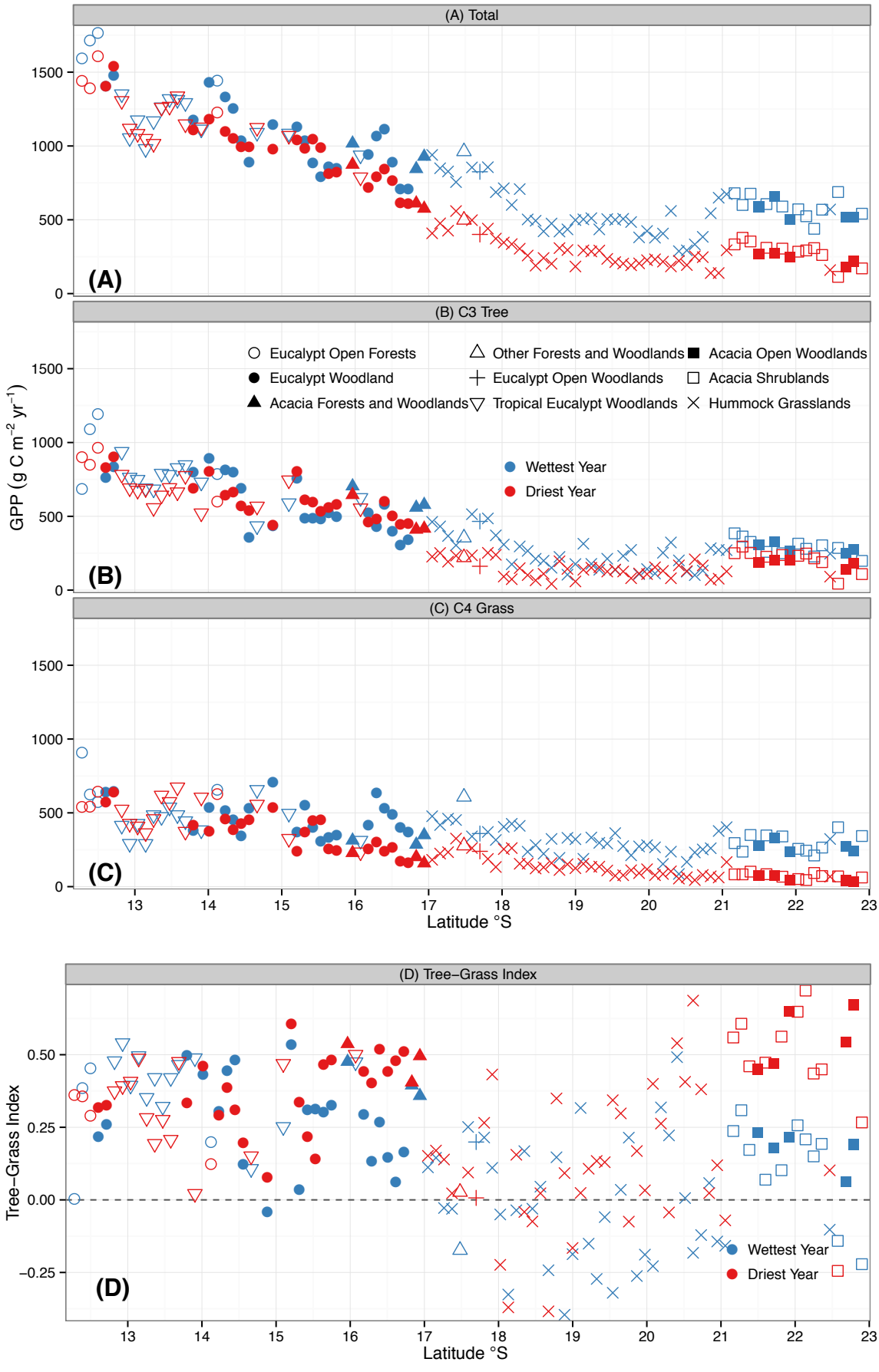
(A) Total
(A)
(B) C3 Tree
(B)
(C) C4 Grass
(C)
GPP (g C m$^{-2}$ yr$^{-1}$)
Eucalypt Open Forests
Eucalypt Woodland
Acacia Forests and Woodlands
Other Forests and Woodlands
Eucalypt Open Woodlands
Tropical Eucalypt Woodlands
Acacia Open Woodlands
Acacia Shrublands
Hummock Grasslands
Wettest Year
Driest Year
Latitude °S
(D) Tree–Grass Index
(D)
Tree–Grass Index
Wettest Year
Driest Year
Latitude °S

图 8.7 NATT 样带上萨瓦纳植被 GPP 和树-草比例从北端（131.09°E, 12.171°S）到南端（133.43°E, 22.9°S）沿纬度的变化趋势，以及在极端湿润年份（wettest year）和极端干旱年份（driest year）之间的差异。（A）$GPP_{total}$；（B）$GPP_{tree}$；（C）$GPP_{grass}$；（D）树-草指数 TGI。对 NATT 上每一个样点的极端湿润和极端干旱年份的判断根据该样点 2000-2013 年的年降水资料（来自澳大利亚气象局提供的数据，Jones et al., 2009）。

图 8.7 Latitudinal gradients in GPP partitioned into (A) $GPP_{total}$; (B) C3 trees and (C) C4 grasses, and (D) Tree-Grass Index during the wettest year and the driest year within 2000-2013 time period of 100 transect samples from the north end (131.09°E, 12.171°S) to the south end (133.43°E, 22.9°S) along the 1100 km NATT transect.The determination of the wettest and the driest year for each transect sample was based on the annual rainfall data from 2000 to 2013 provided by Australian Buruau of Meteorology (Jones et al., 2009).

然而在 17°S 以南，也就是植被类型从桉树萨瓦纳逐渐变为圆丘草地和合金欢树萨瓦纳之后，植被生产力对年降水量变化的响应程度明显增加（图 8.7）。在极端干旱年份，17°S 以南的植被生产力减少非常严重，与湿润年份呈现出巨大的反差（图 8.7）。

通过将 $GPP_{total}$ 分解为 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$，可以分别研究萨瓦纳树和草两部分分别对降水量变化的响应程度。从图 8.7 上可以很明显的看到 $GPP_{total}$ 在湿润年份的增加，或是在干旱年份的减少，主要是因为 $GPP_{grass}$ 相应的增加或减少（图 8.7A，C）。相比较之下，$GPP_{tree}$ 在湿润和干旱年份并未表现出明显的差异（图 8.7B）。

沿着 NATT 样带，$GPP_{tree}$ 从北部湿润萨瓦纳的 1000 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 逐渐减少到中部圆丘草地的 250 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 以下（图 8.7B）。然而有趣的是，在 NATT 南部合金欢树萨瓦纳，尽管降水量仍然呈现减少的趋势，但是 $GPP_{tree}$ 又重新增加到 250 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 以上（图 8.7B）。

图 8.7D 同时显示了树草指数（TGI，亦即树-草比例）沿着 NATT 样带的纬度变化趋势。从图上可以看到尽管降水呈现出沿纬度递减的趋势，但是 NATT 北部地区（12°S-17°S）的萨瓦纳植被生产力中 $GPP_{tree}$ 占更大比例，且树-草比例（TGI）较为稳定，没有呈现出明显的空间变化（图 8.7D）。相反，到了南部 NATT 地区，降水较多的年份植被生产力中来自 $GPP_{grass}$ 的贡献更多，但是在干旱年份，则来自 $GPP_{tree}$ 所占的比例更大（图 8.7）。

### 8.3.5 与地面测量数据之间的比较

总的来说，在 Howard Springs 和 Ti Tree 这两个 NATT 南北端站点上，使用遥感时间序列分解得到的树木和林下草两部分的季节变化与地面 LAI 测量数据所反映出的季节变化比较一致（图 8.8）。虽然在雨季，Ti Tree 站点上 $GPP_{grass}$ 达到最大值的时间（Feb-2011）要比 $LAI_{grass}$ 达到最大值的时间（Mar-2011）提前大约 40 天左右，但是在旱季当降水停止之后（Jul-Oct 2011），$GPP_{grass}$ 和 $LAI_{grass}$ 都迅速减少（图 8.8）。由于在 Ti Tree 站点上 $LAI_{grass}$ 的测量时间分辨率较低，因此无法对遥感分解得到的 $GPP_{grass}$ 在年内的细节变化逐一进行验证。但是通过检视第七章中图 7.11，遥感反演得到的 GPP 时间序列很好的反映了通量塔测量得到的 GPP 时间序列在 Howard

Springs 和 Ti Tree 的季节变化规律。

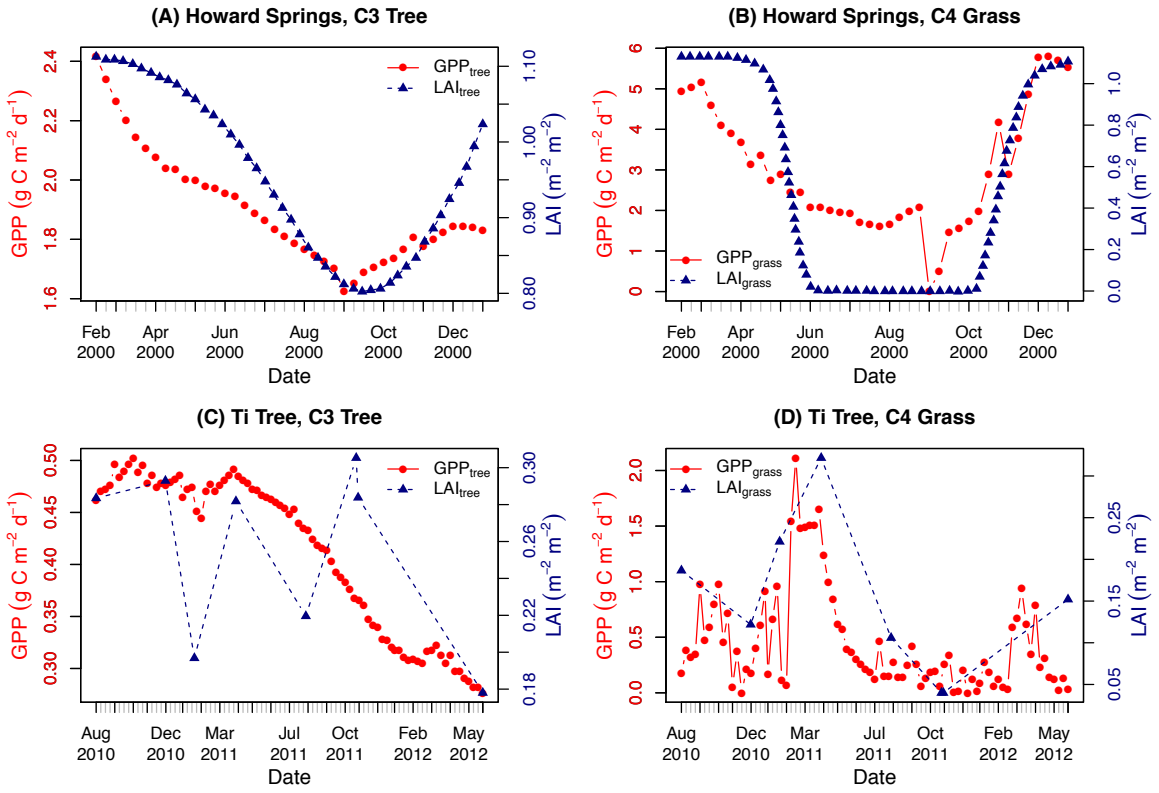


图 8.8 遥感分解得到的树和草的 GPP 季节变化和地面测量得到的树和草的 LAI 季节变化趋势在 NATT 两个站点（Howard Springs 和 Ti Tree）的比较。

Figure 8.8 Time series comparison between decomposed GPP for each PFT and ground measured LAI of tree canopy and understorey grass layers at Howard Springs and Ti Tree respectively.

## 8.4 讨　论

本次研究基于澳洲萨瓦纳树和草之间在季节性上的明显差异，利用时间序列分析模型将遥感反演得到的 GPP 时间序列在像元尺度内分解为树木（$GPP_{tree}$）和林下草（$GPP_{grass}$）两部分。相比较之前的利用遥感观测对萨瓦纳植被的分解主要侧重于结构指数（譬如 LAI 和 FPC）（Roderick et al., 1999; Lu et al., 2003），或是功能参数（譬如 fPAR）（Donohue et al., 2009），本次研究通过将地面通量塔测量和遥感观测进行结合，首次完成对萨瓦纳 GPP 在像元尺度上的分解。

在整个 NATT 研究区，从北部湿润萨瓦纳向南部干旱萨瓦纳，GPP 呈现出逐渐减少的趋势，而与此对应的是植被结构类型从桉树森林和林地过渡为圆丘草地和合金欢树林地和灌木林。GPP 沿纬度从 12.5°S 到 18°S 的减少趋势与之前 Kanniah 等(2011)的研究所得到的结果非常一致。但是，本次研究通过将 $GPP_{total}$ 分解为 $GPP_{grass}$ 和 $GPP_{tree}$，分别对 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 的空间变异以及与环境要素之间的关系进行了研究。

研究发现在 NATT 地区 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 同样呈现出从北到南沿纬度逐渐递减的趋势。该发现与 Bowman（1996）的研究显示树木冠层盖度沿 NATT 从北到南递减的

趋势一致。Sea 等(2011)的研究也发现树木的 LAI 沿 NATT 从北到南呈现出逐渐减少的趋势。除此之外，本次研究发现在 18.5°S - 21.5°S 这段范围内，$GPP_{tree}$ 出现一个局部低谷，而这与 Bowman（1996）的研究发现在 18.5°S 到 21.5°S 之间的树木冠层盖度是整个 NATT 样带上最低的范围非常一致。这些说明本次研究利用遥感时间序列分解方法得到的萨瓦纳树木生产力的空间变化基本反映了研究区的地面真实情况。

与以往对树木盖度、LAI 和生物量等已经进行了大量地面测量不同，对于林下草的研究到目前为止相对较少。这主要是因为林下草非常强烈的生长季节性，需要在一个生长季内进行足够多次的测量才能捕捉到其完整的年内生长模式，无疑增加了地面测量的难度。本次研究发现，NATT 地区 $GPP_{grass}$ 从北部的 500 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 逐渐减少到南部的 200 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$ 以下。同时，$GPP_{grass}$ 沿纬度的递减趋势（斜率）为每纬度-46 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$（$R^2 = 0.85$, $p < 0.0001$），而这要小于 $GPP_{tree}$ 沿纬度的递减趋势（每纬度-66.65 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$，$R^2 = 0.77$, $p < 0.0001$）。这主要是因为 $GPP_{tree}$ 在 17°S 到 18°S 之间的急剧减少，而这对应植被结构类型从桉树森林和林地到圆丘草地的转变。因此整个 NATT 地区 GPP 沿纬度的递减趋势中，很大一部分（59%）是由于 $GPP_{tree}$ 的减少。

基于对树-草比例空间模式的分析，发现 NATT 地区可以根据树-草比例大致划分为三个区域，分别以纬度 17°S 和纬度 21°S 为界限。在 17°S 以北的 NATT 地区，植被生产力中来自于树木的贡献占了更大的比例，但是树木所占的比例向南逐渐减少，到 17°S-21°S 之间时，林下草的 GPP 占了更大的比例。但是到了 NATT 最南端（21°S-23°S），树木的生产力再次增加，最终使得 NATT 南部干旱地区的植被生产力中来自常绿树木的 GPP 占了更大比例。

NATT 研究区不同地区的植被生产力分别由树木和草地占主导，这反映了区域气候模式对植被结构的影响。常绿树木为了在旱季也能够维持光合作用，需要大量的汲取地下深层的土壤水分（Williams et al., 1997; Eamus et al., 2013）。Egan & Williams (1996)等人的研究发现，年降水变率沿 NATT 样带从北到南呈现出增加的趋势，而这主要是因为北澳夏季季雨（Australian summer monsoon）向南部的延伸范围具有较大的年际变率，即某些年份季雨的覆盖范围只达到 NATT 北部，而某些年份则能够向南延伸到 NATT 南部的内陆干旱地区（Suppiah, 1992; Cook & Heerdegen, 2001）。

土壤类型在一定程度上决定了植被对土壤中养分和水分的利用能力，因此同样会对萨瓦纳植被结构（亦即树-草比例）产生重要影响。Walker（1993）发现树木密度在沙土（sandy soil）上要比在粘土（clay soil）上更高，而这主要是因为降水在沙土上具有更高的下渗能力，而深入到土壤深层的地下水则主要被树木的生长利用。Williams 等(1996)同样发现树木的胸高断面积（basal area）与平均年降水量的减少以及土壤中粘粒含量（soil clay content）的增加呈现显著的负相关。

温度也能对萨瓦纳植被结构和组成产生一定的影响。Bowman（1996）发现 18°S

到 21.5°S 之间，由桉树建群的林地逐渐过渡为由合金欢树建群的林地和灌木林，这主要是因为海拔增加所导致冬季最低温的降低限制了桉树幼苗的生长。

除了以上提到的各种环境因素之外，萨瓦纳地区的林火同样会对树-草比例产生非常重要的影响。比如说，以往的研究发现当对样方进行多年的林火控制之后，样方内树木所占的比例会明显增加（Higgins et al., 2007; Russell-Smith et al., 2003）。以上这些讨论说明决定萨瓦纳植被结构，亦即树-草比例的原因非常复杂，总的来说包括降水、温度、林火频率，以及土壤类型等。接下来的研究需要对这些影响萨瓦纳植被树-草比例的环境要素进行更为详细的分析，以判定某一地区决定萨瓦纳树-草比例的主要环境因素。

整个 NATT 地区对降水变率的敏感性呈现出明显的南北差异。在北部湿润萨瓦纳，植被类型主要为桉树森林和林地，对降水年际变率的响应程度非常小。相比较之下，南部干旱萨瓦纳对降水年际变率呈现出较强的响应。在降水较少的旱年，南部 NATT 地区的 GPP 显著减少，而在类似 2010-2011 拉尼娜（La Niña）年，植被生产力则出现明显的增加。这些说明 NATT 南部干旱萨瓦纳地区更容易受到未来气候变化可能导致降水变率增加的影响。

通过将 $GPP_{total}$ 分解为 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$，分别研究了萨瓦纳中树和草两部分对降水变率响应程度的差异。在 NATT 研究区，当年降水量减少时，植被生产力的减少主要是由于 $GPP_{grass}$ 的减少，而 $GPP_{tree}$ 对降水量的变化并不是很敏感。树-草比例在干旱年份出现增加的趋势，特别是在南部 NATT 地区。总的来说，萨瓦纳植被生产力和树-草结构的年际变率主要来自于林下层草对降水年际变率的响应。

本次研究的发现具有很多重要的意义。首先，气候模式预测澳大利亚北部萨瓦纳地区未来的气候将会变的更为炎热，且降水量会有一定程度的减少（Henessy et al., 2004）。然而 NATT 南北地区的气候在未来的变化趋势并不完全相同。NATT 北部较为湿润的地区在旱季的降水量会增加，而升温则主要集中在 NATT 南部较为干旱的地区（Hennessy et al., 2004）。这些可能发生的气候变化将会对区内碳、水、能量平衡产生重要影响。譬如，2007-2008 年是一个显著的旱年，NATT 区域内所有像元的平均 GPP 在这一年仅仅为 574.29 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$，只有 2000-2001 年 GPP（809.30 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）的 71%，或 2010-2011 年 GPP（743.44 g C $m^{-2}$ $yr^{-1}$）的 77%。如果将 NATT 地区以纬度 18°S 为界限划分为南北两部分的话，则降水充沛年份和干旱年份植被生产力的差异更明显。北部 NATT 地区（12°S-18°S）GPP 的年际变率（CV）仅仅为 6.11%。而南部 NATT 地区（18°S-23°S）GPP 的年际变率（CV）达到了 24.35%。这些说明 NATT 南部干旱萨瓦纳生态系统更有可能受到未来气候变化的影响。

## 8.5 结 论

通过对澳大利亚热带萨瓦纳植被中树和草的生长季节性和物候特征的认识，本次研究将遥感反演得到的萨瓦纳 GPP 在像元尺度上分解为树木和林下草两部分。将树-草分解模型应用到 13 年的 MODIS 数据以后，对整个 NATT 地区萨瓦纳植被生产力和树-草比例的时空变异进行了研究，并分析了萨瓦纳植被生产力与降水和植被结构类型之间的关系。研究发现在 NATT 研究区 $GPP_{tree}$ 和 $GPP_{grass}$ 均呈现出沿纬度逐渐减少的趋势。在 NATT 最南部，植被生产力和树-草比例呈现出再次增加的趋势，对应了植被类型从圆丘草地到合金欢林地和灌木林的转变。NATT 地区植被生产力在降水充沛年份的增加或在干旱年份的减少，主要是因为 $GPP_{grass}$ 的增加或减少，而 $GPP_{tree}$ 对降水量的年际变化并不敏感。整个 NATT 地区对降水的响应呈现出明显的南北差异，北部湿润萨瓦纳的植被生产力和树-草比例对降水量改变的响应程度较小，但是南部 NATT 地区植被生产力和树-草比例则呈现出较高的年际变率。本章研究结果说明，热带萨瓦纳植被对未来气候变化下可能发生的降水变率增加的敏感性大小，可能和群落内树-草比例有关。亦即群落内树-草比例越高，植被生产力对降水变率增加的敏感性越小，反之则越大。

# 第九章 结论与展望

物候学研究植物和动物的季节性变化规律以及其与环境要素之间的关系（竺可桢和宛敏渭, 1963）。在目前气候变化的背景下，作为生态系统对气候变化响应程度的一种直观体现，受到科学界广泛关注。在整个地球气候系统中，植被是气候变化的重要调控因子。因此对植被物候切合真实的描述以及准确的观测和模拟，将会显著提高模型对全球陆地生态系统碳、水、能量循环的模拟精度。萨瓦纳作为全球重要生物群系之一，其复杂性主要体现在由不同植被功能型构成的树-草分层结构，且每一层均有其独特的生理生态特征及对环境要素的响应方式。同时，萨瓦纳植被的树-草比例无论是在空间上还是在时间尺度上都处于连续的变化之中，这无疑增加了对萨瓦纳植被物候和其它生态系统功能进行研究的难度，并对在模型中准确参数化萨瓦纳植被结构及功能提出了巨大的挑战。

本研究选取由 IGBP 设定的北澳热带典型降水样带（NATT）为研究区，结合遥感、涡度相关和和气象三种观测方法和数据源，对热带萨瓦纳植被物候模式及初级生产力的时空变异及其与环境要素之间的关系进行了分析。本论文首先从遥感观测入手，提出了一种新的萨瓦纳物候参数反演方法，并在站点尺度上使用通量数据对遥感反演结果进行了比较和验证。接着利用植被分类和气象观测资料分析了萨瓦纳物候和降水以及植被结构类型之间的关系，并分析了萨瓦纳植被物候在 1100 公里降水样带上的空间变化趋势以及在 13 年时间尺度上的年际变化规律和对降水变率的响应。同时，本论文分析了不同萨瓦纳植被类型生长季开始所需累计降水量，并在区域尺度上检验了基于累计降水对萨瓦纳植被生长季开始时间进行模拟的方法。最后，本论文探索了通过将遥感和地面通量观测进行有效结合，以在区域尺度上获取更多萨瓦纳植被重要生态系统参数的方法，包括植被总初级生产力和树-草比例等。

## 9.1 主要结论

1. 通过对热带萨瓦纳植被生长特点的分析，发展了一种新的基于奇异波谱分析（Singular Spectrum Analysis, SSA）来从 MODIS EVI 时间序列中提取多种萨瓦纳植被物候指数的方法。该方法具有适应性强且结果客观等优点，适合被应用到植被生长曲线非常不规则、且物候年际变率非常高的热带萨瓦纳地区。由于奇异波谱分析在数学上是一种无参方法，因此避免了传统的基于参数模型（譬如逻辑斯蒂模型）在萨瓦纳地区无法对不规则植被指数曲线进行拟合的缺陷。同时基于变化速率来判定植被生长季开始或结束时间的方法又比基于阈值的判定方法更为客观，因此该方法是一种在区域尺度上从遥感观测中提取萨瓦纳植被物候指数的有效方法；

2. 通过从 MODIS EVI 和通量塔 GPP 中提取物候参数并进行比较，发现遥感反演结果基本能够反映萨瓦纳植被的地面真实物候信息。MODIS EVI 和通量塔 GPP 在北部湿润萨瓦纳地区的契合程度较好，遥感反演得到的植被生长季开始和结束时间等误差较小。但是在南部干旱萨瓦纳站点上，MODIS EVI 和通量塔 GPP 在生长季结束阶段出现了“滞后效应”（hysteresis effect），亦即 EVI 在生长季结束阶段的下降要滞后于 GPP 的下降，因而使得从 EVI 中提取出的生长季结束时间要晚于从 GPP 中提取出的生长季结束时间。总的来说，遥感反演生长季峰值时间的误差最小，生长季开始时间次之，而遥感反演生长季结束时间在萨瓦纳地区的不确定性最高；

3. 萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水量空间差异非常大，且生长季开始所需累积降水和年平均降水量之间存在显著负相关。北部湿润萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水较小，通常在 25 毫米以内。而南部干旱和半干旱萨瓦纳地区植被生长季开始所需累积降水量达到 50 毫米以上。利用累积降水模型对 2011-2012 年区域植被生长季开始时间进行模拟的结果与遥感观测结果之间的误差分析显示，在研究区 70%的像元内使用累积降水对生长季开始时间的预测误差均小于 30 天，而其中 56%的区域内误差在 15 天之内。考虑到萨瓦纳植被结构的复杂性和较高的降水变率，使用累积降水量来有预测萨瓦纳植被生长季开始时间的方法在总体上是可行的。但是同时发现在南部干旱和半干旱萨瓦纳地区误差较高，说明该方法在降水变率较高的地区存在较大的改进空间；

4. NATT 地区植被物候随纬度（亦即降水梯度）的变化不是线性的，而是由于受不同气候类型控制而在南北两部分呈现出截然不同的时空变异模式。北部湿润地区植被生长主要受雨季降水的影响，该地区植被物候所表现出的较强的纬度变化趋势主要来自林下草对雨季开始时间差异的响应。整个研究区植被生长季在北部萨瓦纳地区开始和结束的较早，然后向南逐渐推迟。在南部干旱萨瓦纳地区，植被物候的年际变率呈现出明显的增加趋势。同时发现在不同植被类型上，植被生长季长度的年际变率和降水量年际变率之间具有较强的相关性（$R^2 = 0.80$, $p < 0.0001$）。而在研究区的主要植被类型中，由合金欢树建群的萨瓦纳植被生长和物候对降水量的年际变化具有较强的响应程度，说明这些植被类型更容易受到未来气候变化所可能导致的降水变率增加的影响；

5. 区域尺度上的萨瓦纳植被总初级生产力可以通过将遥感观测和地面通量塔测量相结合进行较为准确的估算。研究发现在 NATT 研究区的六个萨瓦纳通量塔站点上，MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间存在非常好的相关性（$R^2 = 0.83$, $p < 0.0001$）。在进一步对几种遥感 GPP 反演模型进行比较的基础上，本论文提出了一个新的萨瓦纳 GPP 遥感反演模型。该模型通过将 EVI 和大气层之上太阳辐射（$R_{TOA}$）相结合，具有较强的对地面通量塔 GPP 的模拟能力（$R^2 = 0.85$, $p < 0.0001$, RMSE = 0.78 g C $m^{-2}$

$d^{-1}$)，远优于基于光能利用效率（LUE）的 MODIS 全球 GPP 产品（$R^2 = 0.59$, $p < 0.0001$, RMSE = 1.40 g C $m^{-2}$ $d^{-1}$）。将该模型应用到整个 NATT 区域尺度上之后，发现模拟结果较好地反映了该地区植被生产力随降水变化而变化的空间分布模式。该模型充分地利用了遥感和通量塔观测优势，将两者进行有效结合以简化对萨瓦纳区域植被生产力的估算。该模型结构简单，且所需数据较易获取，因而有潜力被应用到全球其它植被类型；

6. 基于澳洲萨瓦纳树木和林下草之间在生长季节性（亦即物候特征）上的显著差异，将遥感估算的 GPP 在像元尺度通过时间序列数学模型分解为来自树木和来自林下草两部分。将树-草分解模型应用到整个 NATT 研究区之后，发现北澳萨瓦纳树-草比例在总体上呈现出从北到南的递减趋势。同时发现萨瓦纳植被生产力在雨量充沛年份的增加，或是在干旱年份的减少,主要是因为林下草 GPP 在雨年的增加或在旱年的减少。而树木则因为具有较长的根系，能够在干旱期汲取地下水以维持生长所需，因此对降水量的年际变化并不敏感。这些研究结果说明，热带萨瓦纳植被对未来气候变化下可能发生的降水变率增加的敏感性大小，可能和群落内树-草比例有关。亦即群落内树-草比例越高，植被生产力对降水变率增加的敏感性越小，反之则越大。

## 9.2 讨论和展望

准确理解全球萨瓦纳植被的现状及正在发生的变化，可以提高我们这一全球重要生物群系在未来气候变化背景下有可能发生改变的预测能力。由于全球萨瓦纳正在经历快速的土地利用变化和高强度的人类活动干扰（Walker, 1982; Hill et al., 2013），使得萨瓦纳在生态系统功能的各个方面都经历着急剧的变化（Asner et al., 1998）。这些都要求我们提高对萨瓦纳这一复杂生态系统及其与环境要素之间关系的认识水平。本论文结合遥感、涡度相关和气象三种观测方法和数据源，在不同时空尺度上对北澳典型热带降水样带(NATT)上萨瓦纳植被物候模式和初级生产力进行了研究。然而由于萨瓦纳本身的复杂性和其与环境要素之间关系的复杂性，该领域仍有大量的工作需要深入和发展，作者将就此展开如下概括性的评论和展望：

1. 基于奇异波谱分析的遥感植被物候反演方法虽然具有适应性好且提取结果客观等优点，但是在本次应用中，对整个研究区不同萨瓦纳植被类型使用了相同的奇异波谱分析参数设定。这样的设定虽然避免了由于设定不同参数而带来的主观影响，并且简化了该方法在区域尺度上的应用。但是，这样的简化也造成了该方法在植被生长模式非常不规律的地区所提取出的植被物候指数不确定性增加的问题。将来的研究中可以考虑在不同萨瓦纳地区应用不同的奇异波谱分析参数设定，以更好的区域尺度上提取萨瓦纳植被生长季的关键物候参数；

2. 遥感观测由于受到云层和气溶胶的干扰，其数据本身存在一定的误差。尤其是在热带萨瓦纳地区，在雨季由于长时间的云层覆盖，很难在一个数据融合周期（16天）内获取到高质量的对地观测。未来的研究可以考虑将多种遥感观测数据源结合起来，譬如将传统的光学遥感传感器（譬如 MODIS）和合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）结合，利用 SAR 全天候以及对云层具有穿透观测能力的优势，实现对萨瓦纳植被生长和物候更为有效的观测；

3. 由于缺乏地面物候观测，因此本论文采用地面通量塔测量的 GPP 数据来对遥感观测进行验证。虽然在北部湿润萨瓦纳地区 MODIS EVI 和通量塔 GPP 之间的契合程度非常好，但是在南部干旱萨瓦纳地区，EVI 和 GPP 在生长季结束阶段出现较为明显的“滞后效应”，这无疑增加了遥感反演出的植被物候，尤其是生长季结束时间在南部干旱萨瓦纳地区的不确定性。接下来需要分析造成这种现象的具体成因，并研究如何减轻或消除这种现象，以增加遥感提取物候参数在干旱萨瓦纳地区的可靠性；

4. 基于累积降水来模拟热带萨瓦纳植被生长季的开始时间虽然在总体上可行，但是该方法在南部干旱和半干旱地区存在较大的误差。考虑到区域尺度上数据的可获得性，本论文主要采用了降水这一气象要素。然而以往的研究发现，萨瓦纳植被生长对土壤水分变化的响应比对降水的响应更直接。然而到目前为止，在区域尺度上对土壤水分进行高空间分辨率和高时间分辨率的反演仍然是遥感所面临的一大挑战。随着微波遥感技术在土壤水分反演方面的快速发展，期冀在不久的将来可以通过在模型中引入遥感反演土壤水分数据，以实现对萨瓦纳植被物候和生产力在空间尺度上更好的模拟；

5. 目前主流的基于遥感观测的植被总初级生产力反演模型仍然需要依赖大量的气象要素输入，因此无疑增加了模拟结果的不确定性。本论文发展出了一种完全基于遥感数据的 GPP 反演方法，简化了对区域尺度上植被生产力的估算。但是该模型仍然存在一定的局限。首先是模型中缺乏对水分限制植被光合的考虑，尤其是在干旱萨瓦纳地区（或旱季）这一缺陷更加明显。因此未来的研究中可以考虑如何在模型中加入一个能够反映土壤水分变化的变量，以提高模型在干旱萨瓦纳地区以及旱季时对 GPP 的模拟精度。其次，该模型仅在澳洲萨瓦纳地区进行了检验。接下来的研究中可以和全球其它萨瓦纳地区的科研人员进行合作，在不同的萨瓦纳植被类型上验证模型的可用性。并对模型结构进行必要的调整，以实现在区域尺度上对萨瓦纳植被初级生产力更为准确的估算；

6. 本论文探索了使用时间序列数学模型将遥感反演得到的萨瓦纳 GPP 在像元尺度分解为树和草的方法。但是由于该树-草分解模型本身需要较强的假设，无疑限制了其应用范围。譬如在落叶树木而不是常绿树木占主导的非洲萨瓦纳地区，需要对模型结构进行一定的调整。同时，未来的研究中可以通过将高光谱分辨率、高空间分辨

率以及高时间分辨率的遥感数据进行多源数据融合，并结合更多的地面观测数据，以探索在不同尺度上对萨瓦纳植被进行树和草的分解尝试。这些研究方向上所取得的进展不仅会增加我们对萨瓦纳生态系统的认识，同时也为我们更好地研究这一全球重要生物群系提供新的视角和手段。

# 参考文献


1. 戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 近 50 年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化. 地理学报，2013, 68(5), 593-601.
2. 葛全胜，郑景云，张学霞，郝志新. 过去 40 年中国气候与物候的变化研究. 自然科学进展, 2003, 13(10): 1048-1053.
3. 牟成香, 孙庚, 罗鹏, 王志远, 罗光荣.青藏高原高寒草甸植物开花物候对极端干旱的响应. 应用与环境生物学报, 2013, 19(002), 272-279.
4. 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法. 北京：科学出版社, 1979.
5. 温刚, 符淙斌. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征: 多年平均结果. 大气科学, 2000, 24(5), 676-682.
6. 袁婧薇, 倪健. 中国气候变化的植物信号和生态证据. 干旱区地理, 2007, 30(4), 465-473.
7. 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 遥感技术在植物物候研究中的应用综述. 地球科学进展, 2003, 18(4): 534-544.
8. 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学普及出版社, 1963.
9. 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973.
10. Ahl, D. E., Gower, S. T., Burrows, S. N., Shabanov, N. V., Myneni, R. B., & Knyazikhin, Y. Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(1), 88–95.
11. Alexandrov, T. A method of trend extraction using singular spectrum analysis. RevStat, 2009, 7(1, SI), 1–22.
12. Anderson, A. N., Braithwaite, Cook, G. D., Corbett, L. K., Williams, R. J., Douglas, M. M., et al., Fire research for conservation management in tropical savannas: introducing the Kapalga fire experiment. Austral Ecology, 1998, 23(2), 95–110.
13. Andrew, M. H., & Mott, J. J. Annuals with transient seed banks: the population biology of indigenous Sorghum species of tropical north-west Australia. Austral Ecology, 1983, 8(3), 265–276.
14. Archibald, S., & Scholes, R. J. Leaf green-up in a semi-arid African savanna -separating tree and grass responses to environmental cues. Journal of Vegetation Science, 2007, 18(4), 583–594.
15. Asner, G. P., Bateson, C., Privette, J. L., El-Saleous, N., & Wessman, C. A. Estimating vegetation structural effects on carbon uptake using satellite data fusion and inverse modeling. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(D22), 28839–28853.
16. Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., & A Hicke, J. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. Global Ecology and Biogeography, 2003, 12(3), 191–205.
17. Badeck, F. W. et al. Responses of spring phenology to climate change. New Phytologis, 2004, 162, 295-309
18. Baldocchi, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. Global Change Biology, 2003, 9(4), 479–492.
19. Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., et al. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water

Vapor, and Energy Flux Densities. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11), 2415.

20. Bateson, C. A., Asner, G. P., & Wessman, C. A. Endmember bundles: a new approach to incorporating endmember variability into spectral mixture analysis. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2000, 38(2), 1083–1094.
21. Beck, P., Atzberger, C., Hogda, K. A., Johansen, B., & Skidmore, A. K. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3), 321–334.
22. Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., et al., Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. Science, 2010, 329(5993), 834–838.
23. Beringer, J., Hacker, J., Hutley, L. B., Leuning, R., Arndt, S. K., Amiri, R., et al., SPECIAL—Savanna Patterns of Energy and Carbon Integrated across the Landscape. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(11), 1467–1485.
24. Beringer, J., Hutley, L. B., Tapper, N. J., & Cernusak, L. A. Savanna fires and their impact on net ecosystem productivity in North Australia. Global Change Biology, 2007, 13(5), 990–1004.
25. Bond, W. J., Midgley, G. F., & Woodward, F. I. The importance of low atmospheric CO2 and fire in promoting the spread of grasslands and savannas. Global Change Biology, 2003, 9(7), 973–982.
26. Borchert, R. Induction of rehydration and bud break by irrigation or rain in decidous trees of a tropical dry forest in Costa Rica. Trees, 1994, 8(4).
27. Bowman, D. Diversity patterns of woody species on a latitudinal transect from the monsoon tropics to desert in the Northern Territory, Australia. Australian Journal of Botany, 1996, 44(5), 571–580.
28. Bowman, D. M. J. S., Brown, G. K., Braby, M. F., Brown, J. R., Cook, L. G., Crisp, M. D. et al., Biogeography of the Australian monsoon tropics. Journal of Biogeography, 2010, 37(2), 201–216.
29. Bowman, D., Wilson, B., & Dunlop, C. Preliminary biogeographic analysis of the Northern Territory vascular flora. Australian Journal of Botany, 1988, 36(5), 503–517.
30. Brown, M. E., & de Beurs, K. M. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5), 2261–2271.
31. Buermann, W. Analysis of a multiyear global vegetation leaf area index data set. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D22), 4646.
32. Butt, B., Turner, M. D., Singh, A., & Brottem, L. Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12), 3367–3376.
33. Campos, G. E. P., Moran, M. S., Huete, A., Zhang, Y., Bresloff, C., Huxman, T. E., et al., Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. Nature, 2013, 494(7437), 349-352.
34. Carlson, T. N., & Ripley, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3), 241–252.
35. Cernusak, L. A., Hutley, L. B., Beringer, J., Holtum, J. A. M., & Turner, B. L. Photosynthetic physiology of eucalypts along a sub-continental rainfall gradient in northern Australia. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(11), 1462–1470.
36. Chen, X., & Vierling, L. Spectral mixture analyses of hyperspectral data acquired using a tethered

balloon. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(3), 338–350.

37. Chen, X., Hu, B., & Yu, R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. Global Change Biology, 2005, 11(7), 1118–1130.
38. Chuine, I. & Cour, P. Climatic determinants of budburst seasonality in four temperate-zone tree species. New Phytologist, 1999, 143, 339-349.
39. Cleverly, J., Boulain, N., Villalobos-Vega, R., Grant, N., Faux, R., Wood, C., et al., Dynamics of component carbon fluxes in a semi-arid Acacia woodland, central Australia. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(3), 1168–1185.
40. Cook, G. D. Rainfall reckoning in rangelands: The case of north Australian savannas. Range Management Newsletter, 1998, 98, 10–12.
41. Cook, G. D., & Heerdegen, R. G. Spatial variation in the duration of the rainy season in monsoonal Australia. International Journal of Climatology, 2001, 21(14), 1723–1732.
42. Dai, J., Wang, H., & Ge, Q. The spatial pattern of leaf phenology and its response to climate change in China. International Journal of Biometeorology, 2013, 1–8.
43. Davenport, M. L. & Nicholson, S. E. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa International Journal of Remote Sensing, 1994, 14, 2369-2389.
44. de Beurs, K. M., & Henebry, G. M. Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere-Biosphere Program high-latitude transects. Global Change Biology, 2005, 11(5), 779–790.
45. Defries, R. S., Townshend, J. R. G., & Hansen, M. C. Continuous fields of vegetation characteristics at the global scale at 1-km resolution. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(D14), 16911.
46. Donohue, R. J., McVicar, T. R., & Roderick, M. L. Climate-related trends in Australian vegetation cover as inferred from satellite observations, 1981-2006. Global Change Biology, 2009, 15(4), 1025–1039.
47. Duff, G. A., Myers, B. A., Williams, R. J., Eamus, D., OGrady, A., & Fordyce, I. R. Seasonal Patterns in Soil Moisture, Vapour Pressure Deficit, Tree Canopy Cover and Pre-dawn Water Potential in a Northern Australian Savanna. Australian Journal of Botany, 1997, 45(2), 211–224.
48. Eamus, D., & Prior, L. Ecophysiology of trees of seasonally dry tropics: comparisons among phenologies. Advances in Ecological Research, 2001, 32, 113–197.
49. Eamus, D., Cleverly, J., Boulain, N., Grant, N., Faux, R., & Villalobos-Vega, R. Carbon and water fluxes in an arid-zone Acacia savanna woodland: An analyses of seasonal patterns and responses to rainfall events. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182, 225-238.
50. Eamus, D., O'Grady, A. P., & Hutley, L. B. Dry season conditions determine wet season water use in the wet-dry tropical savannas of northern Australia. Tree Physiology, 2000, 20(18), 1219–1226.
51. Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. Science, 2000, 289(5487), 2068–2074.
52. Elsner, J. B., & Tsonis, A. A. Singular spectrum analysis: a new tool in time series analysis. New York: Plenum Press, 1996.
53. Fensham, R. J., & Fairfax, R. J. Assessing woody vegetation cover change in north-west Australian savanna using aerial photography. Int. J. Wildland Fire, 2003, 12(4), 359–367.

54. Field, C. B., Lobell, D. B., Peters, H. A., & Chiariello, N. R. Feedbacks of Terrestrial Ecosystems to Climate Change. Annual Review of Environment and Resources, 2007, 32(1), 1–29.
55. Field, C., & Randerson, J. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment, 1995, 88, 74–88.
56. Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C. F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., et al. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1–2), 287–302.
57. Frost, P., Medina, E., Menaut, J.-C., Solbrig, O., Swift, M., & Walker, B. Responses of savannas to stress and disturbance: A proposal for collabrative programme of research. Biology International, 1986, 10, 81.
58. Fuller, D., & Prince, S. Rainfall and foliar dynamics in tropical Southern Africa: Potential impacts of global climatic change on savanna vegetation. Climatic Change, 1996, 33(1), 69–96.
59. Ge, Q., Wang, H., & Dai, J. Shifts in spring phenophases, frost events and frost risk for woody plants in temperate China. Climate research, 2013, 57(3), 249-258.
60. Ge, Q., Wang, H., Zheng, J., This, R., & Dai, J. A 170-year spring phenology index of plants in eastern China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, accepted article.
61. Ghil, M., Allen, M. R., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E., et al. Advanced spectral methods for climatic time series. Review of Geophysics, 2002, 40(1), 1003.
62. Gill, T. K., Phinn, S. R., Armston, J. D., & Pailthorpe, B. A. Estimating tree-cover change in Australia: challenges of using the MODIS vegetation index product. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(6), 1547–1565.
63. Gillison, A. N. Towards a functional vegetation classification. Vegetation Classification in Australia, 1981, 30–41.
64. Gilmanov, T. G., Verma, S. B., Sims, P. L., Meyers, T. P., Bradford, J. A., Burba, G. G., & Suyker, A. E. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO2-flux tower measurements. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2), 1071.
65. Gitelson, A. A., Peng, Y., Masek, J. G., Rundquist, D. C., Verma, S., Suyker, A., et al. Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data. Remote Sensing of Environment, 2012, 121(0), 404–414.
66. Gitelson, A. A., Viña, A., Verma, S. B., Rundquist, D. C., Arkebauer, T. J., Keydan, G., et al. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D8), D08S11.
67. Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. Sensors, 2008, 8(4), 2136–2160.
68. Goward, S. N., & Huemmrich, K. F. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model. Remote Sensing of Environment, 1992, 39(2), 119–140.
69. Goward, S. N., Tucker, C. J., & Dye, D. G. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. Vegetatio, 1985, 64(1), 3–14.
70. Guerschman, J. P., Van Dijk, A. I. J. M., Mattersdorf, G., Beringer, J., Hutley, L. B., Leuning, R.,

et al. Journal of Hydrology. Journal of Hydrology, 2009, 369(1-2), 107–119.

71. Hanan, N. P., Burba, G., Verma, S. B., Berry, J. A., Suyker, A., & Walter-Shea, E. A. Inversion of net ecosystem $CO_2$ flux measurements for estimation of canopy PAR absorption. Global Change Biology, 2002, 8(6), 563–574.
72. Hanninen, H. Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits. Tree Physiology, 2006, 26(7), 889–898.
73. Hansen, M. C., Defries, R. S., Townshend, J. R. G., Carroll, M., Dimiceli, C., & Sohlberg, R. A. Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. Earth Interactions, 2003, 7(1), 1–15.
74. Hashimoto, H., Wang, W., Milesi, C., White, M. A., Ganguly, S., Gamo, M., et al. Exploring Simple Algorithms for Estimating Gross Primary Production in Forested Areas from Satellite Data. Remote Sensing, 2012, 4(12), 303–326.
75. Heinsch, F. A., Maosheng Zhao, Running, S. W., Kimball, J. S., Nemani, R. R., DAVIS, K. J., et al. (2006). Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 44(7), 1908–1925.
76. Hennessy, K., Page, C., McInnes, K., Walsh, K., Pittock, B., Bathols, J., & Suppiah, R. Climate change in the Northern Territory. Melbourne: University of Melbourne, 2004.
77. Higgins, S. I., Cartay, M.D.D., February, E. C., & Combrink, H. J. Is there a temporal niche separation in the leaf phenology of savanna trees and grasses? Journal of Biogeography, 2011, 38(1), 2165–2175.
78. Hill, M. J., & Hanan, N. Current approaches to measurement, remote sensing, and modeling in savannas. Ecosystem Function in Savannas (pp. 515–545). CRC Press, 2013.
79. Hill, M. J., Román, M. O., Schaaf, C. B., Hutley, L., Brannstrom, C., Etter, A., & Hanan, N. P. Characterizing vegetation cover in global savannas with an annual foliage clumping index derived from the MODIS BRDF product. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8), 2008–2024.
80. Hill, M. J., Senarath, U., Lee, A., Zeppel, M., Nightingale, J. M., Williams, R. D. J., & McVicar, T. R. Assessment of the MODIS LAI product for Australian ecosystems. Remote Sensing of Environment, 2010, 101(4), 495–518.
81. Hird, J. N., & McDermid, G. J. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1), 248–258.
82. Hmimina, G., Dufrene, E., Pontailler, J. Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., et al. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. Remote Sensing of Environment, 2013, 132, 145–158.
83. Holm, A. M., Cridland, S. W., & Roderick, M. L. The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(2), 145–158.
84. House, J. I., & Hall, D. O. Productivity of tropical savannas and grasslands. Terrestrial Global Productivity, 2001, 33, 363–400.
85. Hudak, A. T., & Wessman, C. A. Textural Analysis of Historical Aerial Photography to Characterize Woody Plant Encroachment in South African Savanna. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(3), 317–330.

86. Huemmrich, K. F., Privette, J. L., Mukelabai, M., Myneni, R. B., & Knyazikhin, Y. Time-series validation of MODIS land biophysical products in a Kalahari woodland, Africa. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(19), 4381–4398.
87. Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3), 295–309.
88. Huete, A. R., & Glenn, E. P. Remote sensing of ecosystem structure and function. Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2011, 291–320.
89. Huete, A. R., Didan, K., Shimabukuro, Y. E., Ratana, P., Saleska, S. R., Hutyra, L. R., et al. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. Geophysical Research Letters, 2006, 33(6), L06405.
90. Huete, A. R., Restrepo-Coupe, N., Ratana, P., Didan, K., Saleska, S. R., Ichii, K., et al. Multiple site tower flux and remote sensing comparisons of tropical forest dynamics in Monsoon Asia. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(5), 748–760.
91. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2), 195–213.
92. Hutley, L. B., Beringer, J., Isaac, P. R., Hacker, J. M., & Cernusak, L. A. A sub-continental scale living laboratory: spatial patterns of savanna vegetation over a rainfall gradient in northern Australia. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(11), 1417–1428.
93. Hutley, L. B., Grady, A. P. O., & Eamus, D. Monsoonal influences on evapotranspiration of savanna vegetation of northern Australia. Oecologia, 2001, 126(3), 434–443.
94. Hutley, L. B., O'Grady, A. P., & Eamus, D. Evapotranspiration from Eucalypt open-forest savanna of Northern Australia. Functional Ecology, 2000, 14(2), 183–194.
95. Hüttich, C., Gessner, U., Herold, M., Strohbach, B. J., Schmidt, M., Keil, M., & Dech, S. On the Suitability of MODIS Time Series Metrics to Map Vegetation Types in Dry Savanna Ecosystems: A Case Study in the Kalahari of NE Namibia. Remote Sensing, 2009, 1(4), 620–643.
96. Ichii, K., Kondo, M., Okabe, Y., Ueyama, M., Kobayashi, H., Lee, S. J., et al. Recent Changes in Terrestrial Gross Primary Productivity in Asia from 1982 to 2011. Remote Sensing, 2013, 5(11), 6043–6062.
97. Jeltsch, F., & Milton, S. J. Tree spacing and coexistence in semiarid savannas. Journal of Ecology, 1996, 84(4), 583.
98. Jenkins, J. P., Richardson, A. D., Braswell, B. H., Ollinger, S. V., Hollinger, D. Y., & Smith, M. L. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1–2), 64–79.
99. Jin, C., Xiao, X., Merbold, L., Arneth, A., Veenendaal, E., & Kutsch, W. L. Phenology and gross primary production of two dominant savanna woodland ecosystems in Southern Africa. Remote Sensing of Environment, 2013, 135, 189–201.
100. Jonsson, P., & Eklundh, L. TIMESAT - a program for analyzing time-series of satellite sensor data. Computers & Geosciences, 2004, 30(8), 833–845.
101. Justice, C. O., Román, M. O., Csiszar, I., Vermote, E. F., Wolfe, R. E., Hook, S. J., et al. Land and cryosphere products from Suomi NPP VIIRS: Overview and status. Journal of Geophysical

Research: Atmospheres, 2013, 118(17), 9753–9765.

102. Kanniah, K. D., Beringer, J., & Hutley, L. Environmental controls on the spatial variability of savanna productivity in the Northern Territory, Australia. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(11), 1429–1439.
103. Kanniah, K. D., Beringer, J., & Hutley, L. B. Response of savanna gross primary productivity to interannual variability in rainfall: Results of a remote sensing based light use efficiency model. Progress in Physical Geography, 2013, 37(5), 642-663.
104. Koch, G. W., Vitousek, P. M., Steffen, W. L., & Walker, B. H. Terrestrial transects for global change research. Vegetatio, 1995, 121(1-2), 53–65.
105. Kondrashov, D., & Ghil, M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. Nonlinear Processes in Geophysics, 2006, 13(2), 151–159.
106. Lazarides, M. A Revision of Triodia including Plectrachne (Poaceae, Eragrostideae, Triodiinae). Australian Systematic Botony, 1997, 10(3), 381–489.
107. Leuning, R., Cleugh, H. A., Zegelin, S. J., & Hughes, D. Carbon and water fluxes over a temperate Eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in Australia: measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129(3-4), 151–173.
108. Lieth, H. Purposes of a phenology book. Phenology and Seasonality Modeling. Springer Berlin Heidelberg. 1974, 3-19.
109. Linderholm, H. W. Growing season changes in the last century. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(1), 1-14
110. Lo, F., Wheeler, M. C., Meinke, H., & Donald, A. Probabilistic forecasts of the onset of the North Australian wet season. Monthly Weather Review, 2007, 135(10), 3506–3520.
111. Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. P., & Naylor, R. L. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. Science, 2008, 319(5863), 607–610.
112. Lu, H., Raupach, M. R., McVicar, T. R., & Barrett, D. J. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(1), 1–18.
113. Martin, H. A. Cenozoic climatic change and the development of the arid vegetation in Australia. Journal of Arid Environments, 2006, 66(3), 533–563.
114. McCree, K. J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agricultural Meteorology, 1971, 9, 191–216.
115. McKeon, G. M., Day, K. A., Howden, S. M., Mott, J. J., Orr, D. M., Scattini, W., & Weston, E. J. Northern Australian savannas: management for pastoral production. Journal of Biogeography, 1990, 355–372.
116. Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology, 2006, 12(10), 1969–1976.
117. Monteith, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3), 747-766.
118. Montgomery, R. B. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. Journal of Meteorology, 1948, 5, 265–274.

119. Morton, S. R., Griffin, G. F., Short, J., Pearce, G., & Barker, R. D. Refugia for Biological Diversity in Arid and Semi-arid Australia: A Report of the Biodiversity Unit of the Department of Environment, Sport and Territories. Canberra, ACT: Biodiversity Unit, Department of the Environment, Sport and Territories, 1995.
120. Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. Remote Sensing of Environment. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8), 1781–1800.
121. Myers, B. A., Duff, G. A., Eamus, D., Fordyce, I. R., OGrady, A., & Williams, R. J. Seasonal Variation in Water Relations of Trees of Differing Leaf Phenology in a Wet-Dry Tropical Savanna near Darwin, Northern Australia, 1997.
122. Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Glassy, J., Tian, Y., et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1–2), 214–231.
123. Nagai, S., Saigusa, N., Muraoka, H., & Nasahara, K. N. What makes the satellite-based EVI–GPP relationship unclear in a deciduous broad-leaved forest? Ecological Research, 2009, 25(2), 359–365.
124. Nagler, P. L., Morino, K., Murray, R. S., Osterberg, J., & Glenn, E. P. An Empirical Algorithm for Estimating Agricultural and Riparian Evapotranspiration Using MODIS Enhanced Vegetation Index and Ground Measurements of ET. I. Description of Method. Remote Sensing, 2009, 1(4), 1273–1297.
125. Nicholas, A. M. M., Franklin, D. C., & Bowman, D. M. J. S. Floristic uniformity across abrupt boundaries between Triodia hummock grassland and Acacia shrubland on an Australian desert sandplain. Journal of Arid Environments, 2011, 75(11), 1090–1096.
126. O'Grady, A. P., Chen, X., Eamus, D., & Hutley, L. B. Composition, leaf area index and standing biomass of eucalypt open forests near Darwin in the Northern Territory, Australia. Australian Journal of Botany, 2000, 48(5), 629–638.
127. O'Grady, A. P., Cook, P. G., Eamus, D., Duguid, A., Wischusen, J. D. H., Fass, T., & Worldege, D. Convergence of tree water use within an arid-zone woodland, 2009, 160(4), 643–655.
128. Obukhov, A. M. Characteristics of the micro-structure of the wind in the surface layer of the atmosphere. Izv ANSSSR ser Geofiz 1951, 3, 49–68
129. Olofsson, P., Lagergren, F., Lindroth, A., Lindström, J., Klemedtsson, L., Kutsch, W., & Eklundh, L. Towards operational remote sensing of forest carbon balance across Northern Europe. Biogeosciences, 2008, 5(3), 817–832.
130. Peng, Y., Gitelson, A. A., & Sakamoto, T. Remote estimation of gross primary productivity in crops using MODIS 250-m data. Remote Sensing of Environment, 2013, 128, 186–196.
131. Piao, S. L., Fang, J. Y., Zhou, L. M., Ciais, P., & Zhu, B. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. Global Change Biology, 2006, 12(4), 672–685.
132. Prince, S. D., & Goward, S. N. Global Primary Production: A Remote Sensing Approach. Journal of Biogeography, 1995, 22(4/5), 815–835.
133. Rahman, A. F. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. Geophysical Research Letters, 2005, 32(19), L19404.
134. Ratana, P., Huete, A. R., & Ferreira, L. Analysis of cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. Earth Interactions, 2005, 9(3), 1–22.
135. Reid, N., Hill, S. M., & Lewis, D. M. Spinifex biogeochemical expressions of buried gold

mineralisation: The great mineral exploration penetrator of transported regolith. Applied Geochemistry, 2008, 23(1), 76–84.

136. Richard, Y., & Poccard, I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(15), 2907–2920.
137. Richardson, A. D., & Hollinger, D. Y. Statistical modeling of ecosystem respiration using eddy covariance data: maximum likelihood parameter estimation, and Monte Carlo simulation of model and parameter uncertainty, applied to three simple models. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(3), 191–208.
138. Roderick, M. L., Noble, I. A. N. R., & Ecosystem, S. W. C. Estimating woody and herbaceous vegetation cover from time series satellite observations. Global Ecology and Biogeography, 1999, 501–508.
139. Ruimy, A., Kergoat, L., Bondeau, A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. Global Change Biology, 1999, 5(S1), 56–64.
140. Ruimy, A., Saugier, B., & Dedieu, G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(D3), 5263.
141. Running, S. W., & Hunt, E. R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In Scaling physiological processes leaf to globe. San Diego, USA: Academic Press, 1993, 141-158.
142. Running, S. W., Justice, C. O., & Salomonson, V. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(17): 3587-3620.
143. Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., Zhao, M., Reeves, M., & Hashimoto, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. BioScience, 2004, 54(6), 547–560.
144. Russell-Smith, J., Cook, G. D., Cooke, P. M., Edwards, A. C., Lendrum, M., Meyer, C. M., & Whitehead, P. J. Managing fire regimes in north Australian savannas: applying Aboriginal approaches to contemporary global problems. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(s1), e55–e63.
145. Russell-Smith, J., Yates, C., Edwards, A., Allan, G. E., Cook, G. D., Cooke, P., et al. Contemporary fire regimes of northern Australia, 1997-2001: change since Aboriginal occupancy, challenges for sustainable management. International Journal of Wildland Fire, 2003, 12(3-4), 283–297.
146. Scholes, R. J., & Parsons, D. The Kalahari transect: research on global change and sustainable development in Southern Africa. Global Change Report, 1997.
147. Scholes, R. J., & Walker, B. H. An African savanna: synthesis of the Nylsvley study. Cambridge University Press, 1993.
148. Schwartz, M. D., Reed, B. C., & White, M. A. Assessing satellite-derived start-of-season measures in the conterminous USA. International Journal of Climatology, 2002, 22(14), 1793–1805.
149. Sea, W. B., Choler, P., Beringer, J., Weinmann, R. A., Hutley, L. B., & Leuning, R. Documenting improvement in leaf area index estimates from MODIS using hemispherical photos for Australian

savannas. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(11), 1453–1461.

150. Seager, R., Naik, N., & Vogel, L. Does Global Warming Cause Intensified Interannual Hydroclimate Variability? Journal of Climate, 2013, 25(9), 3355–3372.
151. Seghieri, J., Vescovo, A., Padel, K., Soubie, R., Arjounin, M., Boulain, N., et al. Relationships between climate, soil moisture and phenology of the woody cover in two sites located along the West African latitudinal gradient. Journal of Hydrology, 2009, 375(1-2), 78–89.
152. Sellers, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. Remote Sensing of Environment, 1987, 21(2), 143–183.
153. Sims, D. A., Rahman, A. F., Cordova, V. D., El-Masri, B. Z., Baldocchi, D. D., Bolstad, P. V., et al. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4), 1633–1646.
154. Sims, D. A., Rahman, A. F., Cordova, V. D., El-Masri, B. Z., Baldocchi, D. D., Flanagan, L. B., et al. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(G4), G04015.
155. Sjöström, M., Ardö, J., Arneth, A., Boulain, N., Cappelaere, B., Eklundh, L., et al. Exploring the potential of MODIS EVI for modeling gross primary production across African ecosystems. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(4), 1081–1089.
156. Sjöström, M., Zhao, M., Archibald, S., Arneth, A., Cappelaere, B., Falk, U., et al. (2013). Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using eddy covariance data. Remote Sensing of Environment, 131, 275–286.
157. Soudani, K., le Maire, G., Dufrene, E., Francois, C., Delpierre, N., Ulrich, E., & Ccecchini, S. Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5), 2643–2655.
158. Still, C. J., Berry, J. A., Collatz, G. J., & DeFries, R. S. Global distribution of C 3and C 4vegetation: Carbon cycle implications. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(1), 6–1–6–14.
159. Suppiah, R. The Australian summer monsoon: a review. Progress in Physical Geography, 1992, 16(3), 283–318.
160. Suyker, A. E., Verma, S. B., Burba, G. G., & Arkebauer, T. J. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(3–4), 180–190.
161. Swinbank, W. C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. Journal of Meteorology, 1951, 8, 135–145.
162. Thornton, P. E., LAW, B. E., Gholz, H. L., & Clark, K. L. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. Agricultural and Forest Meteorology. 2002, 113, 185-222.
163. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2), 127–150.
164. Tucker, C. J., Townshend, J. R. G., & Goff, T. E. African Land-Cover Classification Using Satellite Data. Science, 1985, 227(4685), 369–375.
165. Tucker, C., & Pinzon, J. Global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) satellite drift corrected and NOAA-16 incorporated normalized difference vegetation index (NDVI), Global

Land Cover Facility, 2004.

166. Turner, D. P., Urbanski, S., Bremer, D., Wofsy, S. C., Meyers, T., Gower, S. T., & Gregory, M. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. Global Change Biology, 2003, 9(3), 383–395.
167. Vermote, E. F., Saleous, El, N. Z., & Justice, C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. Remote Sensing of Environment, 2002, 83, 97-111.
168. Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(1), 52–57.
169. Walker, B. H., Steffen, W. L., Canadell, J., & Ingram, J. S. I. IGBP Book Series No. 4. The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosys- tems. Synthesis Volume. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.
170. Walker, J., & Gillison, A. N. Australian savannas. In B. J. Huntley, & B. H. Walker (Eds.), Ecological studies. Springer Berlin Heidelberg, 1982, 5-24..
171. Wan, Z. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. Remote Sensing of Environment, 2005, 112(1), 59–74.
172. Wang, D., & Liang, S. Singular Spectrum Analysis for Filling Gaps and Reducing Uncertainties of MODIS Land Products. Presented at the IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2008, 558-561.
173. Wang, J., Rich, P. M., & Price, K. P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(11), 2345–2364.
174. Wang, Z., Xiao, X., & Yan, X. Agricultural and Forest Meteorology. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(9), 1160–1167.
175. Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., & Swetnam, T. W. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. Science, 2006, 313(5789), 940–943.
176. White, M. A. A global framework for monitoring phenological responses to climate change. Geophysical Research Letters, 2005, 32(4), L04705.
177. White, M. A., & Nemani, R. R. Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(1), 43–49.
178. White, M. A., & Thornton, P. E. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(2), 217–234.
179. White, M. A., de Beurs, K. M., Didan, K., Inouye, D. W., Richardson, A. D., Jensen, O. P., et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. Global Change Biology, 2009, 15(10), 2335–2359.
180. Whitley, R., Macinnis-Ng, C., Hutley, L., Berringer, J., Melanie, Z., Mathew, W., et al. Is productivity of mesic savannas light limited or water limited? Results of a simulation study. Global Change Biology, 2011, 17(10), 3130–3149.
181. Williams, R. J., Myers, B. A., Muller, W. J., Duff, G. A., & Eamus, D. Leaf phenology of woody species in a North Australian tropical savanna. Ecology, 1997, 78(8), 2542–2558.
182. Wu, C., Chen, J. M., & Huang, N. Predicting gross primary production from the enhanced vegetation index and photosynthetically active radiation: Evaluation and calibration. Remote

Sensing of Environment, 2011, 115(12), 3424–3435.

183. Wu, C., Munger, J. W., Niu, Z., & Kuang, D. Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12), 2925–2939.
184. Wylie, B. K., Johnson, D. A., Laca, E., Saliendra, N. Z., Gilmanov, T. G., Reed, B. C., et al. Calibration of remotely sensed, coarse resolution NDVI to CO2 fluxes in a sagebrush–steppe ecosystem. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(2), 243–255.
185. Xiao, X., Zhang, J., Yan, H., Wu, W., Biradar, C. Land Surface Phenology. Phenology of Ecosystem Processes, 2009, 247–270.
186. Xiao, X., Zhang, Q., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2), 256–270.
187. Xiao, X., Zhang., Hollinger, D., Aber, J., & Moore, B., III. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. Ecological Applications, 2005, 15(3), 954–969.
188. Zhang, X. Y., Friedl, M. A. A., Schaaf, C. B. B., & Strahler, A. H. H. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data. Global Change Biology, 2004, 10(7), 1133–1145.
189. Zhang, X. Y., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., & Liu, Z. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D12), D12103.
190. Zhang, X. Y., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., et al.. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3), 471–475.
191. Zhang, Y., Susan Moran, M., Nearing, M. A., Ponce Campos, G. E., Huete, A. R., Buda, A. R., et al. Extreme precipitation patterns and reductions of terrestrial ecosystem production across biomes. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(1), 148–157.
192. Zhao, M., Running, S. W., & Oceanic, N. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary poduction from 2000 through 2009. Science, 2010, 1667(1979), 2–5.

# 作者简历

**马轩龙，** 男，1983 年 7 月 2 日生于甘肃省徽县。2002 年至 2006 年在兰州大学草地农业科技学院进行本科阶段的学习；2008 年 12 月在兰州大学获理学硕士学位；2009 年 9 月至今在中国科学院地理科学与资源研究所生态学专业攻读理学博士学位。2011 年至 2012 年，获国家留学基金委资助在澳大利亚悉尼科技大学进行为期两年的联合培养研究。

## 期刊论文（发表/投稿）

1. **Ma, X.**, Huete, A., Yu, Q., Restrepo-Coupe, N., Beringer, J., Hutley, L. B., Kanniah, K. D., Cleverly, J., Eamus, D. (2014). Parameterization of an ecosystem light-use-efficiency model for predicting savanna GPP using MODIS EVI. ***Remote Sensing of Environment*** **(in review).**
2. **Ma, X.**, Huete, A., Yu, Q., Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Broich, M., Ratana, P., Beringer, J., Hutley, L. B., Cleverly, J., Boulain, N., Eamus, D. (2013). Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect. ***Remote Sensing of Environment***, 139, 97-115.
3. Broich, M., Huete, A., **Ma, X.**, Held, A., Xin, Q., Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Devadas, R., Paget, M. (2014). Land surface phenological response to climate variability across Australia using satellite remote sensing. ***Biogeosciences*** **(in review).**
4. Broich, M., Huete, A., Paget, M., **Ma, X.**, Devadas, R., Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Held, A. (2013). A spatially explicit vegetation phenology data product for science, monitoring and natural resources management applications across Australia, a country with highly variable rainfall. ***Environmental Modelling & Software*** **(in review).**

## 会议论文和摘要

1. **Ma, X.**, Huete, A., Yu, Q., Davies, K., Restrepo-Coupe, N. (2012). Monitoring spatial patterns of vegetation phenology in an Australian tropical transect using MODIS EVI. ***ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences***, XXXIX-B8, 271-276.
2. Huete, A., Restrepo-Coupe, N., **Ma, X.**, Miura, T., Eamus, D., Cleverly, J., Beringer, J., Hutley, L. B., Meyer, W. S., van Gorsel, E. (2013). Scaling tower flux and satellite measures of ecosystem function across biomes, seasons, and extreme dry to wet years in Australia (*invited*). ***Abstract presented at 2013 Fall Meeting, American Geophysical Union (AGU)***, 9-13 December, San Francisco, California, USA.
3. Broich, M., Huete, A., Held, A., **Ma, X.**, Davies, K., Restrepo-Coupe, N., Devadas, R. (2013). Highly variable phenology across the driest inhabited continent characterized

by the Australian phenology product. ***Abstract presented at 2013 Fall Meeting, AGU***, 9-13 December, San Francisco, California, USA.

4. Ratana, P., Huete, A., Ferreira, L. G., **Ma, X.**, Restrepo-Coupe, N. (2013). Comparisons of savanna functioning, phenology, and disturbance in Brazil and Australia using MODIS and TRMM satellite data. ***Abstract presented at 2013 Fall Meeting, AGU***, 9-13 December, San Francisco, California, USA.
5. Huete, A., Eamus, D., **Ma, X.**, Restrepo-Coupe, N., Boulain, N., Hutley, L. (2011). Monitoring phenological variability across a tropical savanna aridity gradient with remote sensing across seasonal to annual and extreme Events. ***ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences***, 3820, 19–19.

## 会议报告

1. **Ma, X.**, Huete, A., Boulain, N., Restrepo-Coupe, N., Yu, Q., Davies, K., Broich, M. Time series based decomposition of MODIS phenology profiles into woody and herbaceous components. ***The 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE)***, 22-26 April, 2013, Beijing, China.
2. Broich, M., Huete, A., Lymburner, L., Held, A., **Ma, X.**, Davies, K., Restrepo-Coupe, N., Ratana, P. Breathing and ecosystem resilience under drought and deluge: a MODIS land surface phenology model for Australia. ***The 4th Australian Terrestrial Ecosystem Research Network (TERN) Annual Symposium***, 18-20 February, 2013, Canberra, Australia.
3. **Ma, X.**, Huete, A., Yu, Q., Davies, K., Restrepo-Coupe, N. Monitoring spatial patterns of vegetation phenology in an Australian tropical transect using MODIS EVI. ***The XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)***, 25 August - 1 September, 2012, Melbourne, Australia.
4. Huete, A., **Ma, X.**, Ponce-Campos, G., Moran, M. S., Hutley, L. B., Davies, K., Restrepo-Coupe, N., Eamus, D. Shifts in ANPP and rainfall-use-efficiency across Australian savannas using MODIS and TRMM data. ***The 22nd Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)***, 25 August - 1 September, 2012, Melbourne, Australia.
5. Huete, A., **Ma, X.**, Ponce-Campos, G., Moran, M. S., Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Eamus, D. Rainfall-use-efficiency and productivity interactions across large scale drought and wet cycles in Australia. ***The 2012 Asia Oceania Geosciences Society and American Geophysical Union Joint Assembly***, 13-17 August, 2012, Singapore.
6. Huete, A., Eamus, D., **Ma, X.**, Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Hutley, L. B. Satellite spectral, spatial, temporal, phenologic sensitivities in upscaling fluxes. ***The 2011 Australian and New Zealand Flux Research and Monitoring (OzFlux) meeting***, 14 June, 2011, Perth, Australia.
7. Huete, A., Eamus, D., **Ma, X.**, Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Hutley, L. B.

Spatial-temporal patterns in satellite-derived fluxes across a tropical savannah moisture gradient. ***The 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment***, 10-15 April, 2011, Sydney, Australia.