

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

U D C\_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

**西北农林科技大学**  
**博士后研究工作报告**

能量-水-碳通量以及日光诱导叶绿素荧光

---

耦合模型的构建与验证

---

王云霏

工作完成日期 2020年6月—2022年6月

---

报告提交日期 2022年6月

---

西北农林科技大学（陕西）

2022年6月



能量-水-碳通量以及日光诱导叶绿素荧光  
耦合模型的构建与验证

Construction and Validation of An Coupled Energy-Water-Carbon Fluxes and  
Solar-induced Chlorophyll Fluorescence Model

博 士 后 姓 名 王 云 霏

流动站（一级学科）名称 西北农林科技大学农业资源与环境

专 业（二级学科）名称 土壤学

研究工作起始时间 2020年6月30日

研究工作期满时间 2022年3月31日

西北农林科技大学人事部（陕西）

2022年4月



# 内 容 摘 要

随着水资源的日益短缺，大量的农业需水量和有限的淡水资源之间的矛盾日益突出。在气候变化的背景下，如何合理利用淡水资源减少温室气体的排放成为了当前热点问题之一。农田生态系统的能量及水碳通量是农田生态水文过程的主要过程。日光诱导叶绿素荧光（SIF）可用以反映植物光合能力对环境胁迫的响应，在干旱地区监测植物生理状态方面有广阔的应用前景，属于目前农业干旱监测领域的前沿研究。目前，在水分胁迫条件下由植物水力性状改变引起的 SIF 发射机制及其与总初级生产力（GPP）关联机制的变化尚未明确。因此，本项目以西北旱区典型农田为研究对象，利用对叶片-冠层尺度 SIF 及相关参数、光合速率以及植物水力性状的同步观测，探究作物在不同生长阶段和不同程度水分胁迫下，叶片-冠层尺度 SIF 发射机制和 SIF-GPP 关联机制的差异，从而改进 STEMMUS-SCOPE 模型植被水力模块和 SIF 发射模块。本研究将明确 SIF 发射机制对水分胁迫的响应，揭示水分胁迫条件下旱区作物 SIF 与 GPP 的关联机制，从而建立基于植物水力性状的旱区农田 SIF 前向模型，提高模型对水分胁迫的响应精度。预期结果将深化旱区农田 SIF 和植物生理生态特征耦合机制的认识，为干旱监测和预报以及农业水资源管理提供理论依据和技术支撑。研究得到以下结果：

## 1. 基于SPAC系统的生态水文学模型（STEMMUS-SCOPE）的构建

基于SPAC系统，将SCOPE和STEMMUS模型进行了耦合。STEMMUS模型可以弥补SCOPE模型土壤模块缺失的不足。可以使得SCOPE模型在干旱区的应用成为可能。

## 2. STEMMUS-SCOPE模型在低植被生态系统的验证

STEMMUS-SCOPE首先在农田和草地进行了验证。将SCOPE模型和STEMMUS模型进行耦合后，陆面通量的模拟和蒸散发 $ET$ 的分离得到了改进，尤其当植被受水分胁迫时提升尤为明显。与STEMMUS-SCOPE与SCOPE、SCOPE\_SM和STEMMUS进行对比，耦合模型STEMMUS-SCOPE可以很好的模拟当植被处于水分胁迫时的能量及水碳通量，同时该模型还可以模拟土壤水热和植被根系的动态变化。然而，该模型还有许多方面需要进一步改进。首先，在灌溉时，土壤温度的上边界条件估计还不够准确，这会显著影响到土壤温度的模拟。其次，土壤呼吸模块也需进一步改进，目前的模型对土壤呼吸的模拟仅考虑了土壤温度而忽视了土壤湿度对土壤呼吸的影响。综合而言，该模型集成了辐射传输、光合作用、根系动态生长及土壤水热运移等模块，可以作为模拟农田生态水文过程的准确方法。

## 3. STEMMUS-SCOPE模型在不同气候区森林生态系统的验证

STEMMUS-SCOPE在农田和草地等低矮植被生态系统得到有效验证之后，我们对该模型在高植被（如森林）生态系统进行了进一步的评价。本研究在FLUXNET站点中分别代表不同气候区的3个森林站点，利用PLUMBER2提供的气候数据及站点LAI卫星遥感数据作为驱动，模拟结果与涡度相关系统观测的能量及水碳通量数据进行对比发现，该模型同样适用于高植被生态系统能量及水碳循环的模拟及评估。这为该模型在全球区域的应用奠定

了基础，对量化全球能量及水碳循环具有重要意义。

#### 4. STEMMUS-SCOPE模型的潜在应用

通过模型在以上站点的应用，在未来的工作中，我们将在PLUMBER2 中提供的 170 个 FLUXNEET 站点对模型进行评价，着力优化模型的植被水力模块，植物生长模块，从而更好地量化全球能量及水碳通量，加深地球水碳循环的理解。

关键词：蒸散发，碳通量，叶绿素荧光，植被水力性状，模型

## Abstract

With the increasing shortage of water resources, the contradiction between a large amount of agricultural water demand and limited freshwater resources has become increasingly prominent. In the context of climate change, how to make rational use of freshwater resources to reduce greenhouse gas emissions has become one of the current hot issues. The energy and water carbon fluxes of farmland ecosystem are the main processes of farmland eco hydrological process. Solar-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) can be used to reflect the response of plant photosynthetic capacity to environmental stress. It has a broad application prospect in monitoring plant physiological status in arid areas, and it is the frontier research in the field of environmental remote sensing. To date, the emission mechanism of SIF and its relationship with gross primary productivity (GPP) caused by the change of plant hydraulic traits are not clear. Therefore, this project uses synchronous observation of leaf-canopy scale SIF and its related parameters, photosynthetic rate, and plant hydraulic characteristics to explore the differences of SIF emission mechanism between leaf and canopy scale and SIF-GPP correlation mechanism under different growth stages and different degrees of water stress, thereby to improve the plant hydraulic module of STEMMUS-SCOPE model. This study will clarify the response of the SIF emission mechanism to water stress, reveal the correlation mechanism between SIF and GPP under water stress, and establish a forward SIF simulator based on plant hydraulic traits and improve the accuracy of SIF simulation. The expected results will deepen the understanding of the coupling mechanism between SIF and plant physiological and ecological characteristics, and provide theoretical basis and technical support for drought monitoring and forecasting as well as agricultural water resources management. The results of this study are as follows:

1. Construction of ecological hydrology model (STEMMUS-SCOPE) based on SPAC system

Based on SPAC system, SCOPE and STEMMUS models are coupled. STEMMUS model can make up for the lack of soil module in scope model. It can make the application of scope model in arid areas possible.

2. Established an ecohydrological model based on SPAC system

A fundamental understanding of coupled energy, water and carbon flux is vital for obtaining the information of ecohydrological processes and functioning under climate change. The coupled model, STEMMUS-SCOPE, integrating radiative transfer, photochemistry, energy balance, root system dynamic, and soil moisture and soil temperature dynamic, has been proven to be a practical model to simulate detailed land surface processes such as evapotranspiration and *NEE*. The performance of the coupled STEMMUS-SCOPE model in *ET* partitioning was improved due to the comprehensive radiative transfer scheme in SCOPE. The coupled model has been successfully applied in a maize field. Through the inter-comparison of SCOPE, SCOPE\_SM,

STEMMUS, and STEMMUS-SCOPE, we concluded that the coupled STEMMUS-SCOPE can be used to investigate vegetation states under water stress conditions, and to simultaneously understand the dynamics of soil heat and mass transfer, as well as the root growth. However, there are some needs for further studies to enhance the capacity of STEMMUS\_SCOPE in understanding ecosystem functioning. First of all, the estimation of soil boundary condition especially during the irrigation period, which has significant influence on the simulation of soil temperature, needs further improvement. Second, the soil respiration model used in SCOPE, which neglected currently the effect of soil moisture, should be upgraded in the coupled model. Nevertheless, the STEMMUS-SCOPE may be used as an observation operator to assimilate remote sensing data such as solar-induced chlorophyll fluorescence, to improve the estimation of water and carbon fluxes. STEMMUS-SCOPE could also be used to investigate regional or global land surface processes, especially in arid and semi-arid regions, due to its sensitivity to water stress conditions.

### 3. Verification of STEMMUS-SCOPE model in forest ecosystems in different climatic regions

After the effective validation of STEMMUS-SCOPE in low vegetation ecosystems such as farmland and grassland, we further evaluated the model in high vegetation (such as forest) ecosystems. In this study, FLUXNET station represents three forest stations in different climate regions. Driven by the climate data provided by Plumber2 and the Lai satellite remote sensing data of the station, the simulation results are compared with the energy and water carbon flux data observed by the vorticity correlation system. It is found that this model is also applicable to the simulation and assessment of energy and water carbon cycle in high vegetation ecosystem. This lays a foundation for the application of the model in the global region, and is of great significance to quantify the global energy and water carbon cycle.

### 4. Potential applications of the STEMMUS-SCOPE model

Through the application of the model in the above stations, in the future work, we will evaluate the model in 170 Fluxnet stations provided in plumber2, and strive to optimize the vegetation hydraulic module and plant growth module of the model, so as to better quantify the global energy and water carbon flux and deepen the understanding of the earth's water carbon cycle.

**KEY WORDS:** Guanzhong Plain; Evapotranspiration; Carbon flux; Eddy covariance system; Ecohydrological model

# 目 次

1	绪 论	1
1.1	研究背景及意义	1
1.2	国内外研究现状及发展动态分析	2
1.3	研究的出发点	5
1.4	研究内容	6
1.5	研究目标	9
1.6	拟解决的关键科学问题	10
1.7	研究方案与技术线路	11
1.8	实验与研究方案	12
2	STEMMUS-SCOPE 模型的构建	15
2.1	前言	15
2.2	STEMMUS-SCOPE 模型技术路线	15
2.3	模型中主要过程的数学描述	16
3	STEMMUS-SCOPE 模型在草地、农田生态系统的验证	32
2.1	驱动及验证数据	32
2.2	结果分析	33
2.3	讨论及结论	47
4	STEMMUS-SCOPE 模型在森林生态系统的验证	48
4.1	前言	48
4.2	本节研究技术路线图	48
4.3	STEMMUS-SCOPE 模型对森林生态系统水碳通量的模拟	49
5	结 论	56
5.1	主要研究成果	56
5.2	本研究创新点	57
5.3	本研究不足与展望	57
	参 考 文 献	58
	个 人 简 历	59



# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

叶绿素荧光 (Chlorophyll Fluorescence, ChlF) 是植物光合过程中叶绿素分子在波长 640-850 纳米之间向外发射出的能量, 可用以反映植物光合能力对环境胁迫的响应 (Meroni et al., 2009), 主要通过主动和被动两种方法观测。主动法是用可控试验光源激发的 ChIF (如主动激发脉冲调制式荧光仪, Pulse Amplitude Modulation, PAM), 而被动法则是自然条件下以太阳光作为激发光源获得的日光诱导叶绿素荧光 (Solar-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)。与主动法相比, 被动法测得的 SIF 更适用于监测植物冠层的生理状态。

SIF 直接由植物光合中心的叶绿素分子发射, 可以途经细胞、叶片、冠层、大气层直到被卫星传感器所探测, 能够在细胞、叶片、冠层、景观和全球尺度上直接反映植被实际的光合特征, 弥补传统植被指数的不足, 为研究不同尺度的植被生理生态特征提供了新的思路和方法 (章钊颖等, 2019)。近几年来, 针对 SIF 的相关研究已成为生态学、碳循环及遥感科学的新兴研究领域 (张永江等, 2009)。SIF 突破了传统的激发态荧光 (即主动法), 成为研究植被生理生态功能的重要工具之一。SIF 的出现开拓了光合作用和碳循环研究的新方向, 有助于进一步了解光合作用的机理和时空变异。SIF 的遥感研究发展迅速, 多个空间传感器以及近地面的遥感监测提供了研究光合作用以及其它植被生态系统功能的新工具。研究 SIF 涉及到多尺度的观测和模型, 包括研究叶片尺度的植物生理生态、生态系统尺度的结构和功能以及区域和全球尺度的植被空间差异和时间变化。国际学术界一致认为 SIF 在空间上的尺度推移问题有待解决; SIF 的发射机制及其与光合作用的关联机制多局限于统计分析和模型推演, 需进一步深入探讨; SIF 在水分胁迫条件下的模拟精度还需进一步提高。目前对 SIF 的胁迫响应方面只是定性表明干旱导致 SIF 下降, 尚未深入研究 SIF 对胁迫程度的响应机制。大量研究表明, SIF 与总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 之间有很好的线性关系, 可以用来表征植被光合作用。然而, 当植被遭受干旱胁迫时, SIF 与 GPP 之间的关系较弱, 应充分研究胁迫因子 (如干旱) 造成的叶片生理条件变化对二者关联机制的影响, 改进现有叶绿素荧光-光合作用速率模型。已有研究结合 SIF 卫星观测以及土壤水分 (Soil Moisture, SM) 和水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD) 的估算, 可以证实干旱地区 SM 是生态系统生产中干旱胁迫的主要驱动因子 (Liu et al., 2020)。干旱地区生态系统水分胁迫较为严重, 即使轻度的 SM 变化都会快速地干扰和破坏其生态系统的稳定性和可持续性。未来农业生产取决于植物生理和生物物理过程对胁迫因子 (如干旱) 响应机制的理解程度 (Wang et al., 2020)。为进一步干旱胁迫条件下植物的响应, 发展可持续的食物系统, 已涌现大量研究试图揭示干旱对植物生理和生物物理过程的影响。尽管当前的水分胁迫试验以及

开发的植被模型在一定程度上可以预测评估水分胁迫对植物生理和生物物理过程的影响，但现有模型预测结果仍然存在着很大不确定性，无法有效地为监测及缓解干旱提供相应的科学依据和支持 (Webber et al., 2018)。因此，明确水分胁迫对 SIF 发射机制的影响，并提高 SIF 模型对水分胁迫的响应精度，是利用 SIF 对水资源短缺地区进行干旱监测和预报成功与否的关键。

基于以上背景，本课题拟以西北旱区典型冬小麦/夏玉米轮作农田为研究对象，以连续两个完整轮作期的田间试验为依托，采用田间观测和模型数值模拟相结合的方法，系统研究 SIF 发射机制对水分胁迫的响应，揭示水分胁迫对 SIF-GPP 关联机制的影响，进而开发基于植物水力性状的 SIF 前向模型，旨在为实现区域干旱监测及预报提供理论基础和技术支撑，促进农田水分信息监测的机理性、准确性和实效性。

## 1.2 国内外研究现状及发展动态分析

### 1.2.1 水分胁迫对 SIF 发射和 SIF-GPP 关联机制的影响

目前，干旱已经严重威胁到了全球范围的生态平衡 (Ambavaram et al., 2014)。随着全球气候变化的加剧，旱区面临着严重的水资源短缺风险 (Zhou et al., 2021)，及时精确地监测和预报大范围干旱胁迫，对了解植被对气候变化的响应和确保粮食安全具有重要意义 (Breshears et al., 2005)。传统的植被指数 (如基于反射率的植被指数 NDVI 等) 只有当干旱引起植被光学特性发生改变时才能做出反应。而 SIF 在叶片、个体、冠层以及区域尺度均与 GPP 具有良好的相关性 (Liu et al., 2017; Köhler et al., 2018)，对环境胁迫更加敏感 (Porcar-Castell et al., 2014)，在监测干旱方面具有一定的优越性 (Liu et al., 2018; Yoshida et al., 2015)。

目前已有大量关于叶绿素荧光对各类胁迫响应的研究。尽管其他环境因素 (如氮胁迫) 可能与水分胁迫相互作用进而影响光合效率和 SIF 发射，但土壤水分仍被认为是目前影响 SIF 的主要环境因子。植物对不同程度水分胁迫的响应机制差异较大，叶片是植物与外界环境进行物质交换与能量传递的主要器官，对环境变化较为敏感 (Wright et al., 2005)。植物应对干旱机制分为气孔调节和非气孔调节。当水分胁迫程度较低时，植物会调节气孔开度，降低作物光合速率 (Galmés et al., 2007; Chaves et al., 2009; 张曦等, 2016)，同时植物也会降低叶水势，叶水势的降低可以调节植物与土壤水势之间的水力梯度，从而增加植物的吸水能力，但此时植物的光合器官并未受损。随着水分胁迫程度加深，气孔调节转变为非气孔调节，干旱胁迫使叶片积累大量活性氧，对叶片造成损伤，导致叶绿素含量降低、叶片荧光参数改变、光合器官遭到不同程度的损害。因此及时有效地对作物早期干旱胁迫 (即植物应对干旱进行气孔调节) 进行监测并采取应对措施，对保障粮食产量具有重要意义。大

量研究表明荧光参数可以反映根区 SM 状态。以往研究观测到 SM 对 SIF 的影响不尽相同,有些结果甚至是矛盾的。根据植被类型和胁迫程度的不同,SM 对荧光参数的影响差别很大。其主要原因包括土壤类型、土壤水分含量、植物类型和胁迫持续时间等因素的差异。一些研究仅用干燥或湿润定性描述了土壤水分状况 (Pettigrew, 2004),而缺乏对土壤特性的详细描述,无法实现重力含水量 (Kebbas et al., 2015)、体积含水量 (Man et al., 2017) 和土壤水势 (Li et al., 2004) 之间的转换,这使得对这些研究中得出的 SIF 和 SM 关系之间的定量对比十分困难。

SIF-SM 关系研究是连接水文学和植物生理学之间有待深入研究的薄弱环节。只有量化土壤水势、根系水势、叶片水势以及土壤水分胁迫程度和持续时间才能揭示 SIF-SM 关系 (Jonard et al., 2020)。故有必要探讨 SIF 发射机制对不同干旱胁迫程度的响应,以便及时发现作物胁迫特征。由于 SIF 对植物水力性状变化的响应机制复杂,因此本项目计划对作物设置不同程度水分胁迫,连续同步测量 SIF、荧光参数、光合特征以及植物水力性状等指标,探究不同水分胁迫程度对 SIF 发射机制及 SIF-GPP 关联机制的影响,深化 SIF 在环境胁迫响应领域的研究,为农业管理提供科学依据。

## 1.2.2 日光诱导叶绿素荧光模型研究动态分析

SIF 对水分胁迫的响应十分复杂,是当前研究的难点之一。辐射传输模型和陆面模式的耦合模型为研究不同环境和生物因子限制下 SIF 和 GPP 的关系提供了便捷途径 (Verrelst et al., 2016; Zhang et al., 2016)。SCOPE (Soil-Canopy Observation of Photosynthesis and Energy) 模型 (Van der Tol et al., 2009) 是目前最广泛应用于日光诱导叶绿素荧光模拟的模型之一 (奚雷等, 2019)。该模型基于能量平衡,将辐射传输模型和光合作用模型集成起来,是将 SIF 观测和 SIF 模型同化来限制生态系统水碳通量模拟的理想模型。SCOPE 模型以植被的光学特性、冠层结构和微气象条件为输入,可以模拟叶片、冠层反射率、观测方向上的 SIF 光谱、光合速率以及蒸散发 (Van der Tol et al., 2009; Van der Tol et al., 2016)。由于 SCOPE 模型是垂直于地表的一维模型,且该模型参数较多,利用其进行全球尺度的模拟具有一定的挑战性。然而,SCOPE 中与 SIF 发射有关的生物化学过程模块已经被成功引入至陆面模式中,进而利用 SIF 观测来提高 GPP 的估算精度。目前已经包含 SIF 发射模块的陆面模式主要有 CLM4 (Lee et al., 2015)、SSiB2 (Qiu et al., 2018)和 BETHY (Norton et al., 2018)。Damm et al. (2018) 首次尝试将 SCOPE 应用在多个站点冠层尺度的模拟以揭示蒸腾和 SIF 之间的联系,结果表明水分胁迫条件下 SIF 对蒸腾作用更为敏感。

根系吸水过程 (及太阳辐射) 对植被生长具有主要的调节作用,对陆面水热碳交换过程至关重要。然而,目前的 SCOPE 模型忽略了根系吸水过程,限制了在干旱和极端高温条件下该模型对植被响应过程进行模拟的能力。Bayat et al. (2018) 的研究结果表明,由于 SM 变化造

成的植被光学信号的变化并不能完全反映植被干旱状况，这使 SCOPE 对 GPP 的估算具有一定的不确定性。随后，Bayat et al. (2019) 将土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 模型引入到 SCOPE 模型中开发了 SCOPE\_SM 模型，该模型利用实测 SM 计算水分胁迫系数来限制最大羧化速率( $V_{cmax}$ )，其在草地站点模拟的水碳通量与涡度相关系统的观测具有较高一致性，这表明 SCOPE\_SM 模型可以很好地响应水分胁迫，但该模型忽略了植被根系分布的动态变化并且只能利用实测 SM 作为模型输入。Wang et al. (2021) 通过引入一维根系生长模型，以及连接土壤、根系、叶片和大气的阻抗方案，在 SPAC 系统中集成了光合作用、SIF 以及土壤水热传输过程，开发了基于植物水力性状的 SIF 前向模型 STEMMUS-SCOPE。在玉米和草地生态系统进行验证的结果表明，在中度水分胁迫条件下，该模型对水热碳通量的模拟精度得到了显著提升，再一次证明了引入土壤水热传输以及根系动态生长对生态系统功能性的准确模拟十分必要 (Zeng et al., 2011a; Zeng et al., 2011b)。尽管当前 STEMMUS-SCOPE 已引入简化的植物水力模型，但采用了类比欧姆定律 (水力阻抗) 的方式计算植被水分传输，并未考虑明确的水力传输路径，且主要过程仍然借鉴了 SCOPE\_SM 模型和 STEMMUS 模型。因此，当前的 STEMMUS-SCOPE 模型忽略了如水力衰竭 (指由于栓塞引起的水力导度的丧失) 和水力恢复 (指栓塞后复水，植物水力导度的恢复) 等目前植被水力领域最新的研究成果。水力衰竭和水力恢复对 STEMMUS-SCOPE 模型水碳通量模拟的影响尚未得到准确的评估，因此 STEMMUS-SCOPE 模型中的植物水力等模块还需进一步改进。目前比较先进的陆面模式 (如 CLM 5、Noah-MP、JULES 和 CABLE) 均已引入较为完备的植被水力模型，以往仅考虑土壤根系和土壤水分分布的传统水力模型 (如 CLM 4.5 和 CoLM 中的水力模型) 均已被替代 (McDowell et al., 2019; De Kauwe et al., 2015)。与传统模型中利用土壤水势来限制模型模拟的结果不同，当前最新的植被水力模型利用了植物各器官的水势作为限制因子来模拟水分胁迫条件下的水碳通量，其应用价值已在许多研究中得到证明 (De Kauwe et al., 2020; Niu et al., 2020; Xu et al., 2016; Williams et al., 1996)。其中，Niu et al. (2020) 将 Xu et al. (2016) 开发的植被水力模型引入至 Noah-MP 模型中，利用植物水储量计算气孔水分胁迫因子。CLM 5.0 模型也基于叶水势 ( $\psi_l$ ) 而不是基于土壤水势 ( $\psi_s$ ) 计算水分胁迫系数 (Kennedy et al., 2019)。因此，STEMMUS-SCOPE 模型需要引入当前先进的水力模型以适应在不同生态系统 (尤其是经历高频且严重干旱的生态系统) 中的应用。需要注意的是，引入新的植物水力模型会增加 STEMMUS-SCOPE 模型调参难度，开发者需要在模型机理性和实用性之间适当权衡。

基于植物水力性状的 SIF 前向模型的研究非常有必要：一方面，SIF 的卫星遥感可以在生物、空间和时间尺度上准确获取植被光响应和植被稳态行为信息，进而估算光合作用速率，并基于此评估植被对环境胁迫的响应 (Mohammed et al., 2019)。另一方面，基于植物水力性状的 SPAC 模型则通过类比欧姆定律(水力阻抗)的方式，根据根-茎-叶的水力学性状 (Sperry et al., 2017)，将植物器官水平胁迫响应与生态系统的水热碳通量有机地联系起来

(Sabot et al., 2020)。尽管以上这两个方面的研究各自都有了长足的发展，但直到近期的研究才意识到两者的交叉融合至关重要 (Jonard et al., 2020)。SIF 遥感与基于植物水力性状的 SPAC 模型相结合将有助于阐释土壤-水分-植物-能量相互作用机制，加深生态系统功能性对极端气候 (干旱) 的响应机制的理解。

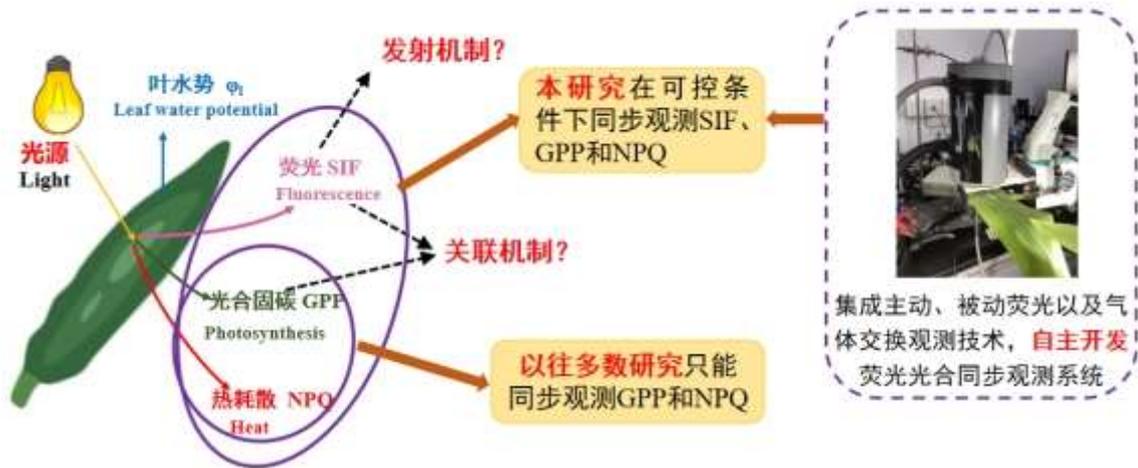
### 1.3 研究的出发点

当前研究表明，环境胁迫对 SIF 发射机制及其与总初级生产力 (GPP) 的关联机制具有显著影响，与已有的基于遥感反射率的植被指数相比，SIF 在准确表明植被光合特征和生理状态方面更具优势。我国 2016 年发射碳卫星 (TanSat)，其 SIF 反演数据可有效表征全球光合活动特征 (Du et al., 2018)。根据最新消息，欧洲航天局将于 2024 年发射荧光探索卫星 (FLEX) 专门监测全球 SIF 动态变化，这进一步激发了国内外植被遥感研究者的兴趣。目前 SIF 研究仍存在以下问题：不同尺度 SIF 与光合作用的相关性研究多为统计分析，缺乏机理解释；不同尺度 SIF 发射对作物胁迫程度的响应机制尚不明确；当前主流 SIF 机理模型对水分胁迫的考虑仍有待完善。本项目针对上述问题，拟通过设计田间试验和构建过程模型，探讨 SIF 与 GPP 在内在机理上相关性和环境影响因子，进而探讨 SIF 发射对作物干旱胁迫的响应机理，最终开发基于植物水力性状的 SIF 前向模型，以期为 SIF 在旱区农业干旱监测和水资源管理提供科学依据和理论支撑。

### 1.4 研究内容

#### (1) 水分胁迫对叶片尺度 SIF 发射机制和 SIF-GPP 关联机制的影响

植物木质部水力性状是生态系统功能干旱响应的首要预警因子，且该因子不受区域、物种的限制。具体来说，水分胁迫会降低木质部水势，从而损害木质部组织的水力传导能力，形成栓塞并阻碍水分运输，进而影响气体交换、光合作用、韧皮部运输等一系列关键生理过程，而后导致组织干燥 (即植物水力衰竭) 直至最终导致植被死亡。光合作用过程吸收能量后以光化学能、SIF 和热耗散 (NPQ) 三个形式释放。干旱胁迫引起的植物水力性状的变化会直接影响叶片生理特性，进而会不同程度地影响以上三者关系，从而影响 SIF 发射机制和 SIF-GPP 的关联机制。本研究内容计划采用荧光光合同步观测系统，在观测叶片和植物其他器官水力性状 (水势和导水率) 基础上，同步测量不同程度水分胁迫下冬小麦和夏玉米叶片尺度光合和荧光参数，探究水分胁迫下植物水力性状的变化对 SIF 发射机制和 SIF-GPP 关联机制的影响。



图

图 1.1 水分胁迫下叶片尺度 SIF 发射机制研究示意图

### (2) 水分胁迫对冠层尺度 SIF 发射机制和 SIF-GPP 关联机制的影响

研究表明，水分胁迫条件下，植物可以通过短期的气孔调节和长期的碳分配调节改变各器官（如根系）的生物量来满足对水分的需求，但其内在机制机理非常复杂。根系的变化会进而影响地上植被的相关植物生理和生物物理过程，并最终影响 SIF 发射机制和 SIF-GPP 关联机制。本研究内容在研究内容 (1) 取得的叶片尺度 SIF 相关过程的基础上，应用冠层顶 SIF 观测、相关叶片光谱和冠层结构参数（均可实测），结合涡度相关系统、微气象观测和根系生长观测，探究不同干旱程度对冠层顶 SIF 发射机制和 SIF-GPP 的关联机制的影响。

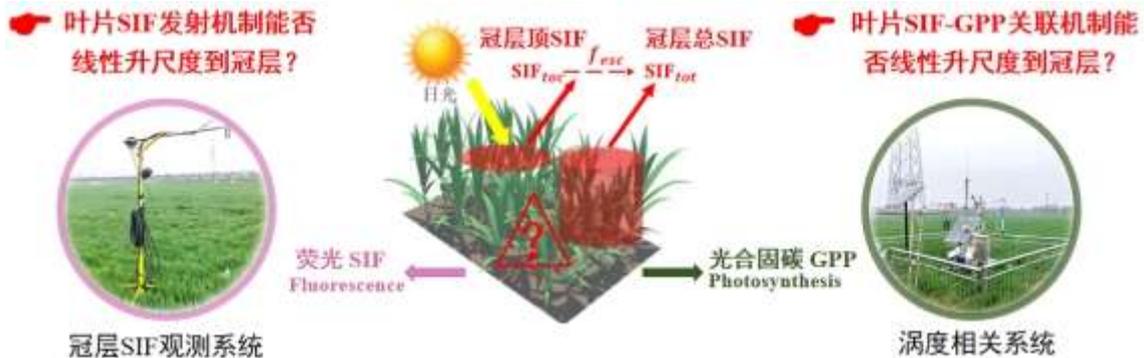


图 1.2 水分胁迫下冠层尺度 SIF 发射机制研究示意图

### (3) 基于植物水力性状构建 SIF 前向模型

上述两项研究内容是在实验观测的基础上，对植物叶片-冠层 SIF 相关过程进行研究，但未从基于过程的植被模型和日光诱导叶绿素荧光 (SIF) 辐射传输模型的角度探讨植物对干旱胁迫的响应。当前 STEMMUS-SCOPE 模型的植被水力模块过于简化，并未考虑明确的水力传输路径。本研究将通过 Richards 方程描述由脆弱性曲线（即导水率与水势之间的关系）调节的水力联系，进而计算叶、茎、根各水力单元之间的水流通量，结合研究内容 (1) 和 (2) 的观测数据和结果，将 SIF 发射过程对水分胁迫的响应机制集成到 STEMMUS-SCOPE 模型开发中（见图 1），对 STEMMUS-SCOPE 模型进行改进，从过程模型的角度研究植物叶片-冠层 SIF 发射过程对外部驱动和环境胁迫因子的响应。

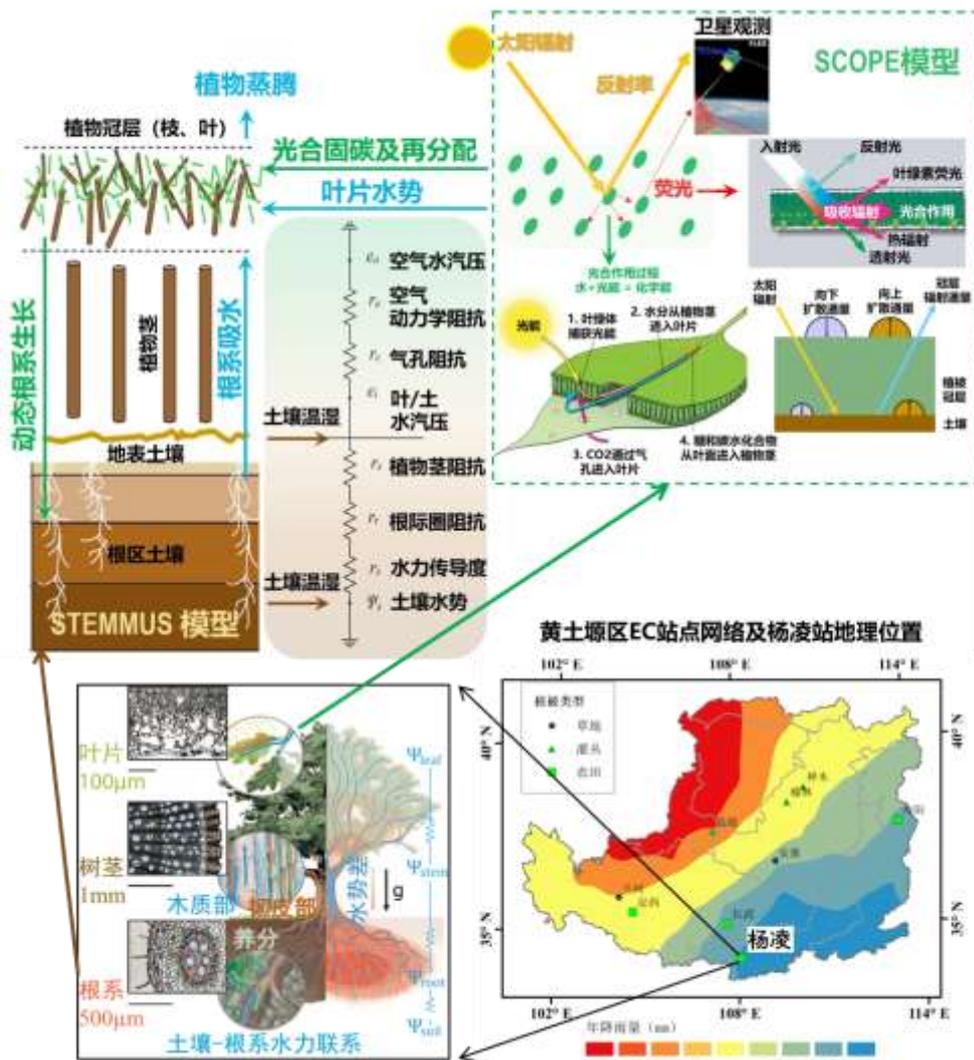


图 1.3 STEMMUS-SCOPE 模型开发示意图

## 1.5 研究目标

基于国内外研究现状，可知土壤湿度是解释生态系统干旱胁迫的主控因子。此外，基于目前从植物叶片、冠层到生态系统水平的生理过程研究，可知水分胁迫对叶片水平的影响不能线性地升尺度到冠层和生态系统水平。基于此，本项目假设由干旱引起的植物水力性状的变化会影响光合作用和SIF释放过程，从而使得SIF与GPP之间的关联机制发生相应的变化。因此，本项目的总体研究目标是从多学科交叉的角度出发，基于观测实验和过程模型，量化干旱对植物叶片-冠层SIF发射机制和SIF-GPP关联机制的影响，并基于此理解，通过对观测数据机理性分析，最终建立基于植物水力性状的SIF前向模型，为旱区干旱监测和预报以及农业水资源管理提供理论依据和科学指导。

## 1.6 拟解决的关键科学问题

(1) 当前基于卫星和地面 SIF 观测表明，水分胁迫发生时，SIF 发射也随之减弱，但在量化水分胁迫对 SIF 发射机制和 SIF-GPP 关联机制的影响方面缺乏深入研究。为了明确植物水力性状变化时，不同尺度 SIF 发射机制以及不同尺度 SIF-GPP 关联机制如何变化，如何实现 SIF、GPP、植物水力性状的同步观测是需要解决的一个关键科学问题。

(2) 干旱地区 SIF 的正向模拟是 SIF 研究的热点和难点。当前 SIF 前向模型缺乏植物水力性状的考虑，影响了该类模型在干旱半干旱地区的应用，因此模型对水分胁迫的响应精度有待进一步提高。如何对植物水力性状参数化，建立植物水力性状与 SIF 模拟之间的联系，从基于过程的角度改进并优化 SIF 前向模型，提高其在水分胁迫条件下的模拟精度，是本项目最终要解决的科学问题。

## 1.7 研究方案与技术线路

基于本项目的研究目标及研究内容，在查阅国内外相关资料的基础上，充分吸收植物生理学、遥感信息学、生态学和土壤学等学科的最新研究成果，系统地研究叶片尺度和冠层尺度 SIF-GPP 关联机制对水分胁迫的响应，构建基于植物水分性状的 SIF 前向模型。依据本项目研究目标设计的相应试验方案如下。

本项目计划以西北旱区冬小麦和夏玉米为研究对象，以小区水分控制试验和野外同步测量为基础，结合数值分析、荧光模型和辐射传输理论，明确植物水力性状与 SIF 发射的联系，探讨 SIF 与 GPP 关联机制以及其对水分胁迫的响应，构建基于植物水力性状的 SIF 前向模型。首先基于利用荧光光合同步观测系统，探究不同水分调节下，冬小麦和夏玉米

叶片尺度的 SIF-GPP-NPQ 三者的关系;其次利用野外冠层顶 SIF 观测塔、涡度相关系统 (EC) 获取的冠层顶 SIF 和 GPP 数据,研究自然条件下冠层顶 SIF 发射量与 GPP 的关联机制,并结合干旱程度控制实验,研究 SIF 发射对不同干旱程度的响应机制;基于以上理解,将 SIF 发射过程对水分胁迫的响应机制集成到 STEMMUS-SCOPE 模型开发中,对 STEMMUS-SCOPE 模型进行改进,从过程模型的角度研究植物叶片-冠层 SIF 发射过程对外部驱动/环境胁迫因子的响应。以期提高对水分胁迫下 SIF 发射机制和 SIF-GPP 关联机制的理解,为旱区干旱监测和农业水资源管理提供理论依据和科学指导。拟采取的技术线路如图 2 所示。

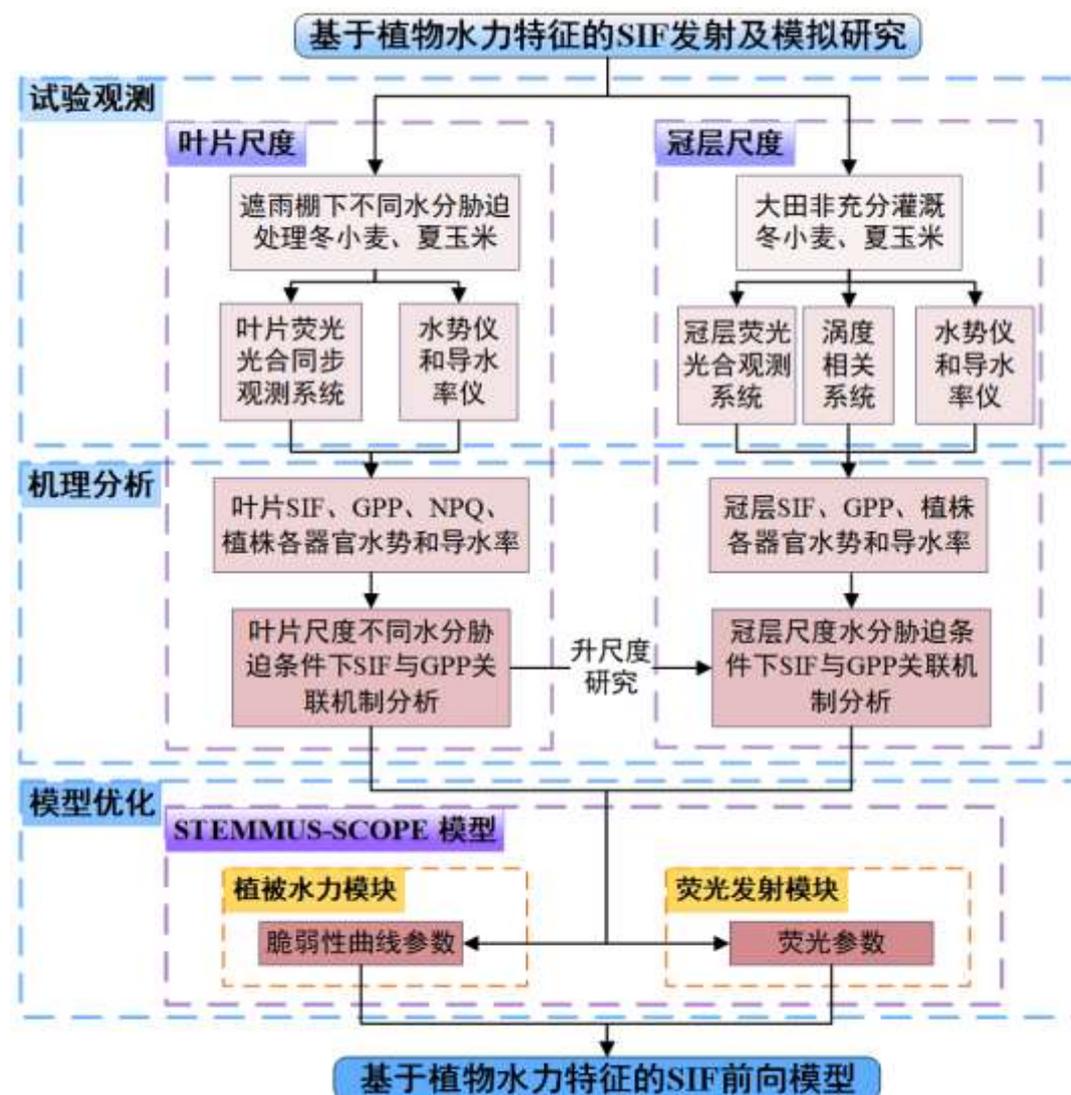


图 1.4 本课题拟采用的技术路线图

## 1.8 实验与研究方案

### 1.8.1 试验区概况

田间试验计划于 2021 年 6 月到 2023 年的 6 月在西北农林科技大学旱区农业节水研究院内的移动式遮雨棚试验小区和试验田内进行。该试验地位于关中平原 (东经 108°04', 北纬 34°20', 海拔 506 m), 属大陆性暖温带季风气候带, 年平均无霜期 212 d, 平均气温 12.9°C, 平均蒸发量 1500 mm, 平均降水量 635 mm。试验地土壤为壤土, 耕作层土壤基本理化性质为: pH 值 8.14、有机质质量分数 13.6 g kg<sup>-1</sup>、全氮 0.62 g kg<sup>-1</sup>、全磷 0.58 g kg<sup>-1</sup>、全钾 (K<sub>2</sub>O) 15.2 g kg<sup>-1</sup>。0-100 cm 土层的田间持水率为 23-25%, 凋萎含水率为 8.5% (以上均为质量含水率), 平均干容重为 1.31 g cm<sup>-3</sup>。



图 1.5 大田试验区和移动式遮雨棚小区

### 1.8.2 田间试验设计

本试验供试夏玉米品种为“武科 2 号”, 冬小麦品种为“西农 979”。试验播种时期根据当地历年普遍播种时期确定, 冬小麦一般于 10 月中下旬播种, 次年 6 月上旬收获; 夏玉米一般于 6 月中下旬播种, 当年 10 月上旬收获。小区试验和大田试验的田间管理 (施肥、除草、杀虫、防病) 一致。

遮雨棚小区试验: 主要进行不同水分胁迫条件下对植株 SIF 参数及 SIF-GPP 关联机制的影响研究, 将冬小麦全生育期划为苗期、拔节期、抽穗期和成熟期 4 个生育阶段; 夏玉米全生育期划分为三叶期-拔节期、拔节期-抽雄期、抽雄期-灌浆期和灌浆期-成熟期 4 个生育阶段。对作物不同生育期进行控水处理, 水分设置以田间持水量的 85-100%、75-85%、60-70%、45-55% 四个灌水水平, 其中 85-100% 处理因无水分胁迫而被作为对照组, 每个处理为了便于测量设置 3 个重复, 共 12 个小区, 作物生理生态指标也依据本项目所划分的作物生长阶段观测, 具体试验处理如表 1 所示。

表 1 遮雨棚小区试验处理

处理	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
CK	85-100%	85-100%	85-100%	85-100%
T1	75-85%	75-85%	75-85%	75-85%

T2	60-70%	60-70%	60-70%	60-70%
T3	45-55%	45-55%	45-55%	45-55%

大田试验：主要研究冠层尺度上冬小麦、夏玉米 SIF-GPP 关联机制对干旱的响应机制。该实验拟在 200 m×150 m 的农田中，布置气象观测站、涡度相关系统、塔式 SIF 观测站，对农田冠层尺度 SIF、GPP 及气象因子进行观测。具体灌水量根据蒸渗仪和降雨量情况，进行非充分灌溉。

### 1.8.3 测定项目与方法

(1) 作物各器官导水率观测：玉米植株根系水力导度、玉米地上部导水率（单株玉米茎秆+叶片导水率）用美国 Dynamax 公司生产的高压导水率仪测定；小麦根系导水率用 Model 600 型压力室（PMS 公司，美国）进行测量；玉米、小麦叶片导水率用稳态蒸腾驱动法（Evaporative flux method）进行测定。

(2) 作物生理指标：叶面积指数采用 LAI-2200C 冠层分析仪测定；作物光合速率、气孔阻力、叶片蒸腾速率等生理指标利用便携式光合仪每隔 5-7 天观测其日变化；作物叶水势、土壤水势用 PSYPRO 型露点水势仪测定；根、茎水势用小液流法测定。

(3) 作物根系指标：利用 CI-600 植物根系生长监测系统对不同水分处理条件下的作物根系动态监测，同时利用原位根钻取样法每隔 15-20 天采用“十字交叉法”对植株根系进行取样，获取不同土层的总根长、表面积、各径级根长等指标。

(4) 荧光参数和光合速率监测：小区试验叶片尺度 SIF 和 GPP 利用本实验开发的叶片荧光光合同步观测系统监测。大田试验冠层尺度 GPP，为防止由于仪器故障导致连续观测数据的缺失，采用两台涡度相关系统同步观测；冠层尺度 SIF 采用塔式 SIF 自动观测系统观测。

(5) 作物需水量：大田试验采用蒸渗仪确定作物需水量，结合自动气象站测得的降雨量，对大田试验进行非充分灌溉。

(6) 气象数据：采用自动气象站进行气温、空气相对湿度、2 m 高处的风速、太阳辐射强度和降水量等的观测；常规气象资料利用设于站内的国家一般气象站数据。

(7) 土壤温湿度指标：在田间试验中布设土壤温湿度传感器（5TM）连续测量试验区 0-100 cm 土层含水量和土壤温度，并且定期校准以保证数据精度。

(8) 无损叶绿素相对含量测量：日本 Konica Minolta 公司的 SPAD-502Plus 叶绿素计，实验室现有。

(9) 作物生长状况监测：利用物候相机每隔 1 小时对作物拍照记录生长状况，实验室现有。

## 第二章 STEMMUS-SCOPE 耦合模型的建立与验证

### 2.1 概述

以关中平原典型农田生态系统（冬小麦夏玉米农田）为基础，本章构建了基于SPAC系统的STEMMUS-SCOPE模型。基于本站点冬小麦夏玉米农田通量观测数据，本章在SPAC系统框架下，将SCOPE与STEMMUS进行耦合，建立了SCOPE-STEMMUS模型，集成了SCOPE在冠层辐射传输和光合作用模拟方面的优势和STEMMUS在土壤水热运移模拟的优势，解决了SCOPE在干旱条件下对通量高估的问题。

### 2.2 STEMMUS-SCOPE 模型技术路线

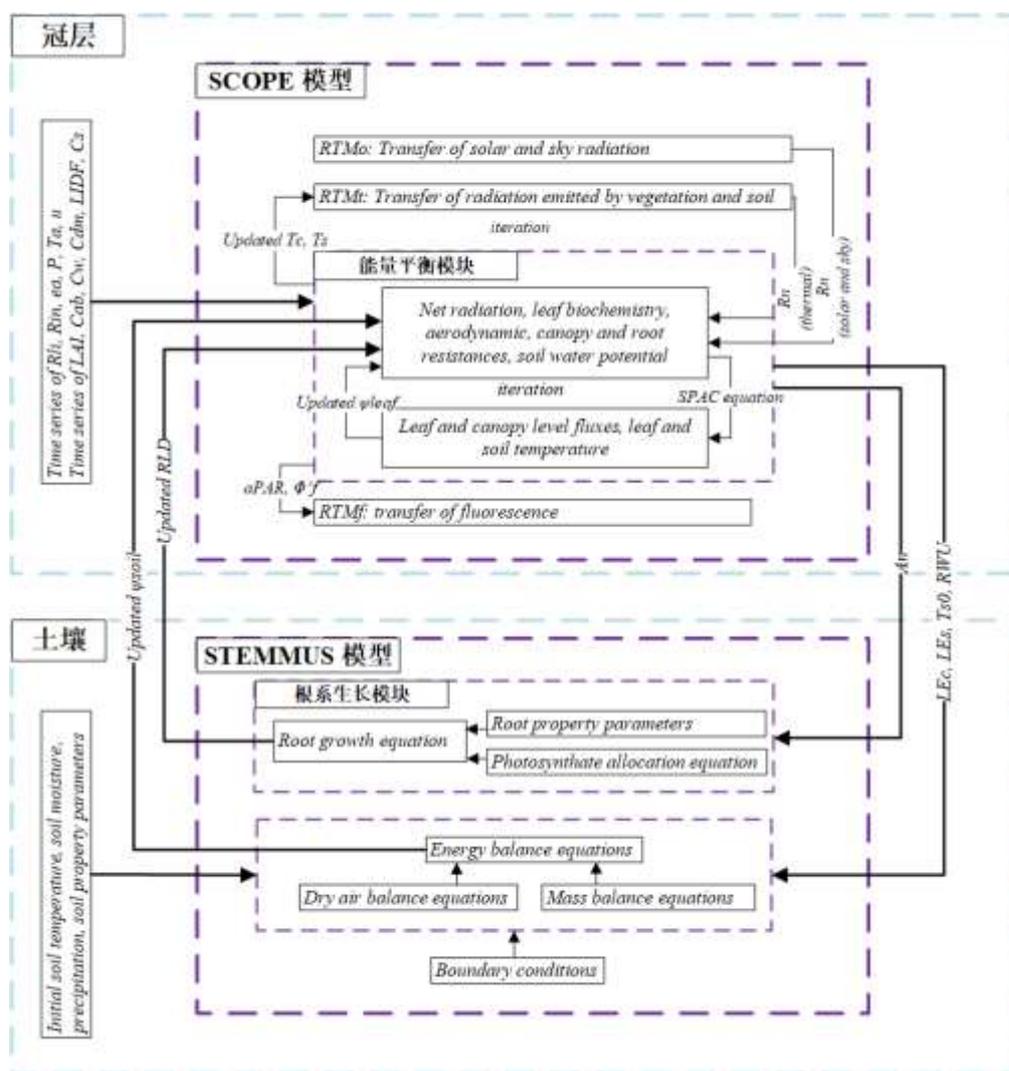


图 2-1 STEMMUS-SCOPE耦合技术路线图 (Yu et al., 2018; Van der Tol et al., 2009) .

Fig.2-1 The coupling scheme of STEMMUS-SCOPE.

以关中平原典型农田生态系统（冬小麦夏玉米农田）为基础，本章构建了基于 SPAC 系统的 STEMMUS-SCOPE 模型。按照物理过程的不同特征，STEMMUS-SCOPE 的模型结构可以分成两部分：与植被覆盖相关的物理过程（SCOPE）和与土壤中水热传导相关的物理过程（STEMMUS）。

SCOPE模型是集合了辐射传输、光合作用以及能量平衡的一维光化学模型。该模型的优势是通过耦合叶片光合作用模型和冠层辐射传输模型，定量分析不同输入参数对拟合 *SIF*、*GPP* 的敏感性，消除生理、非生理参数对 *SIF*、*GPP* 的影响，以更好地理解 *SIF*、*GPP* 之间的关系。SCOPE模型分别利用叶片辐射传输Fluspect模块和基于SAIL模型的RTMo模块计算叶片尺度和冠层尺度的*SIF*，其中Fluspect模型是PROSPECT模型的扩展，增加了叶片尺度上的*SIF*辐射传输。SCOPE目前存在的一个主要问题是不能模拟土壤和植被的水量平衡，同时也没有对土壤水分对光合和气孔的影响参数化，因此该模型不能对短期干旱做出相应。因此，在SCOPE模型中引入土壤水分信息很有必要。Bayat 等人已将实测土壤数据用于SCOPE在干旱条件下草地下垫面陆面过程的模拟，提高了SCOPE在干旱条件下的模拟精度。除了实测土壤水分外，运用土壤水分运移模型，同样也可以获得较为准确的土壤水分信息。传统非饱和土壤水分运移模型忽略了土壤中气相流动，Zeng et al. (2011b) 开发的STEMMUS模型通过考虑土壤中气相流动，可以很好地模拟土壤水热耦合运移。目前，STEMMUS中蒸散发的计算是基于Penman-Monteith公式，然后通过水分胁迫系数来计算干旱条件下的蒸腾量及根系吸水量的半经验公式。因此，通过将SCOPE和STEMMUS在SPAC系统的基础上进行耦合，可以实现基于机理的冬小麦夏玉米农田陆面过程的模拟。耦合模型的技术路线如图 5-1所示。

## 2.3 STEMMUS-SCOPE 模型中主要过程的数学描述

### 2.3.1 SCOPE 模型主要过程的数学描述

SCOPE (Soil Canopy Observation, Photochemistry, and Energy fluxes) 模型是基于过程并集成了辐射传输、光合作用和能量平衡的陆面过程模型 (Van der Tol et al., 2009)。该模型可以对冠层光谱、叶绿素荧光、光合作用、蒸散发等进行模拟。但SCOPE目前仍然存在一定的问题。其中最主要的一个问题是SCOPE没有考虑土壤和植被的水量平衡，同时也没有明确的可以描述土壤水分变化对光合作用或气孔阻力的参数。因此，只有当土壤水分胁迫对植被的光学特征产生影响时才能被SCOPE所获得。但Bayat et al. (2018) 的研究发现，植被光学表现的变化只能解释部分土壤水分动态对植被的影响。因此，如果忽略土壤水分的影响，会对SCOPE模型中*GPP*和*ET*的模拟造成一定程度的偏差。该问题限制了SCOPE模

型在土壤水分条件是限制植被生理活动主要因子的生态系统中的应用。在当今世界频发严重干旱的生态系统中，SCOPE能否对土壤水分胁迫做出精确的响应对其在这些生态系统的应用尤为重要（Zhou et al., 2013）。随后，Bayat et al.（2019）将SCAC系统引入到SCOPE模型中提出了SCOPE\_SM模型，并对SCOPE\_SM在草地生态系统进行了验证，但该模型并未考虑植被根区根系分布和土壤水分分布的影响。

在SCOPE模型中，光合作用的模拟是通过Farquhar et al.（1980）提出的光合模型来实现。其中，C4植物的光合作用过程是通过计算三个与光合相关的过程的最小值来模拟光合作用速率，这三个过程包括：（1）暗反应中羧化速率受核酮糖二磷酸羧化酶加氧酶（Rubisco）活性限制的同化速率， $V_c$ 的计算公式如公式（5-2）所示；（2）受光反应中光照对电子传递速率限制的同化速率；（3）受PEP羧化速率限制的同化速率。

$$V_c = V_{c \max} W S F \quad (5-1)$$

$$V_e = \frac{J}{6} \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5-2)$$

$$V_s = p_i \left( k_p - \frac{L}{p_i} \right) / P \quad (5-3)$$

$$A = \min(V_c, V_e, V_s) \quad (5-4)$$

式中， $V_{c \max}$  为 Rubisco 最大羧化速率； $p_i$  为胞间  $\text{CO}_2$  分压； $k_p$  为 PEP 羧化酶的拟一级速率常数； $P$  为大气压力。

SCOPE 中，植被暗呼吸（ $R_d$ ）作用的计算公式如下：

$$R_d = f_d V_{c \max} \quad (5-5)$$

式中， $f_d$  为经验参数，通常对于 C3 植物取值为 0.015，对于 C4 植物取值为 0.025。

净光合速率  $A_n$  的计算如下：

$$A_n = A - R_d \quad (5-6)$$

气孔阻力  $r_c$ （ $\text{s m}^{-1}$ ）的计算如下：

$$r_c = \frac{0.625(C_s - C_i)}{A_n} \frac{\rho_a}{M_a} \frac{10^{12}}{P} \quad (5-7)$$

式中， $\rho_a$ （ $\text{kg m}^{-3}$ ）为空气密度， $M_a$ （ $\text{g mol}^{-1}$ ）为干空气摩尔分子质量， $P$ （hPa）为大气压力。

SCOPE 中，潜热通量  $LE$ （ $\text{W m}^{-2}$ ）的计算如下：

$$LE = \lambda \frac{q_i - q_a}{r_a - r_c} \quad (5-8)$$

式中， $\lambda$  为液态水汽化热（ $\text{J kg}^{-1}$ ）， $q_i$  为气孔内或者土壤孔隙内湿度（ $\text{kg m}^{-3}$ ）， $q_a$  为冠层以上的空气湿度（ $\text{kg m}^{-3}$ ）， $r_a$  为空气动力学（ $\text{s m}^{-1}$ ）， $r_c$  为气孔阻力或土壤表面阻力（ $\text{s m}^{-1}$ ）。

其中 $q_i$ 的计算如下:

$$q_i = e_i \frac{M_w / M_a}{p} \quad (5-9)$$

式中,  $e_i$  为水汽压 (hPa),  $M_w$  为水的摩尔质量 ( $\text{g mol}^{-1}$ )。式中 $e_i$ 的计算公式为:

$$e_i = e_{sat} \exp \left( \frac{0.0001 \psi \frac{M_w}{R}}{T_i + 273.15} \right) \quad (5-10)$$

$$e_{sat} = 6.107 \times 10^{\left( \frac{7.5 T_i}{237.3 + T_i} \right)} \quad (5-11)$$

式中,  $e_{sat}$  为温度为 $T_i$ 时的饱和水汽压 (hPa),  $\psi$  为叶水势或土壤水势 ( $\text{J kg}^{-1}$ ),  $R$  为摩尔气体常数 ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $T_i$  为叶温或土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

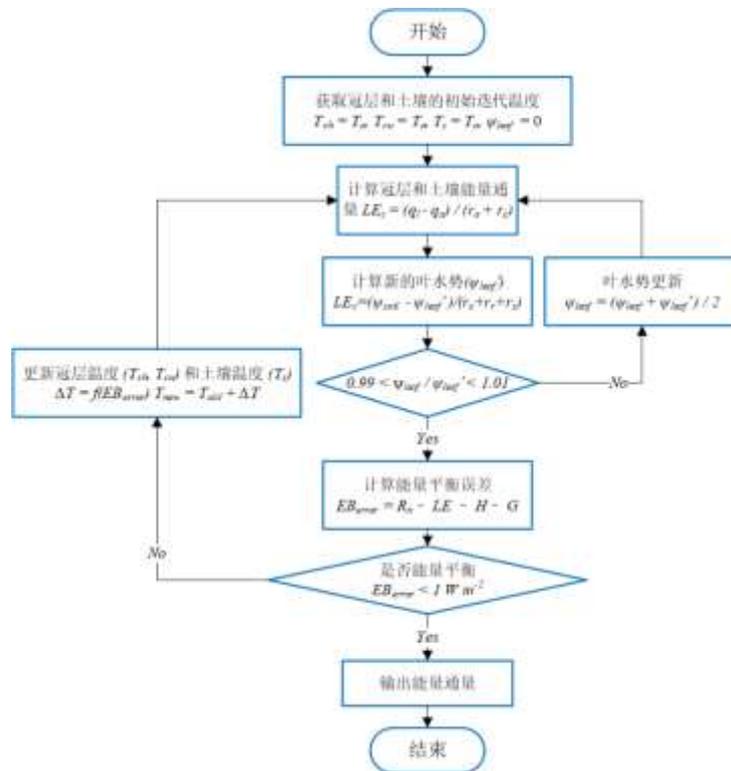


图 2-2 STEMMUS-SCOPE 模型中叶水势和能量平衡迭代路线图

Fig. 2-2 The iteration of leaf water potential and energy balance.

### 2.3.2 STEMMUS 模型主要过程的数学描述

STEMMUS (Simultaneous Transfer of Energy, Mass and Momentum in Unsaturated Soil) 模型可以模拟非饱和土壤中水、汽、热耦合运移。Yu et al. (2016) 在 STEMMUS 中引入了宏观根系吸水模型。该根系吸水模型是通过 S-W 双源模型或者双作物系数法计算潜在植物蒸腾，通过土壤水分胁迫因子或通过冠层导度与土壤水分含量的关系来计算由于干旱造成的植物蒸腾量的降低。尽管这两种方法可以很好地模拟水分胁迫条件下植物蒸腾量和土壤水分动态，但其忽略了植物生理过程。因此，改进 STEMMUS 中根系吸水模块对植物与土壤之间的相互作用的过程研究尤为重要。

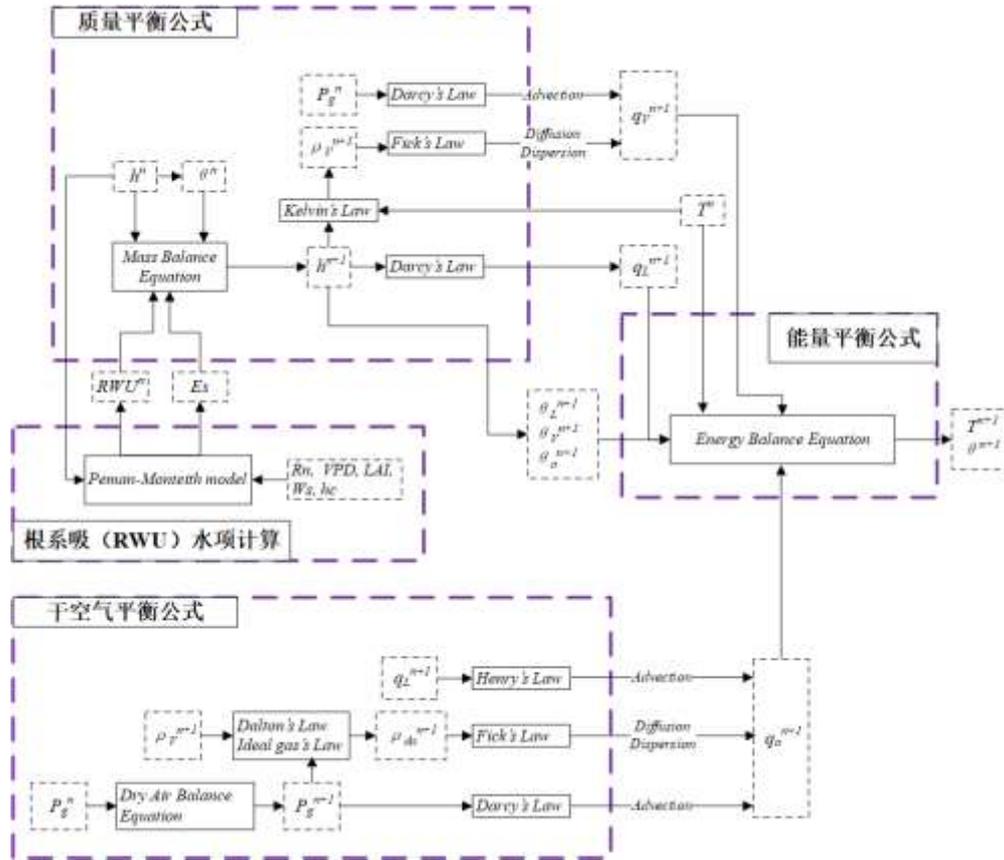


图 2-3 STEMMUS 模型技术路线图  
Fig. 2-3 The scheme of STEMMUS model

(1) 土壤水分守恒公式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_L \theta_L + \rho_V \theta_V) = - \frac{\partial}{\partial z} (q_{Lh} + q_{LT} + q_{La} + q_{Vh} + q_{VT} + q_{Va}) - S = \rho_L \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) + D_{TD} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{K}{\gamma W} \frac{\partial P_g}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{Vh} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{VT} \frac{\partial T}{\partial z} + D_{Va} \frac{\partial P_g}{\partial z} \right] - S \quad (5-12)$$

式中， $\rho_L$ ， $\rho_V$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) 分别为液态水密度和水汽密度； $q_L$ ， $q_V$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) 分别为液态水和水汽的体积含水量； $z$  (m) 表示垂直方向坐标 (向上为正)； $S$  ( $\text{s}^{-1}$ ) 为根系吸水汇项。 $K$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) 为水力导度； $h$  (m) 为压力水头； $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 为土壤温度； $P_g$  (Pa) 为孔隙气

压。 $\gamma_w$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$ ) 为水的比重。 $D_{TD}$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ) 为温度梯度导致的液态水流动的传输系数； $D_{vh}$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 为等温水汽导度； $D_{VT}$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ) 为热水汽扩散系数。 $D_{va}$  为平流水汽传输系数 (Zeng et al. 2011a,b)。  $q_{Lh}$ ,  $q_{LT}$  和  $q_{La}$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 分别为由基质势、温度和气压梯度驱动的液态水通量。  $q_{vh}$ ,  $q_{vT}$  和  $q_{va}$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 分别为由基质势、温度和气压梯度驱动的水汽通量。

## (2) 干空气守恒公式

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon \rho_{da} (S_a + H_c S_L)] = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_e \frac{\partial \rho_{da}}{\partial z} + \rho_{da} \frac{S_a K_g}{\mu_a} \frac{\partial P}{\partial z} - H_c \rho_{da} \frac{q_L}{\rho_L} + (\theta_a D_{vg}) \frac{\partial \rho_{da}}{\partial z} \right] \quad (5-13)$$

式中,  $\varepsilon$  为孔隙度;  $\rho_{da}$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) 干空气密度;  $S_a (= 1 - S_L)$  为土壤的空气饱和度;  $S_L (= \theta_L / \varepsilon)$  为土壤的液态水饱和度;  $H_c$  为Henry's常数;  $D_e$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) 为土壤中水汽分子扩散系数;  $K_g$  ( $\text{m}^2$ ) 为固有透气性;  $q_L$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 为液态水通量;  $\theta_a (= \theta_v)$  为土壤中干空气体积比率;  $D_{vg}$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) 为气相纵向弥散系数 (Zeng et al., 2011a,b)。

## (3) 能量平衡公式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(\rho_s \theta_s C_s + \rho_L \theta_L C_L + \rho_v \theta_v C_v + \rho_{da} \theta_a C_a)(T - T_r) + \rho_v \theta_v L_0] - \rho_L W \frac{\partial \theta_L}{\partial t} = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} [q_L C_L (T - T_r) + q_v (L_0 + C_v (T - T_r)) + q_a C_a (T - T_r)] - C_L S (T - T_r) \end{aligned} \quad (5-14)$$

式中,  $C_s$ ,  $C_L$ ,  $C_v$ ,  $C_a$  ( $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ) 分别为土壤颗粒、液态水、水汽和干空气的比热容;  $\rho_s$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) 为土壤颗粒密度;  $q_s$  土壤颗粒体积比例;  $T_r$  ( $\text{°C}$ ) 为参考温度;  $L_0$  ( $\text{J kg}^{-1}$ ) 为温度为 $T_r$ 时的汽化热;  $W$  ( $\text{J kg}^{-1}$ ) 为润湿差热 (当少量的自由水被土壤基质势吸附时释放的热量);  $\lambda_{eff}$  ( $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ) 为土壤有效热力学导度;  $q_L$ ,  $q_v$  和  $q_a$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 分别为液态水、水汽和干空气通量。

## 2.3.3 STEMMUS-SCOPE 模型主要过程的数学描述

以关中平原典型农田生态系统 (冬小麦夏玉米农田) 为基础, 本章构建了基于SPAC系统的STEMMUS-SCOPE模型。

### (1) 根系生长模型

为了计算每一土壤的根系阻力, 本文在耦合模型中引入了新的根系生长模块用来模拟根长的生长。该根系生长模块参考了INRA开发的作物模型 (STICS) (Beaudoin et al., 2009)。

#### (1. 1) 根区深度动态模拟

根区深度的初始长度对于播种作物而言为播种深度, 对移植或多年生作物而言为模拟开始时的实际根区深度。

$$\Delta Z = \begin{cases} 0 & T_a < T_{\min} \\ (T_a - T_{\min}) * RGR & T_{\min} < T_a < T_{\max} \\ (T_{\max} - T_{\min}) * RGR & T_{\max} < T_a \end{cases} \quad (5-15)$$

$$D_z(i) = D_z(i-1) + \Delta Z \quad (5-16)$$

式中， $\Delta Z$  为第  $i$  个时间步长根区深度的变化量； $D_z$  (cm) 为根区深度； $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 为空气温度； $T_{\min}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 为根系生长的最低温度； $T_{\max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 为根系生长的最高温度； $RGR$  ( $\text{cm } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ) 为根区深度的生长率。

### (1. 2) 根长生长动态模拟

大多数作物模型和陆面模型用标准根系分布来模拟根系在根区内的分布比率，本研究则模拟了每一土层的实际根长，进而用来模拟每一土层根系阻力。

$$\Delta RI_{-tot} = \frac{A_n * fr_{root}}{R_c * R_d * \pi * r_{root}^2} \quad (5-17)$$

式中， $fr_{root}$  为根系的光合产物分配系数，并且假定改参数为  $LAI$  和土壤水分含量的函数。 $A_n$  为净同化速率 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )。  $R_c$  为根干有机质含碳量， $R_d$  为根长密度 ( $\text{m m}^{-3}$ )， $\Delta RI_{-tot}$  ( $\text{m m}^{-3}$ ) 为某一时间步长内总根长变化。

本研究中主要考虑了根区土壤湿度  $A_w$  和太阳辐射  $A_L$  对影响根系的光合产物分配系数。其计算公式如下：

$$A_w = \max \left[ 0.1, \min \left( 1, \beta_w \right) \right] \quad (5-18)$$

式中， $\beta_w$  为根区加权平均土壤水分胁迫系数。

$$A_L = \max \left[ 0.1, e^{-K_e LAI} \right] \quad (5-19)$$

式中， $K_e = 0.15$  为消光系数。

$$fr_{root} = \max \left[ r_{\min}, r_0 \frac{3A_L}{A_L + 2A_w} \right] \quad (5-20)$$

式中， $r_{\min} = 0.15$  为根系光合产物分配系数最小值， $r_0$  为理论上非胁迫条件下根系光合产物分配系数。

$$\Delta RI(i) = \Delta RI_{-tot} * RF(i) \quad (5-21)$$

式中， $RF(i)$  为新生长的根长在第  $i$  层土壤的分配比例， $\Delta RI(i)$  为第  $i$  层新生长根长。

$$RI_i^n = RI_i^{n-1} + \Delta RI(i) \quad (5-22)$$

式中， $RI_i^n$  和  $RI_i^{n-1}$  为第  $i$  层土壤在步长  $n$  和步长  $n-1$  的根长。

$$RF(i) = \frac{RI(i)}{RI_T} \quad (5-23)$$

式中， $RL_r$ 为根区总根长， $RI(i)$ 为第*i*层土壤根长*i*。

## (2) 基于 SPAC 系统的根系吸水模型

本研究根系吸水及作物蒸腾的计算如下：

$$\sum_{i=1}^n \frac{\psi_{s,i} - \psi_l}{r_{s,i} + r_{r,i} + r_{x,i}} = \frac{0.622}{p} \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{e_l - e_a}{r_c + r_a} \right) = T \quad (5-24)$$

式中， $\psi_{s,i}$ 为土层*i*的土壤水势（m）， $\psi_l$ 为叶水势（m）， $r_{s,i}$ 、 $r_{r,i}$ 和 $r_{x,i}$ 分别为土壤水力阻力（ $s\ m^{-1}$ ）、根系径向阻力（ $s\ m^{-1}$ ）和植物轴向阻力（ $s\ m^{-1}$ ）。 $e_l$ 和 $e_a$ 分别为叶子和大气的水汽压（hPa）。

土壤水势 $\psi_s$ 为土壤湿度的函数（Van Genuchten, 1980），其计算如下：

$$\psi_s = \frac{\left( S_e^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}}{\alpha} \quad (5-25)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (5-26)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5-27)$$

式中， $\theta$ ， $\theta_{sat}$ 和 $\theta_r$ 分别为土壤含水量、土壤饱和含水量和土壤残余含水量（Van Genuchten, 1980），此外， $\alpha$ 和 $n$ 为土壤相关参数。本研究中 $\theta_{sat}$ 、 $\theta_r$ 、 $\alpha$ 和 $n$ 的取值分别为0.42、0.0875、0.45和1.41。

$r_s$ 的计算如下（Reid and Huck, 1990）：

$$r_s = \frac{1}{B * K * L_v * \Delta Z} \quad (5-28)$$

式中， $B$ 为根长活性因子， $K$ 为土壤水力导度（ $m\ s^{-1}$ ）， $L_v$ 为根长密度（ $mm^{-3}$ ）， $\Delta Z$ 为土层厚度（m）。 $B$ 的计算如下：

$$B = \frac{2\pi}{\ln \left[ \left( \pi L_v \right)^{-1/2} / r \right]} \quad (5-29)$$

式中， $r$ 为根的半径（m）。

$K$ 的计算如下：

$$K = K_{sat} S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (5-30)$$

式中， $K_{sat}$ 为土壤饱和导水率（ $m\ s^{-1}$ ）， $l$ 为孔隙连通性经验参数。

$r_r$ 的计算如下（Reid and Huck, 1990）：

$$r_r = \frac{P_r (\theta_{sat} / \theta)}{L_v \Delta Z} \quad (5-31)$$

式中， $P_r$  为根径向阻抗 ( $\text{s m}^{-1}$ )。

木质部阻力  $r_x$  计算如下 (Klepper et al. 1983)：

$$r_x = \frac{P_a Z}{0.5 f L_v} \quad (5-32)$$

式中， $P_a$  轴向阻抗 ( $\text{s m}^{-3}$ )， $Z$  土层中点土壤深度， $f$  为特定土层中直接连接到茎的根系的比例。本研究中，根据Klepper et al. (1983) 的研究， $f$  的取值为0.22。

在STEMMUS中，由Milly (1982) 改进的Richards (1931) 方程可以通过数值求解来计算大气和土壤间的垂直方向相互作用过程。液态水和水汽流动的控制方程表述如下：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} (\rho_L \theta_L + \rho_v \theta_v) = -\frac{\partial q_L}{\partial z} - \frac{\partial q_v}{\partial z} - S \quad (5-33)$$

式中， $\rho_L$  和  $\rho_v$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) 分别为液态水和水汽密度； $\theta_L$  和  $\theta_v$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) 分别为液态水和水汽的体积含量； $z$  (m) 为纵向坐标； $q_L$  和  $q_v$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 分别为土壤液态水和水汽通量 (向上为正)； $S$  ( $\text{s}^{-1}$ ) 为根系吸水汇项。

液态水通量由两个分量组成，包括压力水头驱动的等温通量  $q_{Lh}$  和温度驱动的热量通量  $q_{LT}$ ，计算公式如下：

$$q_L = q_{Lh} + q_{LT} = -\rho_L K_{Lh} \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) - \rho_L K_{LT} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5-34)$$

式中： $K_{Lh}$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) 和  $K_{LT}$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 分别为等温水力传导率和热水力传导率； $h$  (m) 为压力水头； $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) 为土壤温度。

水汽通量也由两个分两组呈，包括压力水头驱动的等温通量  $q_{vh}$  和温度驱动的热量通量  $q_{vT}$ ，其计算公式如下：

$$q_v = q_{vh} + q_{vT} = -D_{vh} \frac{\partial h}{\partial z} - D_{vT} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5-35)$$

式中， $D_{vh}$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 为等温水汽传导率； $D_{vT}$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 为热水汽扩散系数 (Zeng, et al, 2011)。

本研究中根系吸水项的计算如下：

$$S_i = \frac{\psi_{s,i} - \psi_l}{r_{s,i} + r_{r,i} + r_{x,i}} \quad (5-36)$$

与其他研究中根系吸水项的计算不同，本研究并没有采用其他研究中计算每层土壤的标准根系吸水量后再计算根系补偿吸水量和通过根系的土壤水分再分配，本研究是采用了基于物理过程的、考虑了根系阻力和土壤水力阻力以及叶水势及土壤水势的根系吸水模型，因此无需再单独计算根系补偿吸水量和通过根系的土壤水分再分配。

表 2-1 STEMMUS-SCOPE 模型参数对照表

Table 5-1 List of parameters and values used in STEMMUS-SCOPE model

参数	描述	单位	取值
<b>大气</b>			
<i>aPAR</i>	被吸收光合有效辐射	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
<i>e<sub>a</sub></i>	空气水汽压	Pa	
<i>e<sub>l</sub></i>	叶片内水汽压	hPa	
<i>P</i>	大气压力	Pa	
<i>q<sub>a</sub></i>	冠层上方空气湿度	$\text{kg m}^{-3}$	
<i>q<sub>l</sub></i>	气孔内空气湿度	$\text{kg m}^{-3}$	
<i>r<sub>a</sub></i>	空气动力学阻力	$\text{s m}^{-1}$	
<i>RH</i>	相对湿度	%	
<i>R<sub>li</sub></i>	下行长波辐射	$\text{W m}^{-2}$	
<i>R<sub>in</sub></i>	下行短波辐射	$\text{W m}^{-2}$	
<i>R<sub>n</sub></i>	净辐射	$\text{W m}^{-2}$	
<i>SPAC</i>	土壤-植物-大气连续体		
<i>T<sub>air</sub></i>	空气温度	$^{\circ}\text{C}$	
<i>u</i>	风速	$\text{m s}^{-1}$	
<i>VPD</i>	饱和水汽压差	hPa	
<b>冠层</b>			
<i>A<sub>n</sub></i>	净同化速率	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
<i>C<sub>a</sub></i>	边界层 CO <sub>2</sub> 浓度	$\mu\text{mol m}^{-3}$	
<i>C<sub>ab</sub></i>	叶片叶绿素含量	$\mu\text{g cm}^{-2}$	80
<i>C<sub>ca</sub></i>	叶类胡萝卜素含量	$\mu\text{g cm}^{-2}$	20
<i>C<sub>w</sub></i>	叶片含水量	$\text{g cm}^{-2}$	0.009
<i>C<sub>dm</sub></i>	叶片干物质含量	$\text{g cm}^{-2}$	0.012
<i>C<sub>s</sub></i>	衰老物质含量		0
<b>续表 5-1</b>			
<i>DAS</i>	播种后天数		
<i>ET</i>	蒸散发	$\text{mm day}^{-1}$	
<i>GPP</i>	总初级生产力	$\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$	
<i>h<sub>c</sub></i>	冠层高度	m	[0-1.95]
<i>H</i>	感热	$\text{W m}^{-2}$	
<i>J</i>	电子传递速率	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	150
<i>K<sub>e</sub></i>	消光系数		0.15
<i>k<sub>p</sub></i>	PEP 羧化酶的拟一级速率常数		
<i>LAI</i>	叶面积指数	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	[0-4.39]
<i>LIDF</i>	叶倾角分布函数		[-1, 0]
<i>LE</i>	潜热	$\text{W m}^{-2}$	
<i>LE<sub>c</sub></i>	冠层潜热	$\text{W m}^{-2}$	
<i>m</i>	Ball-Berry 气孔导度模型参数		4
<i>NEE</i>	净生态系统交换	$\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$	
<i>p<sub>i</sub></i>	胞间 CO <sub>2</sub> 分压	Pa	
<i>r<sub>c</sub></i>	冠层阻力	$\text{s m}^{-1}$	

$Re$	生态系统呼吸	$g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$	
$T$	植物蒸腾量	$mm\ day^{-1}$	
$T_c$	植被温度	$^{\circ}C$	
$T_{ch}$	叶片温度 (阴叶)	$^{\circ}C$	
$T_{cu}$	叶片温度 (阳叶)	$^{\circ}C$	
$uWUE_p$	潜在水分利用效率	$g\ C\ hPa^{0.5}/kg\ H_2O$	
$uWUE$	实际水分利用效率	$g\ C\ hPa^{0.5}/kg\ H_2O$	
$V_{cmax}$	最大羧化速率	$\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	50
$\psi_l$	叶水势	m	

### 根系

$A_w$	根区可利用土壤水分		
$A_L$	可利用光		
$B$	根长活性参数与		
$D_Z$	根区深度	cm	
$f$	一个特定深度的分数, 定义为连接的根数		0.22
$f_{r_{root}}$	净同化量对根系的分配系数		
$P_a$	根轴向阻抗	$s\ m^{-3}$	$1*10^{10}$
$P_r$	根径向阻抗	$s\ m^{-1}$	$0.65*10^{12}$
$RF(i)$	第 $i$ 层土壤的更长生长分配系数		
$RL_T$	根区总根长	m	
$RL_t^i$	时间为 $t$ 时第 $i$ 层土壤根长	m	
$RL_{t-1}^i$	时间为 $t-1$ 时第 $i$ 层土壤根长	m	
$RL(i)$	第 $i$ 层土壤根长	m	
$RGR$	根区深度变化速率	$cm\ ^{\circ}C\ day^{-1}$	0.002
$R_D$	根长密度	$m\ m^{-3}$	
$r_{min}$	同化产物对根的最小分配系数		0.15

### 续表 5-1

$r_0$	无胁迫同化产物对根的分配系数		0.3
$r_{root}$	根直径	m	$0.15*10^{-3}$
$r_{x,i}$	植物对从土壤流向叶片的轴向阻力	s	
$r_{r,i}$	根径向水流阻力	s	
$r_{s,i}$	土壤水力阻力	s	
$R_C$	根干物质含碳量		0.488
$RWU$	根系吸水量	$m\ s^{-1}$	
$RF(i)$	第 $i$ 层土壤根长所占比例		
$T_{min}$	根系生长的最小温度	$^{\circ}C$	10
$T_{max}$	根系生长的最大温度	$^{\circ}C$	40
$\Delta Z$	第 $t$ 时间步长根深变化量	cm	
$\Delta RL_{tot}$	根区总根长变化量	m	
$\Delta RL(i)$	第 $i$ 层土壤根长变化量	m	

### 土壤

$C_s$	土壤颗粒比热容	$J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$	
$C_L$	液态水比热容	$J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$	$4.186*10^3$
$C_V$	水汽比热容	$J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$	$1.870*10^3$
$C_a$	干空气比热容	$J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$	$1.255*10^3$

$D_{TD}$	温度梯度驱动的吸收液流传输系数	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
$D_{Vh}$	等温蒸汽导度	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
$D_{VT}$	热蒸汽扩散系数	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
$D_{Va}$	平流水汽传输系数		
$D_{Vg}$	气相纵向弥散系数	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	
$D_e$	水汽在土壤中的分子扩散系数	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	
$E$	土壤蒸发量	mm	
$G$	土壤热通量	$\text{W m}^{-2}$	
$h$	土壤基质势	cm	
$H_c$	Henry 常数		0.02
$K$	水力导度	$\text{m s}^{-1}$	
$K_g$	固有透气性	$\text{m}^2$	
$K_s$	饱和水力导度	$\text{cm day}^{-1}$	18
$LE_s$	土壤潜热	$\text{W m}^{-2}$	
$L_0$	参考温度时的汽化潜热	$\text{J kg}^{-1}$	2497909
$m_a$	空气粘度	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	$1.846 \times 10^{-5}$
$n$	VG 模型参数		1.41
$P_g$	混合孔隙空气压力	Pa	
$q_L$	液态水通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$q_{Lh}$	基质势梯度驱动的液态水通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$q_{LT}$	温度梯度驱动的液态水通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$q_{La}$	空气压力梯度驱动的液态水通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$q_V$	水汽通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$q_{Vh}$	基质势梯度驱动的水汽通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
<b>续表 5-1</b>			
$q_{VT}$	温度梯度驱动的水汽通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$q_{Va}$	空气压力梯度驱动的水汽通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$q_a$	干空气通量	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$	
$S$	根系吸水汇项	$\text{cm s}^{-1}$	
$S_a$	土壤空气饱和度		
$S_L$	土壤水饱和度		
$SM(i)$	某一土层土壤体积含水量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
$T_s$	土壤温度	$^\circ\text{C}$	
$T_{s0}$	土壤表面温度	$^\circ\text{C}$	
$T_r$	参考温度	$^\circ\text{C}$	20
$W$	润湿差热	$\text{J kg}^{-1}$	$1.001 \times 10^3$
$WSF$	总水分胁迫系数		
$WSF(i)$	某一土层的水分胁迫系数		
$Z_{mid}$	土层中点深度	m	
$\Delta d$	土层厚度	m	
$\alpha$	VG 模型参数	$\text{m}^{-1}$	0.45
$\theta_{sat}$	土壤饱和含水量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.42
$\theta_f$	土壤田间持水量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.272
$\theta_r$	土壤残余含水量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.0875
$\theta$	土壤体积含水量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	

$\theta_L$	土壤中液态水含量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
$\theta_V$	土壤中水汽含量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
$\theta_s$	土壤中土壤颗粒含量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
$\theta_a$	土壤中干空气含量	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
$\psi_{s,i}$	第 $i$ 层土壤的土壤水势	m	
$\psi_{soil}$	土壤水势	m	
$\lambda_{eff}$	土壤有效导热系数	$\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	
$\gamma_w$	水的比重	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$	
$\rho_{da}$	干空气密度	$\text{kg m}^{-3}$	
$\rho_V$	水汽密度	$\text{kg m}^{-3}$	
$\rho_L$	液态水密度	$\text{kg m}^{-3}$	1
$\rho_s$	土壤颗粒密度	$\text{kg m}^{-3}$	
$\varepsilon$	土壤孔隙度	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0.50

---

# 第三章 STEMMUS-SCOPE 模型在草地、农田生态系统的验证

## 3.1 模型驱动及验证数据

本研究采用杨凌站自动气象站数据及实测生理生态数据作为耦合模型的驱动数据，并采用涡度通量数据对该模型进行验证。杨凌站地处半湿润易旱区，夏玉米耕作期为 6 月中旬至 10 月上旬，本章采用 2017 年夏玉米对耦合模型进行验证。相关气象数据如图 5-4 所示。

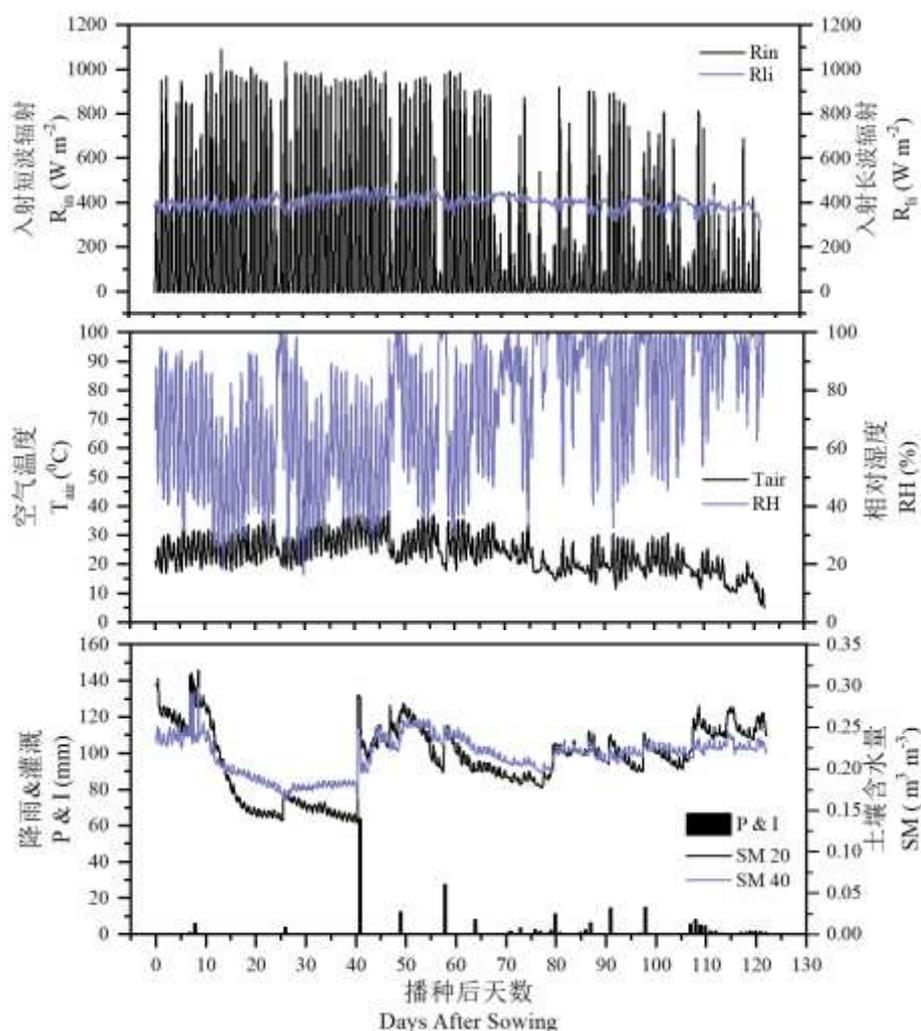


图 3-1 2017 年杨凌站玉米生长季环境因子季节变化。(a) 入射短波辐射 ( $R_{in}$ ) 和入射长波辐射 ( $R_{li}$ ), (b) 空气温度 ( $T_{air}$ ) 和相对湿度 ( $RH$ ), (c) 20 和 40 cm 土壤体含水量 ( $SM_{20}$  和  $SM_{40}$ ) 和灌溉降水量 ( $P&I$ )

Fig. 3-1 Seasonal variation of environmental factors for maize growing season at Yangling, China.

本研究采用以下三种统计指标来评价耦合模型STEMMUS-SCOPE：（1）均方根误差（ $RMSE$ ）；（2）决定系数（ $R^2$ ）；（3）一致性指数（ $d$ ）。其计算公式分别如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (5-37)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{|\bar{O}|} \quad (5-38)$$

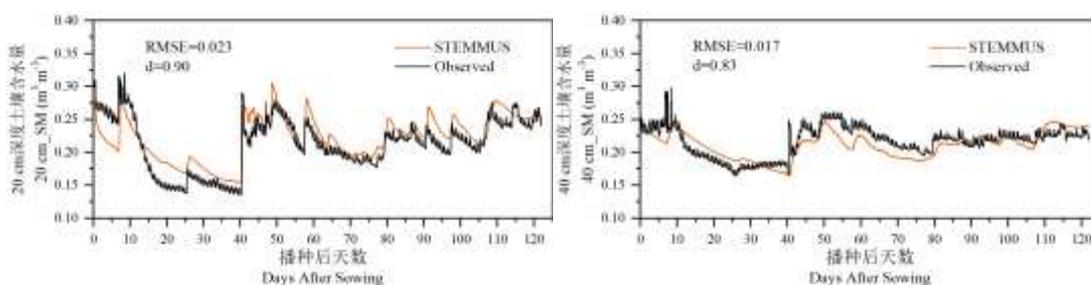
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5-39)$$

式中， $P_i$ 为第*i*个模拟值， $O_i$ 为第*i*个观测值， $\bar{O}$ 为观测值平均值， $n$ 为样本数量。

## 3.2 结果与讨论

### 3.2.1 土壤湿度模拟

图 5-5 对比了STEMMUS-SCOPE的土壤水分（ $SM$ ）模拟值和田间土壤水分观测值。结果表明，20 cm土壤水分模拟值在变化趋势上与实测值基本保持一致。其中，在生长初期和生长后期，模拟值较实测值稍有高估，但土壤水分动态变化对降雨和灌溉的响应的模拟精度很高。由于耦合模型STEMMUS-SCOPE和STEMMUS在土壤水热模拟的原理一致，耦合模型对土壤水分的模拟并没有得到显著提高。造成模型模拟值与田间实测值偏差的主要原因大致有两个：（1）基于土壤水分传感器的田间观测，传感器的校正会对观测值产生一定程度的误差；（2）本研究中，由于忽略了不同深度土壤性质的变异性（包括土壤容重和土壤水和导水率），这也会是模拟值产生一定的偏差，例如，对于耕作农田而言，尤其在播种后的一段时间内，表层翻耕过的土壤的土壤容重会显著低于深层未经翻耕的土壤，而在本研究中土壤容重均设为不随土壤深度变化的定值。



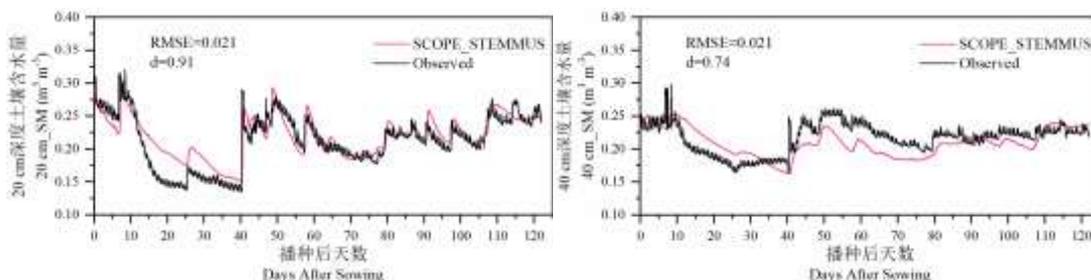
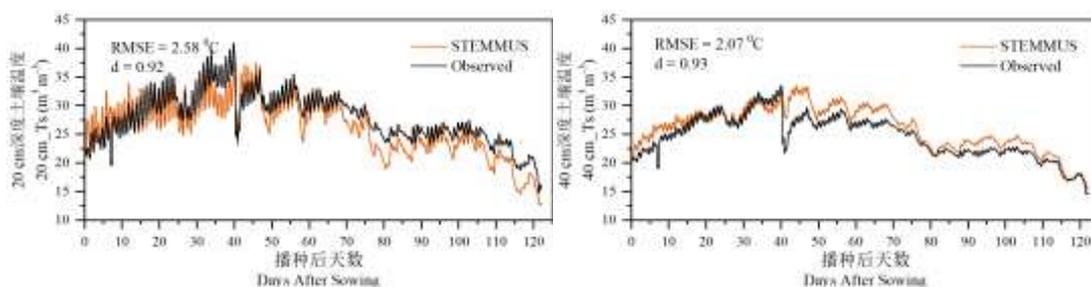


图 3-2 STEMMUS和STEMMUS-SCOPE模型 20cm和 40cm深度的土壤湿度模拟对比

Fig. 3-2 Comparison of observed and modeled soil moisture at 20cm and 40cm depth.

### 3.2.2 土壤温度模拟

图 5-6 为STEMMUS 和 STEMMUS-SCOPE 模型对土壤温度的模拟。总体来说，两个模型土壤温度模拟值和土壤温度传感器实测值在变化趋势上一致，并且模拟精度较高。其中，STEMMUS 和 STEMMUS-SCOPE 模型 20cm土壤温度模拟的均方根误差（*RMSE*）分别为 2.57 和 2.58 °C，一致性指数（*d*）分别为-0.24 和-0.25；对 40 cm土壤温度模拟的均方根误差（*RMSE*）分别为 2.05 和 2.07 °C，一致性指数（*d*）分别为-0.20 和 -0.18。结果表明，两种模型对土壤温度的模拟结果较好，模拟精度较高，但耦合模型STEMMUS-SCOPE和STEMMUS的模拟结果没有显著差异。除此之外，两种模型在某些时间的模拟结果均有一定误差。最大误差通常发生在农田进行灌溉阶段（*DAS* 40）。由于该研究地实施的是用地下水进行的大田漫灌，在夏季，灌溉水温度显著低于土壤温度，因此在灌溉时，土壤温度会迅速降低。由于本研究未对灌溉水的温度进行观测，因此在STEMMUS和STEMMUS-SCOPE模型默认降雨或灌溉的水温为空气温度，所以在该种灌溉方式条件下土壤温度的模拟存在一定的误差，后续研究将针对这一问题对模型进行改进。同时，温度传感器的观测在实施大田漫灌时也可能存在一定的误差。由于灌水量较大，传感器与土壤接触不紧密，水流会直接达到传感器表面，造成土壤温度迅速下降。总之，尽管存在一定的误差，STEMMUS和STEMMUS-SCOPE均可以很好地模拟不同深度的土壤温度的变化。



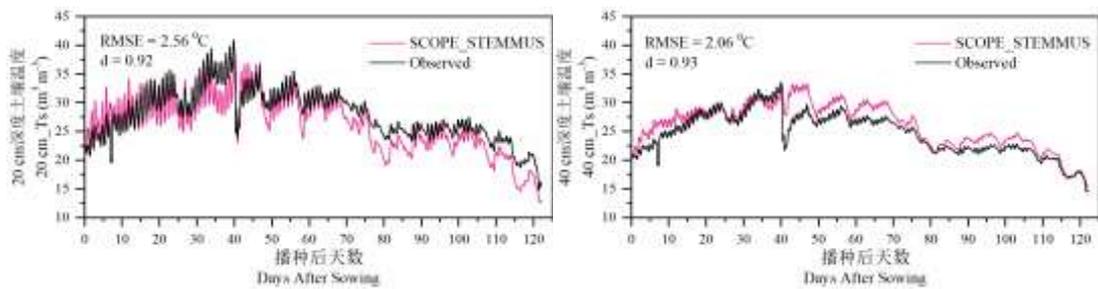


图 3-3 STEMMUS和STEMMUS-SCOPE 20cm和 40cm深度土壤温度实测值和模拟值对比  
Fig. 3-3 Comparison of observed and modeled soil temperature at 20cm and 40cm depth.

### 3.2.3 能量通量模拟

图 5-7 为SCOPE模型，SCOPE\_SM模型和STEMMUS-SCOPE模型对能量通量（净辐射 $R_n$ ，潜热 $LE$ ，显热 $H$ 和土壤热通量 $G$ ）的模拟。如图所示，三种模型对净辐射 $R_n$ 的模拟精度较高，与观测值具有很好的一致性，决定系数 $R^2$ 分别为 0.99、1.00 和 0.99。三种模型对土壤热通量 $G$ 的模拟结果较为接近，SCOPE模型，SCOPE\_SM模型和STEMMUS-SCOPE模型的决定系数 $R^2$ 分别为 0.81,0.79 和 0.80。STEMMUS-SCOPE对潜热 $LE$ 的模拟结果较好，决定系数 $R^2$ 为 0.85，相对于SCOPE和SCOPE\_SM的决定系数 0.82 和 0.84，耦合模型的模拟精度得到了不同程度的提高。最后，STEMMUS-SCOPE 和 SCOPE\_SM 对显热 $H$ 的模拟精度（ $R^2$ 分别为 0.74 和 0.75）比SCOPE对显热的模拟精度高（ $R^2$ 为 0.70）。

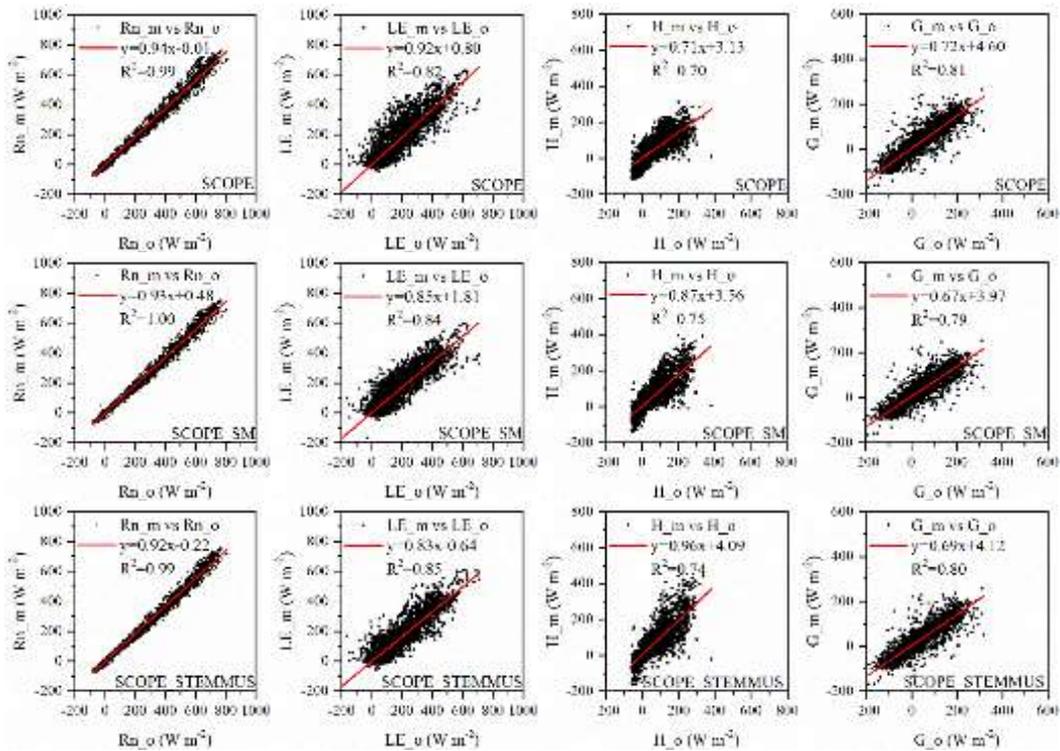


图 3-4 半小时净辐射 ( $R_n$ )、潜热通量 ( $LE$ )、显热通量 ( $H$ ) 和土壤热通量 ( $G$ ) 模拟值和实测值对比

Fig. 3-4 Comparison of observed and modeled half-hourly Net radiation ( $R_n$ ), Latent heat ( $LE$ ), Sensible heat

( $H$ ) and soil heat flux ( $G$ ) of SCOPE, SCOPE\_SM and STEMMUS-SCOPE.

### 3.2.4 日蒸散发 $ET$ 、植物蒸腾 $T$ 和土壤蒸发 $E$ 模拟

图 5-8 为SCOPE, SCOPE\_SM, STEMMUS和STEMMUS-SCOPE对蒸散发 $ET$ 的模拟。如图所示, SCOPE, SCOPE\_SM, STEMMUS和STEMMUS-SCOPE的 ( $R^2$ ) 分别为 0.76, 0.82, 0.80 和 0.81, 均方根误差 ( $RMSEs$ ) 分别为 0.84mm, 0.69mm, 0.76mm和 0.74mm。其中, 当作物经受水分胁迫时, SCOPE的模拟值与实测值差异较大。由于考虑了水分胁迫的影响, SCOPE\_SM, STEMMUS 和 STEMMUS-SCOPE在干旱期间蒸散发 ( $ET$ ) 的模拟值与实测值较为接近。这表明, SCOPE\_SM, STEMMUS 和 STEMMUS-SCOPE可以较为准确地预测该类型农田生态系统的蒸散发 ( $ET$ ), 特别是作物经受水分胁迫的时候。其中, STEMMUS的模拟精度稍低于其他两种模型, 这主要是由于SCOPE对冠层辐射传输的模拟更具机理性, 进而对植物蒸腾的模拟精度更高 (图 5-8)。

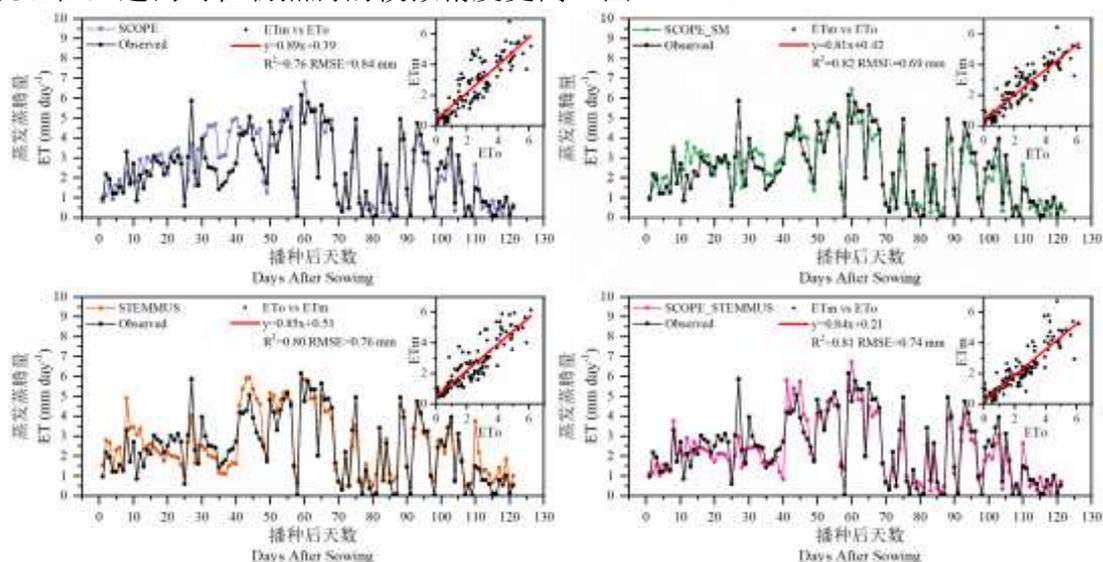


图 3-5 日蒸发蒸腾量 ( $ET$ ) 模拟值和实测值对比

Fig. 3-5 Comparison of modeled and observed daily evapotranspiration ( $ET$ ),  $ET_o$ : observed  $ET$ ;  $ET_m$ : modeled  $ET$ .

四种模型对植物蒸腾 ( $T$ ) 的模拟精度较高 (图 5-9)。SCOPE, SCOPE\_SM, STEMMUS 和 STEMMUS-SCOPE模拟值和实测值之间的决定系数分别为 0.82, 0.86, 0.79 和 0.86, 均方根误差分别为 0.60, 0.50, 0.67 和 0.50  $\text{mm day}^{-1}$ 。由于没有考虑土壤水分对植物蒸腾的影响, SCOPE模型并不能对水分胁迫做出响应, 因此其在植被经受水分胁迫时对植物蒸腾的模拟精度较低。如图所示, 在DAS 20至DAS40期间, SCOPE模型的植物蒸腾模拟值显著高于实测值。相对于SCOPE, 其他三种模型: SCOPE\_SM, STEMMUS和STEMMUS-SCOPE可以模拟出植被经受水分胁迫时植物蒸腾量的降低。在SCOPE\_SM, STEMMUS和STEMMUS-SCOPE三者中, STEMMUS-SCOPE 和 SCOPE\_SM的模拟精度比STEMMUS更高。其主要原因为SCOPE对冠层尺度的辐射传输和能量平衡的模拟机理性更强, 模拟精度

更高。而在STEMMUS中，辐射传输是基于较为简单的Beer's Law，因此，其对植物蒸腾的模拟精度稍低。但耦合模型在植被经受水分胁迫时低估植物蒸腾量，并且在复水后会高估植物蒸腾量，这可能是由于本研究并未考虑真实的 $V_{max}$ 在干旱及灌溉后的变化，有研究表明 $V_{max}$ 不仅受土壤水分状况影响，还和叶片含氮量有关（Xu, L., & Baldocchi, D. D., 2003）。总体而言，耦合模型STEMMUS-SCOPE可以很好地模拟水分胁迫条件下作物的植物蒸腾量。

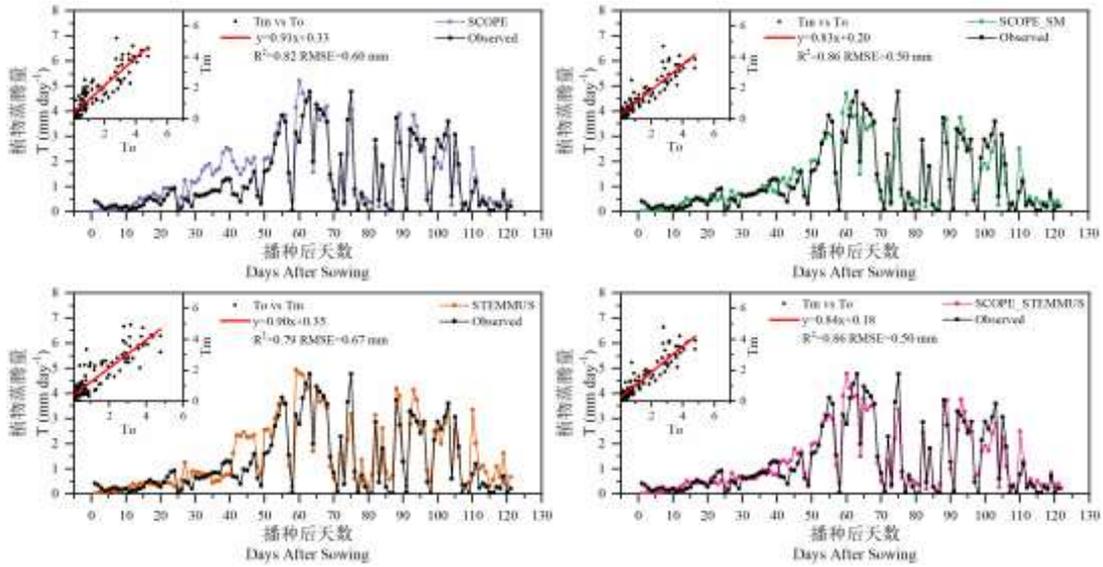


图 3-6 日植物蒸腾量 ( $T$ ) 模拟值与实测值对比

Fig. 3-6 Comparison of observed and modeled daily plant transpiration ( $T$ ),  $T_o$ : observed  $T$ ;  $T_m$ : modeled  $T$ .

图 5-10 为半小时植物蒸腾量模拟值与实测值对比。如图所示，STEMMUS-SCOPE 模型和 SCOPE\_SM模型的模拟值与实测值较为接近，并且均显著低于SCOPE模型的模拟值。其中，SCOPE与STEMMUS-SCOPE和SCOPE\_SM 主要差异在中午，由于辐射较高，光合作用主要受限于土壤水分，由于SCOPE模型忽略了土壤水分的影响，SCOPE模拟值显著高于其他模型。而在清晨和傍晚，SCOPE和其他模型的模拟值差别不大，这是由于此时辐射强度较低，光合作用主要受限于光照而不是土壤水分供应或二氧化碳浓度。

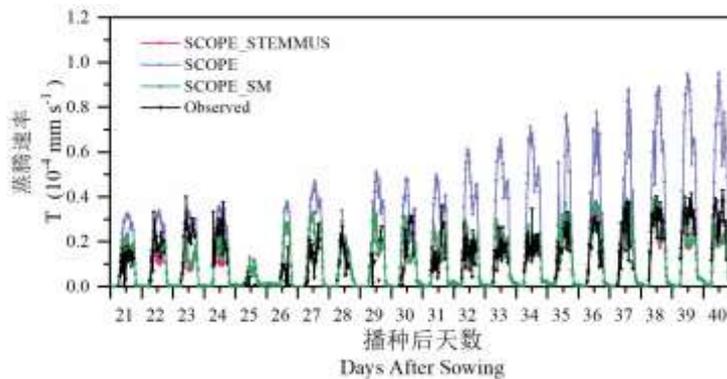


图 3-7 半小时植物蒸腾量 ( $T$ ) 模拟值与实测值对比

Fig. 3-7 Comparison of observed and modeled half-hourly transpiration ( $T$ ).

图 3-7 对比了不同模型对土壤蒸发量 ( $E$ ) 的模拟。如图所示，相对于其他模型，

STEMMUS-SCOPE 模型的模拟更为准确。在SCOPE模型中，土壤水分设定为定值 ( $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ )，因此，当实际土壤水分高于  $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  时，SCOPE模型通常会低估土壤蒸发，当实际土壤水分低于  $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  时，SCOPE模型通常会高估土壤蒸发。除SCOPE模型外，SCOPE\_SM模型、STEMMUS模型和STEMMUS-SCOPE模型均考虑了土壤蒸发对土壤水分动态变化的响应。但SCOPE\_SM需要实测土壤水分数据作为输入用来模拟土壤蒸发，由于本研究只有两个深度的实测土壤水分数据，因此，本研究将STEMMUS-SCOPE模型模拟的土壤水分数据和根区深度作为SCOPE\_SM模型的输入数据来计算土壤表面阻力，进而对比几种模型对土壤蒸发的模拟。对STEMMUS而言，尽管该模型可以较好的模拟土壤蒸发变化，但是其均方根误差RMSE高于STEMMUS-SCOPE模型。其原因与植物蒸腾的原因一致，SCOPE模型中辐射传输模块更具机理性，因此SCOPE模型对土壤表面的净辐射模拟更为准确，因此STEMMUS对土壤蒸发的模拟稍差于STEMMUS-SCOPE。STEMMUS-SCOPE模型模拟的均方根误差RMSE为  $0.60 \text{ mm day}^{-1}$ ，低于SCOPE模型 ( $0.67 \text{ mm day}^{-1}$ )、STEMMUS模型 ( $0.64 \text{ mm day}^{-1}$ ) 和SCOPE\_SM模型 ( $0.65 \text{ mm day}^{-1}$ )。其中，在发生降雨的时期，STEMMUS-SCOPE模型模拟的土壤蒸发误差较大，这可能是由于ET分离方法对实测土壤蒸发产生的误差，也可能是降雨期间土壤表面阻力估计不准确造成的。

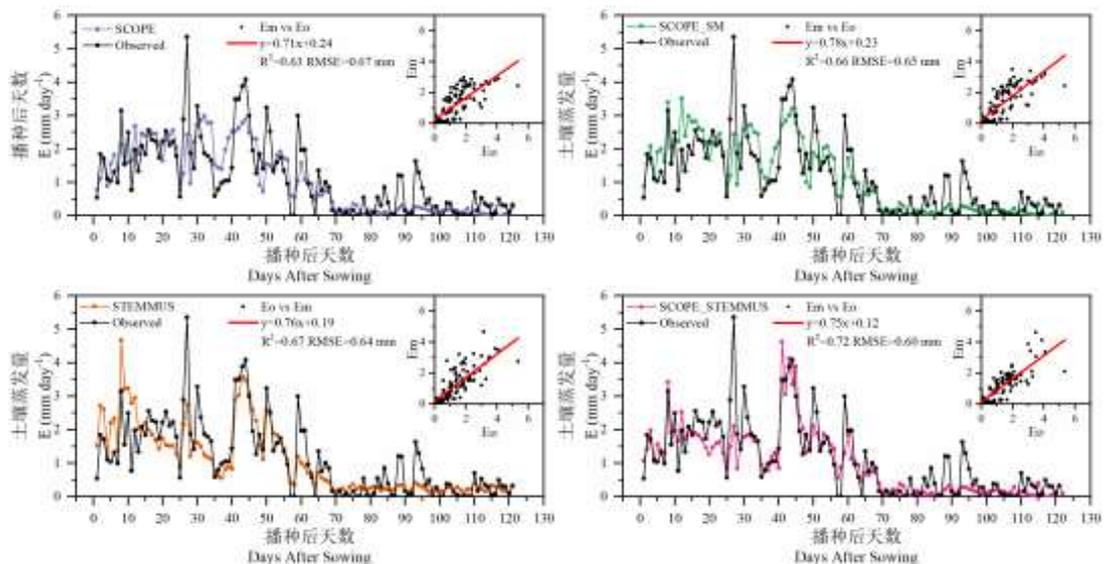


图 3-8 日土壤蒸发量 ( $E$ ) 模拟值与实测值对比

Fig. 3-8 Comparison of observed and modeled daily soil evaporation ( $E$ ),  $E_o$ : observed  $E$ ;  $E_m$ : modeled  $E$ .

### 3.2.5 净生态系统碳交换 $NEE$ 模拟

图 5-12 为SCOPE模型、SCOPE\_SM模型和STEMMUS-SCOPE模型对净生态系统碳交换  $NEE$  的模拟。如图所示，模拟结果与植物蒸腾的模拟相似，SCOPE模型并不能对土壤水分胁迫做出响应。在通过水分胁迫因子考虑了土壤水分对光合作用的影响之后，STEMMUS-SCOPE模型和SCOPE\_SM模型对  $NEE$  的模拟精度得到了较大程度的提高。决定系数  $R^2$  分别为 0.75 和 0.73，均方根误差分别为  $RESM$  2.71 和  $2.97 \text{ g C day}^{-1}$ 。总体看来，

STEMMUS-SCOPE模型的模拟值与观测值在后期一致性较高，而在前期有一定的误差，并且在土壤水分快速增加时，误差往往较大。由于 $NEE$ 是由总初级生产力 $GPP$ 和生态系统呼吸 $Re$ 计算得来， $NEE$ 误差的来源可能为模型对土壤呼吸的模拟精度在这些时期较低，土壤温度不仅受土壤温度的影响，而且与土壤湿度有密切关系，因为土壤湿度会影响土壤微生物活性，进而影响土壤呼吸强度，而本模型只考虑了土壤温度的影响，因此，本模型对土壤呼吸的模拟尚且存在一定的误差。夏玉米生长季中，土壤温度保持在较高水平，但当发生降雨和灌溉时，土壤温度会降低，土壤呼吸随着土壤温度的降低而降低，但土壤水分的升高又会使土壤呼吸增大，因此只考虑土壤温度对土壤呼吸的影响在这些时段往往会造成比较大的误差。后期研究中将会对土壤呼吸进行观测，进而改善模型对土壤呼吸的模拟。

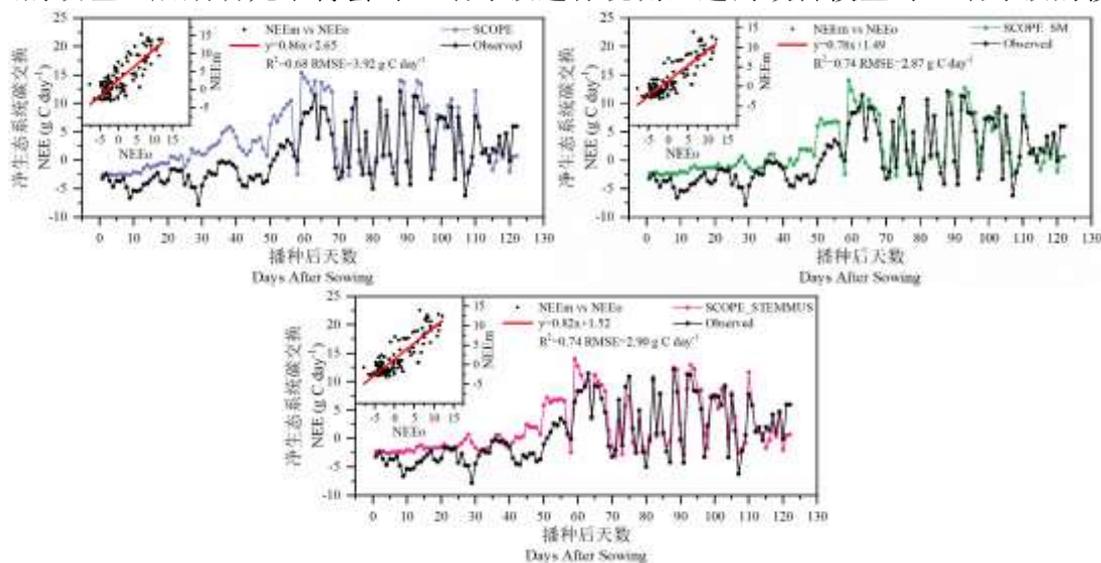


图 3-9 净生态系统碳交换 ( $NEE$ ) 模拟值和实测值对比

Fig. 3-9 Comparison of observed and modeled daily net ecosystem exchange ( $NEE$ ),  $NEE_o$ : observed  $NEE$ ;  $NEE_m$ : modeled  $NEE$ .

### 3.2.6 叶水势、水分胁迫系数和根长密度的模拟

叶水势是反映植物水分状况的重要参数。叶水势和水分胁迫系数的模拟值如图 5-13 所示。叶水势在植被经受水分胁迫时降低，这是由于土壤水势会随着土壤水分含量的降低而降低，从而叶子也会降低水势从而可以使根系从土壤中吸收水分进而运输到叶子。在玉米生长的中后期，由于根系区趋于稳定，叶水势对作物蒸腾的大小非常敏感，蒸腾量较大时，叶水势会更低以保证更快速的吸收土壤水分；反之，当蒸腾量较小时，叶水势较高。由于在实际情况中，对叶水势进行长期的连续性观测度较大，本研究参考对比了其他研究中对玉米叶水势的测量。许多研究都对玉米叶水势的日变化进行了观测。有研究表明水分状况良好的玉米在中午的叶水势维持在-73 至-88m，当土壤水分低于 80%田间持水量时，叶水势会随之降低 (Fan et al. 2015)。Martineau et al. (2017) 的研究结果类似，水分状况良好的玉米在中午的叶水势为-82m左右，当玉米经受水分胁迫时，玉米中午的叶水势会降到

-130m左右。此外，O'Toole and Cruz (1980) 研究水稻叶水势对水分胁迫的响应发现，当水稻经受水分胁迫时，其叶水势会降低到-80 至-120m，同时其叶子会发生卷曲，这与玉米对水分胁迫的响应类似。Aston and Lawlor (1979) 揭示了玉米的蒸腾量、根系吸水和叶水势的内在关系，田间试验表明叶水势在白天会维持在较低水平，并且在中午达到谷值。Elfving, D. C. (1972) 开发的基于SPAC系统的水通量模型在橘子树上得到了应用，在该研究中，没有水分胁迫条件下叶水势的谷值大约为-120m，这表明，木本植物的叶水势要比禾本植物的叶水势更低。本研究中，严重的水分胁迫发生在DAS30 至DAS40，模型对叶水势的模拟值处在合理的范围内，这表明该模型可以很好地模拟叶水势。本研究中，水分胁迫系数的计算考虑了根区土壤水分的分布和根系在不同深度的分布，土壤水分胁迫系数能否准确地计算直接影响到根系吸水和根系生长的模拟精度，进而会对土壤水分的变化模拟精度产生影响。反之，土壤水分和根系分布又会对土壤水分胁迫系数的计算产生影响。通过蒸腾量和NEE的对比表明，本研究采用的水分胁迫系数计算方法可以很好地刻画植被对水分胁迫的响应。

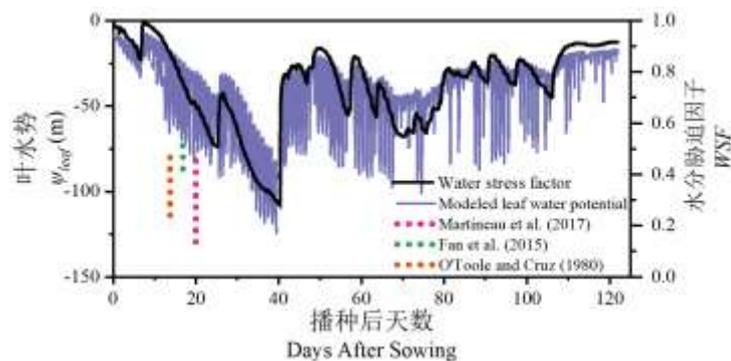


图 3-10 叶水势 ( $\psi_{leaf}$ ) 和水分胁迫 (WSF) 因子的模拟

Fig. 3-10 Simulation of leaf water potential (m) and water stress factor.

根长密度是SPAC系统中计算根系吸水量的一个重要参数。如图 5-14 所示，耦合模型模拟的根长密度在 10-20cm 范围内较高，从 20cm 至根区底部逐渐降低。根长密度模拟值与其他研究的田间观测值相似。研究表明，根长密度主要受土壤水分、土壤容重、农业耕作和土壤肥力的影响 (Amato and Ritchie, 2002; Chassot et al., 2001; Schroder et al., 1996)。由于在本研究中假定土壤性质均一，STEMMUS-SCOPE 只考虑了土壤水分忽略了土壤容重和土壤肥力等对根系生长的影响。Peng et al. (2012) 研究了大田玉米根长密度的时空动态变化，结果表明玉米根长密度的 80% 集中分布在 0-30 cm 的较浅土层中，其峰值约为  $0.86-1.00 \text{ cm cm}^{-3}$ ，这与 Ning et al. (2015) 的研究结果一致。Chassot et al. (2001) 和 Qin et al. (2006) 的研究结果表明，在 Swiss midlands，根长密度的峰值可以达到  $7 \text{ cm cm}^{-3}$ ，远高于其他研究观测到的根长密度峰值。在 Aina and Fapohunda (1986) 的研究中，处于良好土壤水分状况的玉米，其根长密度的峰值为  $2.5 \text{ cm cm}^{-3}$ 。Wiesler and Horst (1994) 观测了德国农田中根系的生长和硝酸盐的利用，结果表明，在 0-30cm 土层中，根长密度为  $2.45-2.80 \text{ cm cm}^{-3}$  并且逐步降低至  $0.01 \text{ cm cm}^{-3}$ 。该结果与 Oikeh et al. (1999) 在 Samaru, Nigeria 的观

测结果类似。Zhuang et al. (2001b) 提出了一个根长密度分布模型，其在日本东京观测的根长密度从表层的  $0.4-0.95 \text{ cm cm}^{-3}$  逐渐降低至根区底部的  $0.1 \text{ cm cm}^{-3}$ 。Zhuang et al. (2001a) 的研究观测到，玉米的根长密度主要分布在  $0-60 \text{ cm}$  深度的土壤中，其峰值大约为  $0.9 \text{ cm cm}^{-3}$ 。这些研究表明，同一种植被在不同地区的根长密度的大小变异性很大，但无论如何，与其他研究的观测值相比，本研究中根长密度的模拟值处在合理范围之内，能够代表真实的根长密度分布。

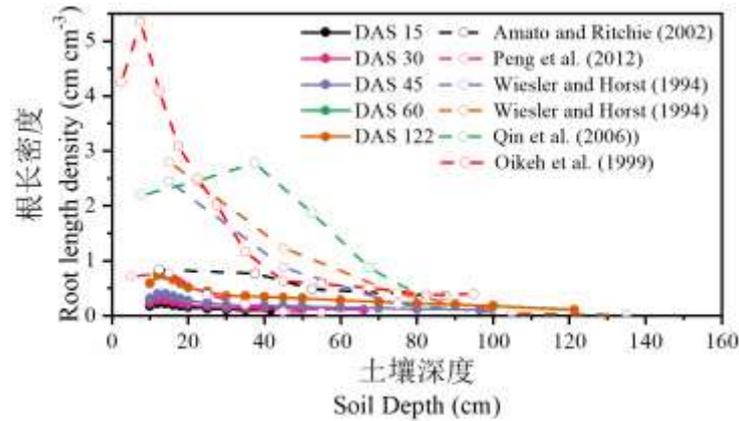


图 3-11 根长密度的模拟

Fig. 3-11 Simulation of root length density ( $\text{m m}^{-3}$ ).

### 3.2.7 STEMMUS-SCOPE 模型的应用

能量-水-碳通量的耦合研究对气候变化条件下生态水分过程的理解至关重要。本研究构建了耦合模型STEMMUS-SCOPE，该模型集成了辐射传输、光合作用、根系生长和土壤水分动态模拟等模块，并且证明了该模型可以作为模拟陆面过程（如：蒸散发和GPP）的有效方法之一。在该耦合模型中，STEMMUS模型可以将模拟的土壤水分数据提供给SCOPE模型用来计算水分胁迫系数，另一方面，SCOPE可以将模拟的土壤表面温度传输给STEMMUS作为其上边界条件。此外，STEMMUS中原来的蒸散发计算模块被SCOPE模型的蒸散发计算模块替换，结果证明，由于耦合模型的辐射传输模块更具机理性，该模型在植物蒸腾和土壤蒸发分离方面得到了一定程度的提高。耦合模型在玉米农田生态系统得到成功应用后，将继续把该模型应用到其他不同类型的生态系统中，以便使该模型得到更好地改进。比如，STEMMUS-SCOPE模型可以和遥感数据（叶绿素荧光SIF数据）进行同化，以使模型参数估计更为准确。此外，该模型还可以用来模拟某一区域甚至全球范围内的陆面过程。例如，基于全球范围内土壤水分的卫星数据、土壤参数数据、气象数据、根区深度数据，该模型可以实现全球范围内水碳通量、植被功能和水分生产力。最后，由于该模型综合考虑了地上和地下过程，其还可以模拟未来气候变化对全球水碳循环的影响，这将有助于提升对于陆面过程的理解和对制定应对气候变化的措施提供帮助。

### 3.3 小结

为了提高对土壤-植物-大气连续体中能量及水碳通量过程的理解，本章基于SPAC系统，集成了光合作用和土壤水热运移模型，构建了耦合模型（STEMMUS\_SCOPE），并在半湿润易旱区的玉米农田对其进行评价。将SCOPE模型和STEMMUS模型进行耦合后，陆面通量的模拟和蒸散发 $ET$ 的分离得到了改进，尤其当植被受水分胁迫时提升尤为明显。通过将STEMMUS\_SCOPE与SCOPE、SCOPE\_SM和STEMMUS进行对比，本章得出了以下结论：耦合模型STEMMUS\_SCOPE可以很好的模拟当植被处于水分胁迫时的能量及水碳通量，同时该模型还可以模拟土壤水热和植被根系的动态变化。然而，该模型还有许多方面需要进一步改进。首先，在灌溉时，土壤温度的上边界条件估计还不够准确，这会显著影响到土壤温度的模拟。其次，土壤呼吸模块也需进一步改进，目前的模型对土壤呼吸的模拟仅考虑了土壤温度而忽视了土壤湿度对土壤呼吸的影响。尽管STEMMUS\_SCOPE尚存一些短板，由于该模型集成了辐射传输、光合作用、根系动态生长及土壤水热运移等模块，可以作为模拟陆面过程（如： $ET$ 和 $GPP$ ）的准确有效的方法之一。

## 第四章 STEMMUS-SCOPE 模型在高植被生态系统的验证

### 4.1 前言

STEMMUS-SCOPE在农田和草地等低矮植被生态系统得到有效验证之后，我们对该模型在高植被（如森林）生态系统进行了进一步的评价。本研究在FLUXNET站点中分别代表不同气候区的3个森林站点，利用PLUMBER2提供的气候数据及站点LAI卫星遥感数据作为驱动，模拟结果与涡度相关系统观测的能量及水碳通量数据进行对比发现，该模型同样适用于高植被生态系统能量及水碳循环的模拟及评估。这为该模型在全球区域的应用奠定了基础，对量化全球能量及水碳循环具有重要意义。

### 4.2 本节研究技术路线图

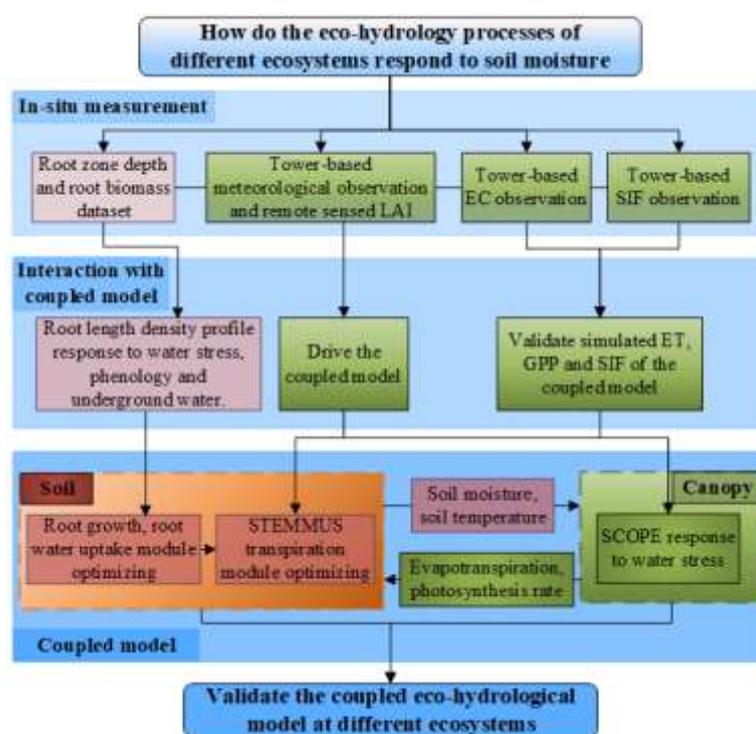
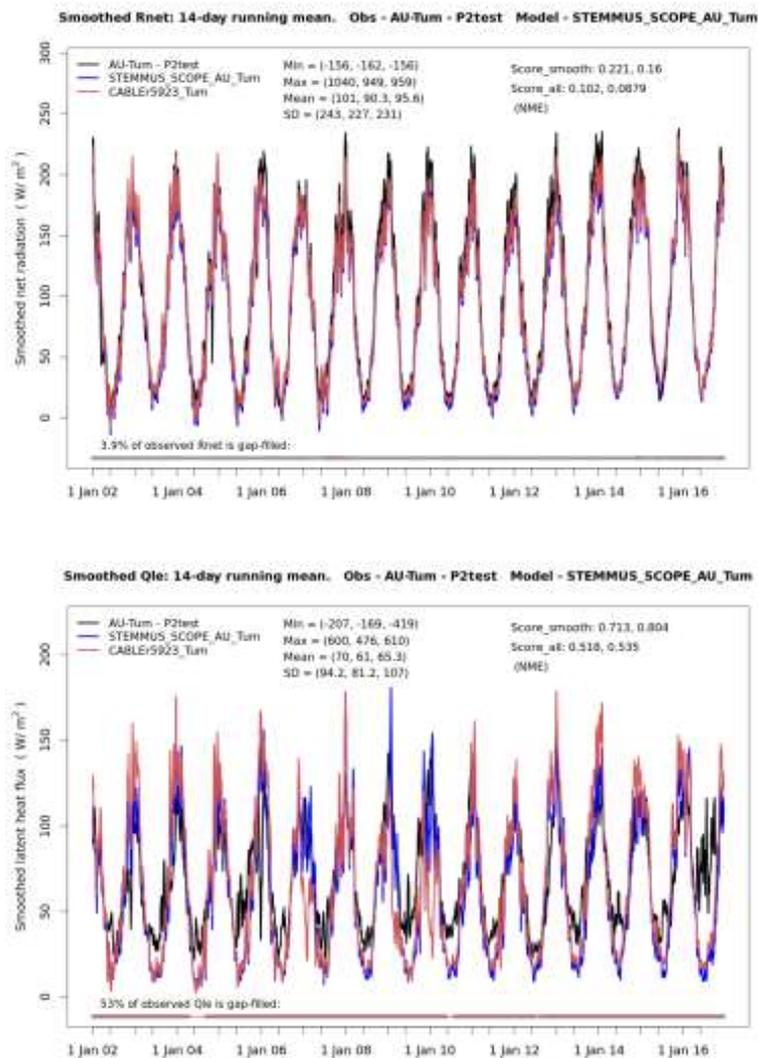


图 4-1 森林站点验证技术路线图

## 4.3 STEMMUS-SCOPE 模型对森林生态系统水碳通量的模拟

### 4.3.1 热带森林生态系统能量及水碳通量的模拟

与农田和草地的模拟结果类似，模型可以高精度模拟  $R_n$ 、 $LE$ 、 $H$  的年际变化， $G$  和  $NEE$  的模拟结果则与观测值有一定的差距，这主要是由于土壤表层温度的模拟的不确定性和土壤呼吸模拟的不确定性。以上结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型在热带森林生态系统具有很好的适用性。



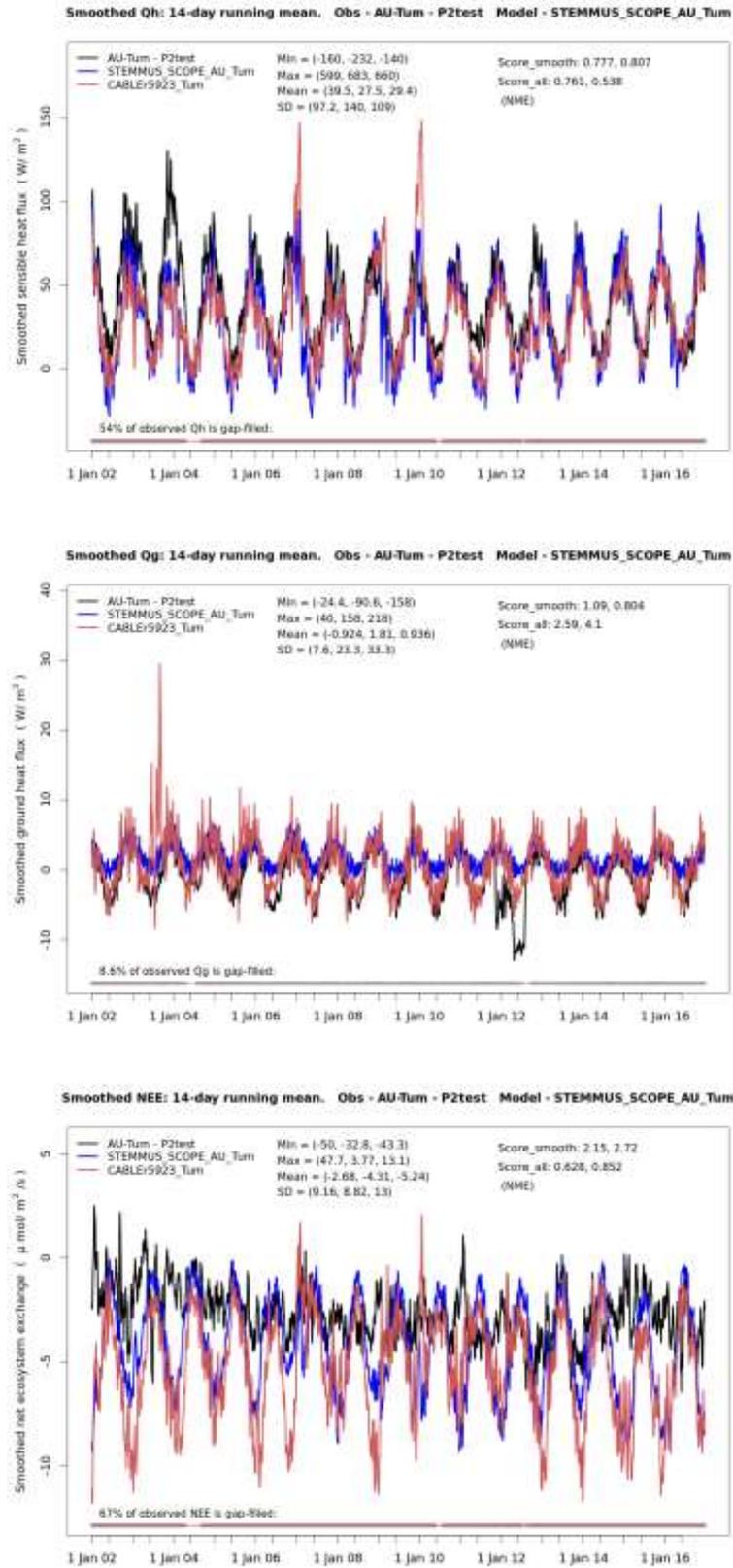
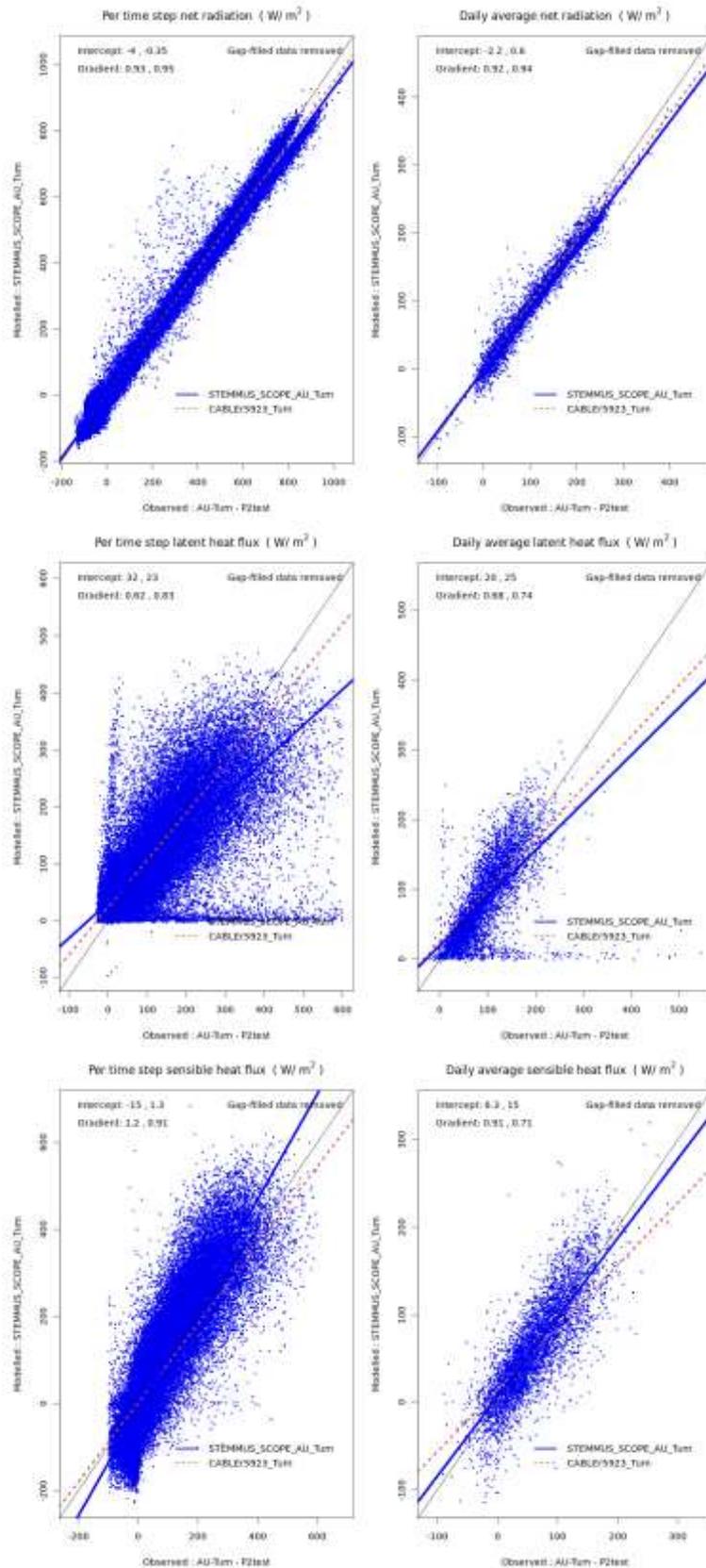


图 4-2 AU-Tum 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换 14 天动态平均

Fig. 4-2 14-day running mean of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat fluxes (G), and net ecosystem carbon exchange (NEE) of AU-Tum site.

与年际变化结果类似，模型可以高精度模拟小时尺度  $R_n$ 、 $LE$ 、 $H$ 、 $G$  和  $NEE$  的模拟结果则与观测值有一定的差距，这主要是由于土壤表层温度的模拟的不确定性和土壤呼吸模拟的不确定性。以上结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型在热带森林生态系统具有很好的适用性。



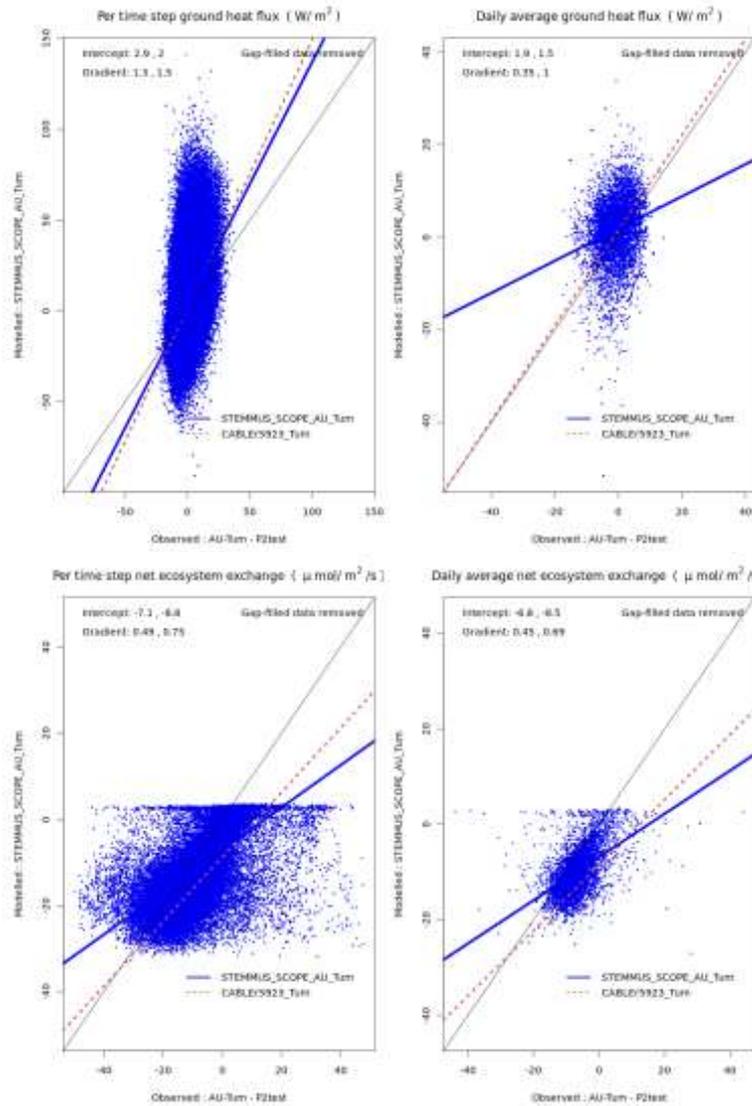
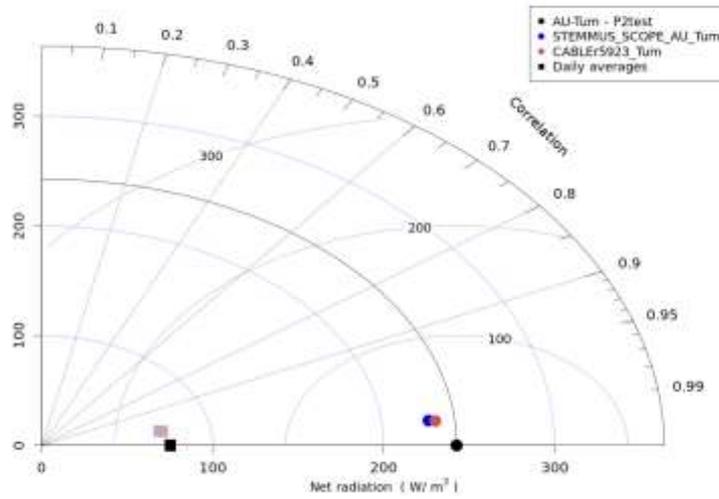


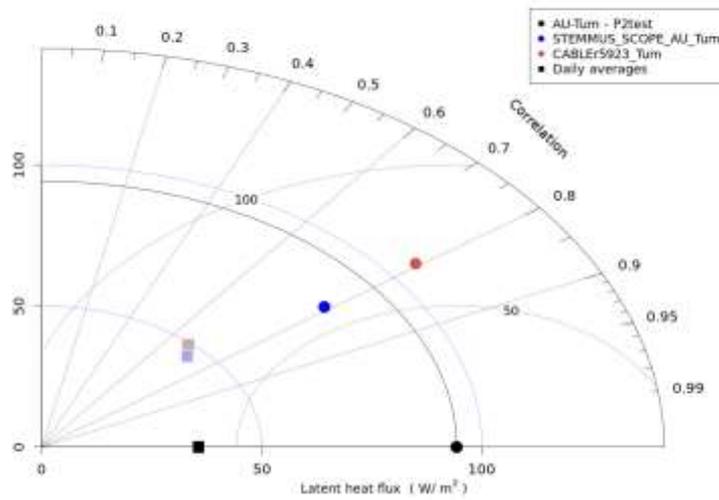
图 4-3 AU-Tum 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换半小时模拟值与观测值  
 Fig. 4-3 Hourly simulation and observation of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat fluxes (G), and net ecosystem carbon exchange (NEE) of AU-Tum site.

泰勒图的结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型和 CABLE 模型都可以准确模拟热带地区森林生态系统的 Rn、LE、H、G 和 NEE 通量。从而证明 STEMMUS-SCOPE 模型在热带森林生态系统具有很好的适用性。

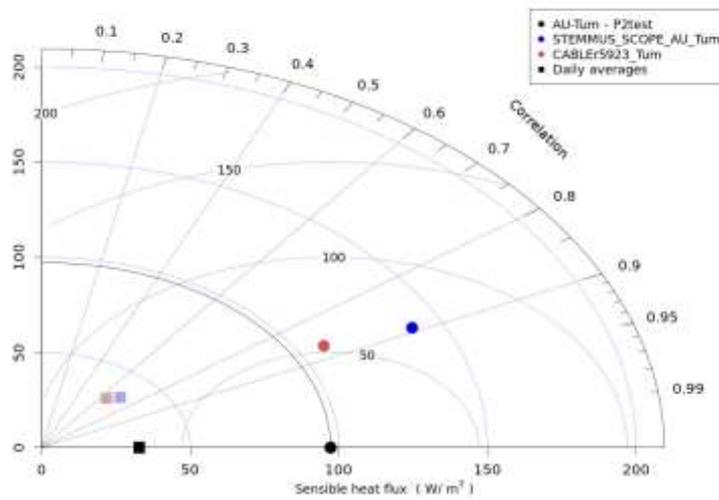
Taylor (subdaily): Obs - AU-Tum - P2test Mod - STEMMUS\_SCOPE\_AU\_Tum



Taylor (subdaily): Obs - AU-Tum - P2test Mod - STEMMUS\_SCOPE\_AU\_Tum



Taylor (subdaily): Obs - AU-Tum - P2test Mod - STEMMUS\_SCOPE\_AU\_Tum



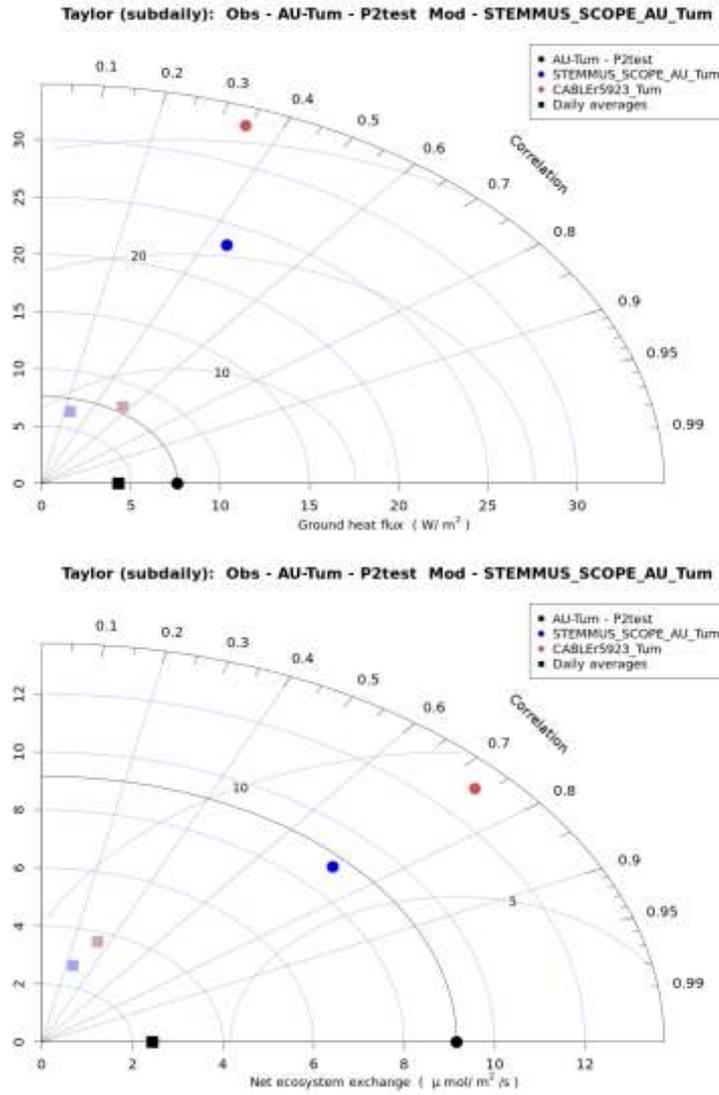


图 4-4 AU-Tum 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换泰勒图

Fig. 4-4 Taylor of net radiation ( $R_n$ ), latent heat ( $LE$ ), sensible heat ( $H$ ), soil heat fluxes ( $G$ ), and net ecosystem carbon exchange ( $NEE$ ) of AU-Tum site.

如表所示，STEMMUS-SCOPE模型与CABLE模型模拟结果比较接近，除了土壤热通量，其他通量的模拟值和实测值的相关系数较高。虽然净辐射模拟的精度比CABLE略低，但也处于较高水平。

**AU-Tum - P2test site metric summary**

Model: STEMMUS\_SCOPE\_AU\_Tum    Benchmarks: [B1]: CABLE5923\_Tum

	Mod Qle	B1	Mod Qh	B1	Mod NEE	B1
Bias (Timeseries)	-8.9	-4.7	-12	-10	-1.6	-2.6
NME (Timeseries)	0.52	0.53	0.76	0.54	0.63	0.85
NME14day (Timeseries)	0.71	0.8	0.78	0.81	2.1	2.7
Correlation (Taylor)	0.79	0.79	0.89	0.87	0.73	0.74
Grad (Scatter)	0.62	0.83	1.2	0.91	0.49	0.75
Int (Scatter)	32	23	-15	1.3	-7.1	-8.8
DailyGrad (Scatter)	0.68	0.74	0.91	0.71	0.45	0.69
DailyInt (Scatter)	20	25	6.3	15	-6.8	-8.5
%Overlap (PDF)	89	77	60	72	67	75
NME (AnnualCycle)	0.49	0.51	0.66	0.55	5.1	6.5
NME (DiurnalCycle)	0.25	0.27	0.62	0.3	0.41	0.65

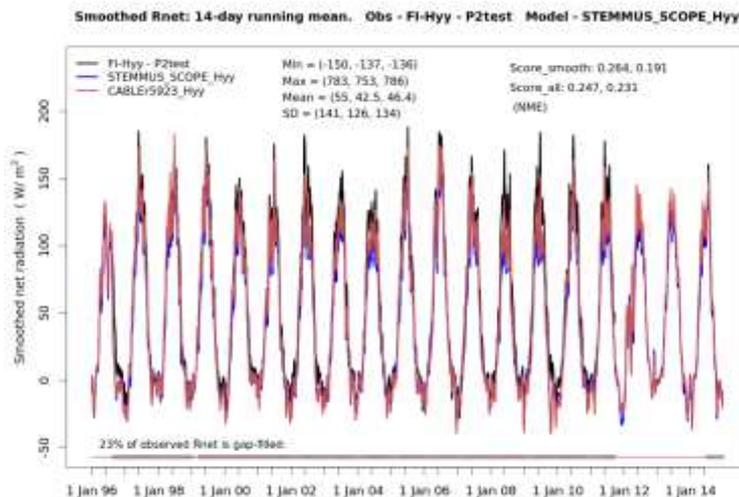
	Mod Rnet	B1	Mod Qg	B1
Bias (Timeseries)	-11	-5.6	2.7	1.9
NME (Timeseries)	0.1	0.088	2.6	4.1
NME14day (Timeseries)	0.22	0.16	1.1	0.8
Correlation (Taylor)	1	1	0.45	0.34
Grad (Scatter)	0.93	0.95	1.3	1.5
Int (Scatter)	-4	-0.35	2.9	2
DailyGrad (Scatter)	0.92	0.94	0.35	1
DailyInt (Scatter)	-2.2	0.6	1.9	1.5
%Overlap (PDF)	97	98	55	33
NME (AnnualCycle)	0.2	0.1	1.1	0.75
NME (DiurnalCycle)	0.059	0.039	2.7	4.6

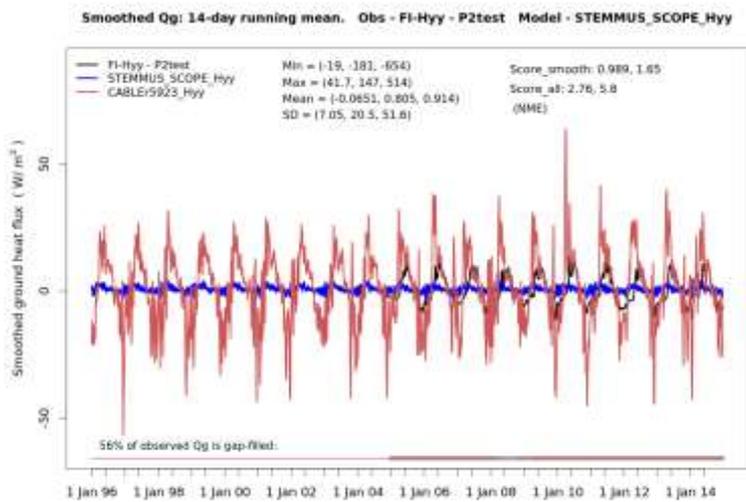
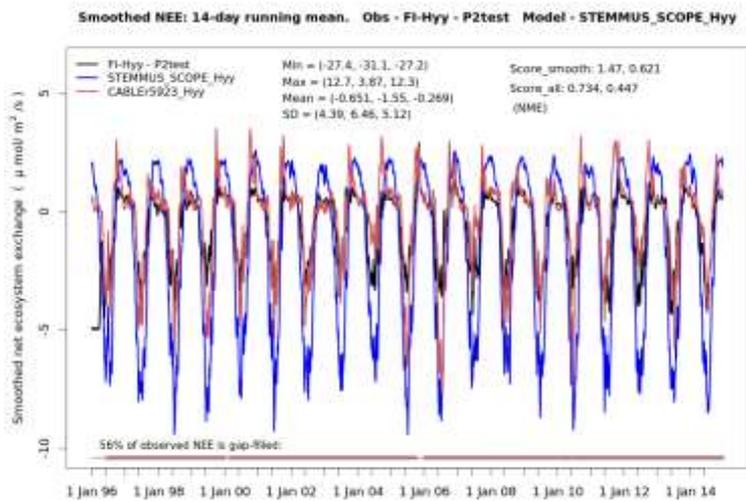
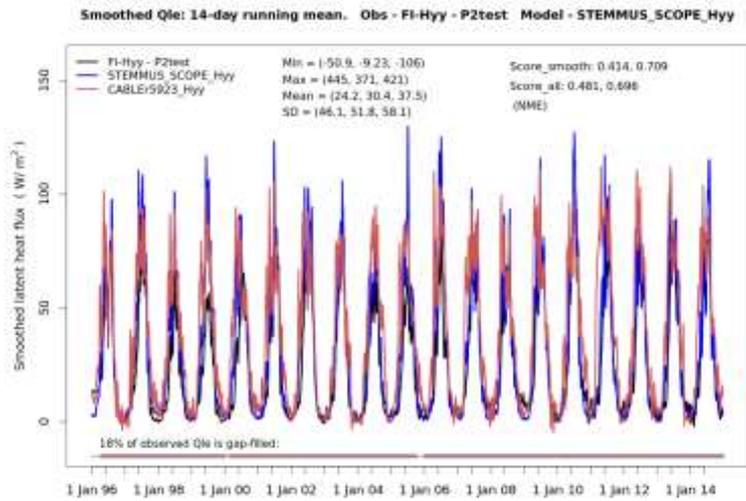
图 4-5 AU-Tum站点评估总表

Fig. 4-5 Metric summary of AU-Tum site.

### 4.3.2 寒带森林生态系统能量及水碳通量的模拟

与热带森林系统的模拟结果类似，模型可以高精度模拟亚寒带森林生态系统  $R_n$ 、 $LE$ 、 $H$  和  $NEE$  的年际变化， $G$  的模拟结果则与观测值有一定的差距，这主要是由于土壤表层温度的模拟存在一定的不确定性。以上结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型在亚寒带森林生态系统具有很好的适用性。





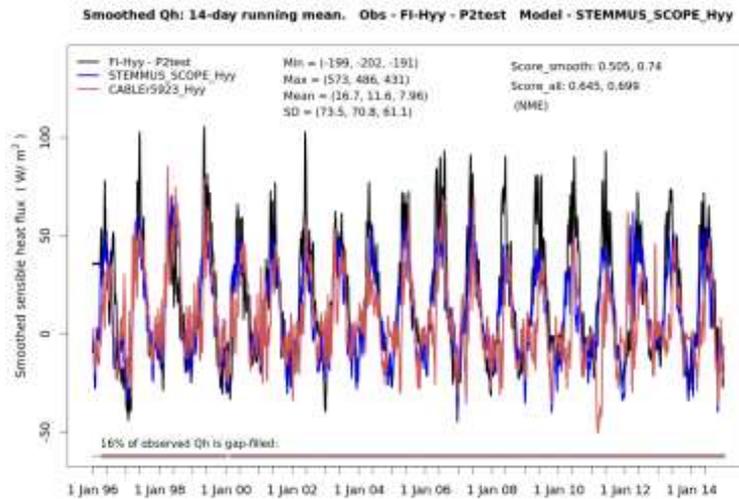
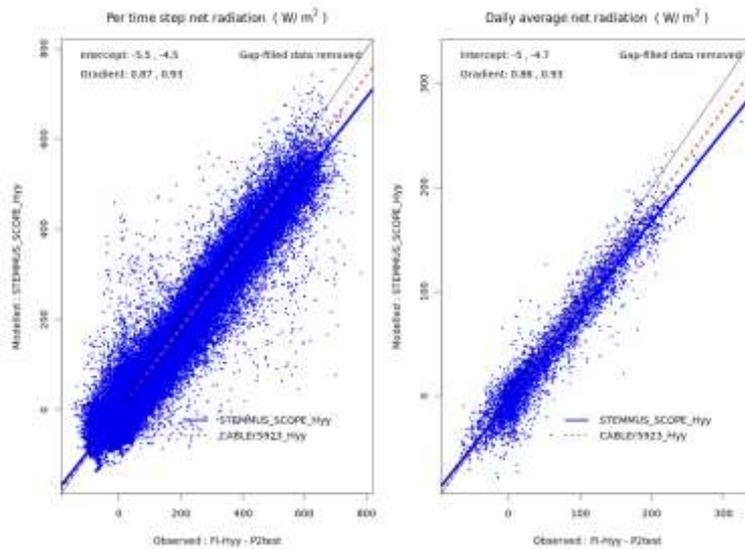


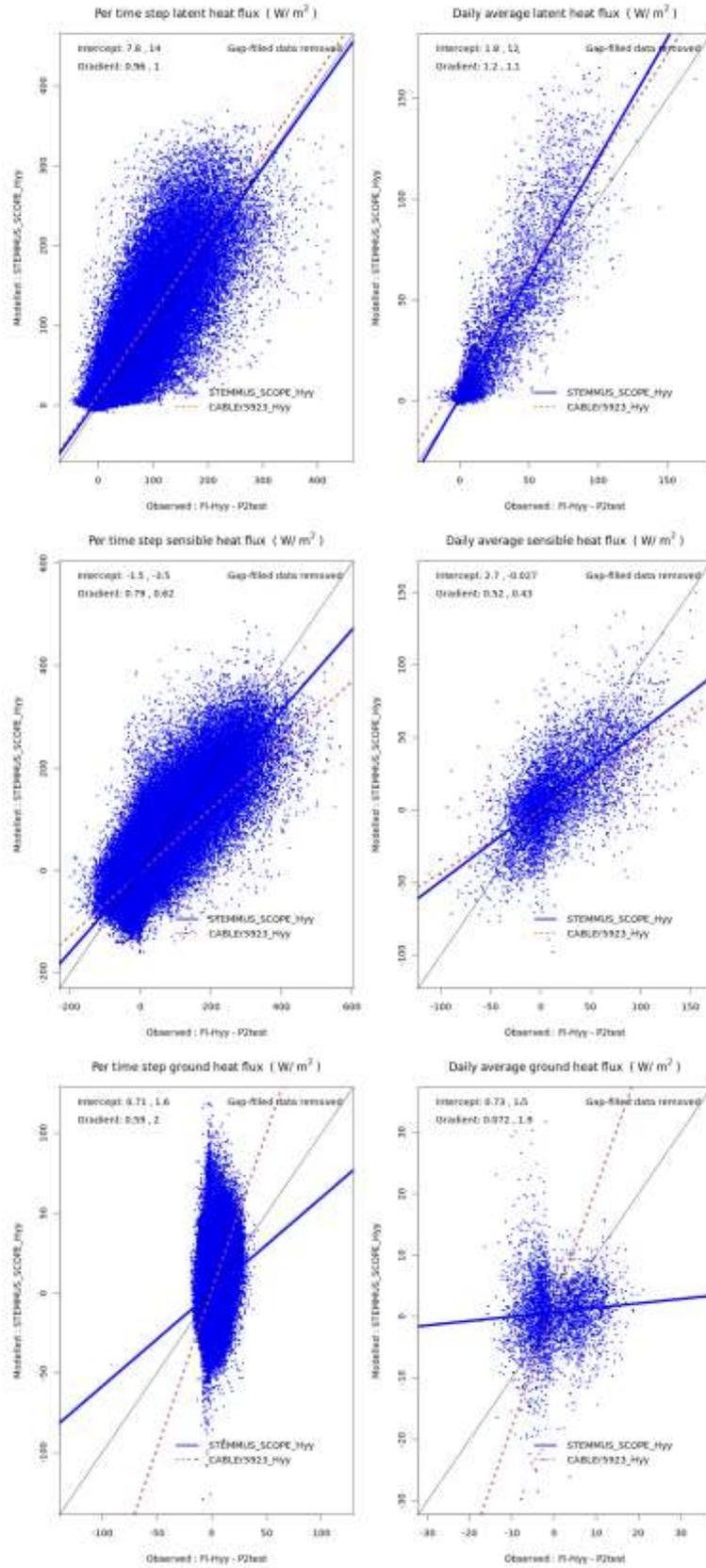
图 4-6 FI-Hyy 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换 14 天动态平均

Fig. 4-6 14-day running mean of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat fluxes (G), and

net ecosystem carbon exchange (NEE) of FI-Hyy site.

与年际变化结果类似，模型可以高精度模拟小时尺度 Rn、LE、H、G 和 NEE 的模拟结果则与观测值有一定的差距，这主要是由于土壤表层温度的模拟的不确定性和土壤呼吸模拟的不确定性。以上结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型在亚寒带森林生态系统具有很好的适用性。





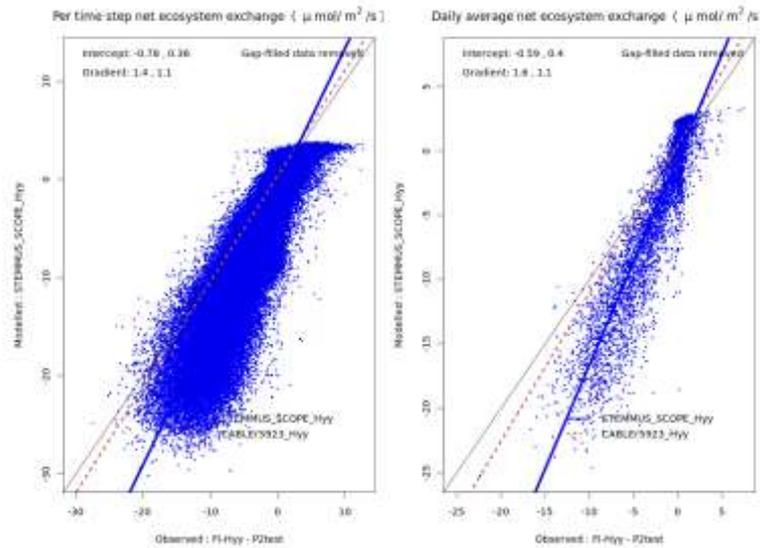
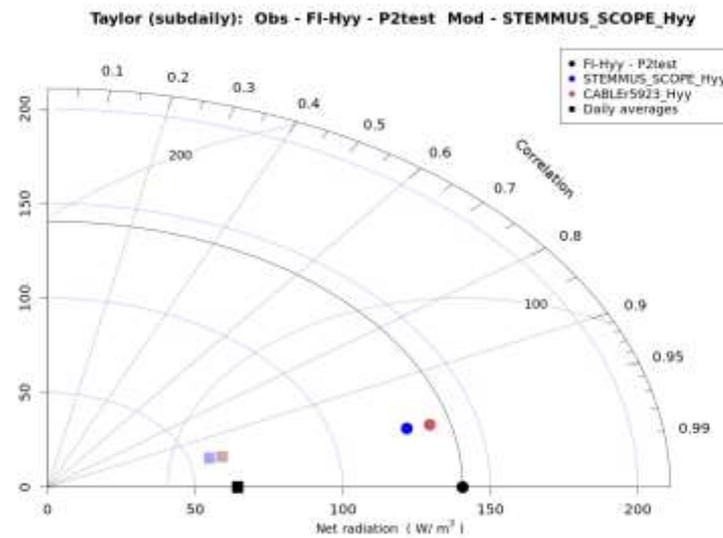
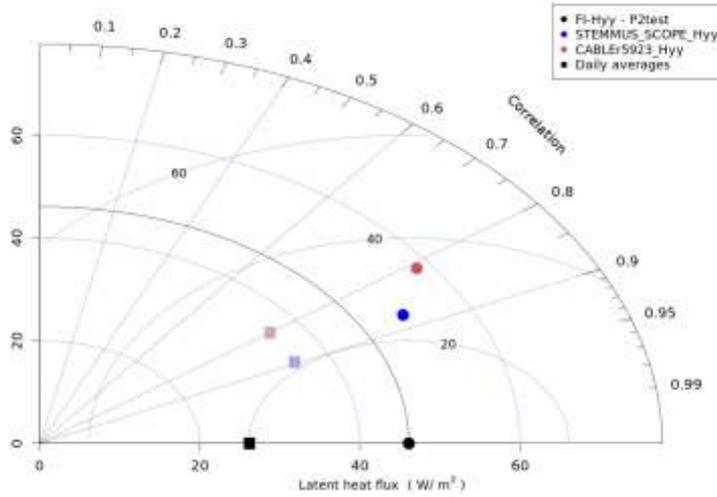


图 4-7 FI-Hyy 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换半小时模拟值与观测值  
 Fig. 4-7 Hourly simulation and observation of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat fluxes (G), and net ecosystem carbon exchange (NEE) of FI-Hyy site.

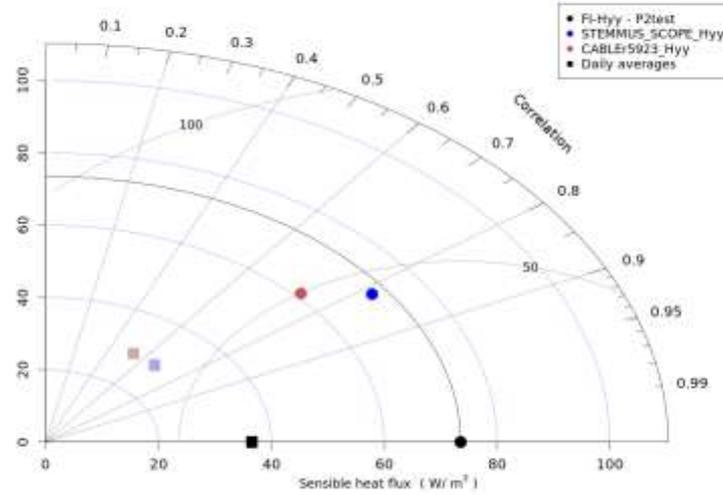
泰勒图的结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型和 CABLE 模型都可以准确模拟热带地区森林生态系统的 Rn、LE、H、G 和 NEE 通量。从而证明 STEMMUS-SCOPE 模型在亚寒带森林生态系统具有很好的适用性。



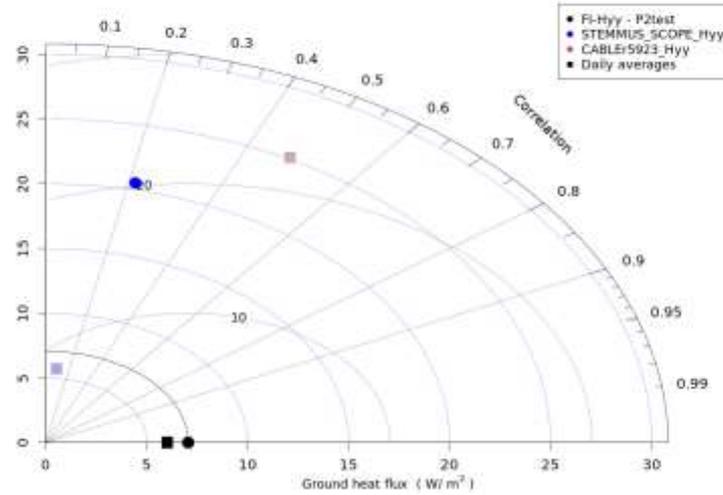
Taylor (subdaily): Obs - FI-Hyy - P2test Mod - STEMMUS\_SCOPE\_Hyy



Taylor (subdaily): Obs - FI-Hyy - P2test Mod - STEMMUS\_SCOPE\_Hyy



Taylor (subdaily): Obs - FI-Hyy - P2test Mod - STEMMUS\_SCOPE\_Hyy



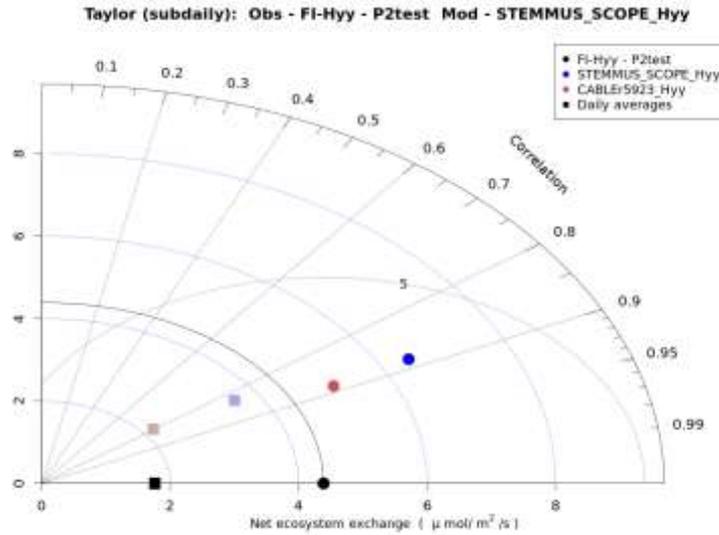


图 4-8 FI-Hyy 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换泰勒图

Fig. 4-8 Taylor of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat fluxes (G), and net ecosystem carbon exchange (NEE) of FI-Hyy site.

如表所示，STEMMUS在潜热、显热和土壤热通量的模拟精度较高，NEE和净辐射的模拟精度稍低于CABLE模型。

**FI-Hyy - P2test site metric summary**

Model: STEMMUS\_SCOPE\_Hyy Benchmarks: [B1]: CABLE5923\_Hyy

	Mod Qle	B1	Mod Qh	B1	Mod NEE	B1
Bias (Timeseries)	6.1	13	-5.3	-8.7	-0.9	0.38
NME (Timeseries)	0.48	0.7	0.65	0.7	0.73	0.45
NME14day (Timeseries)	0.41	0.71	0.5	0.74	1.5	0.62
Correlation (Taylor)	0.88	0.81	0.82	0.74	0.88	0.89
Grad (Scatter)	0.96	1	0.79	0.62	1.4	1.1
Int (Scatter)	7.8	14	-1.5	-3.5	-0.78	0.36
DailyGrad (Scatter)	1.2	1.1	0.52	0.43	1.6	1.1
DailyInt (Scatter)	1.8	12	2.7	-0.027	-0.59	0.4
%Overlap (PDF)	85	79	80	82	55	83
NME (AnnualCycle)	0.34	0.66	0.26	0.61	1.6	0.47
NME (DiurnalCycle)	0.27	0.5	0.25	0.36	0.74	0.29

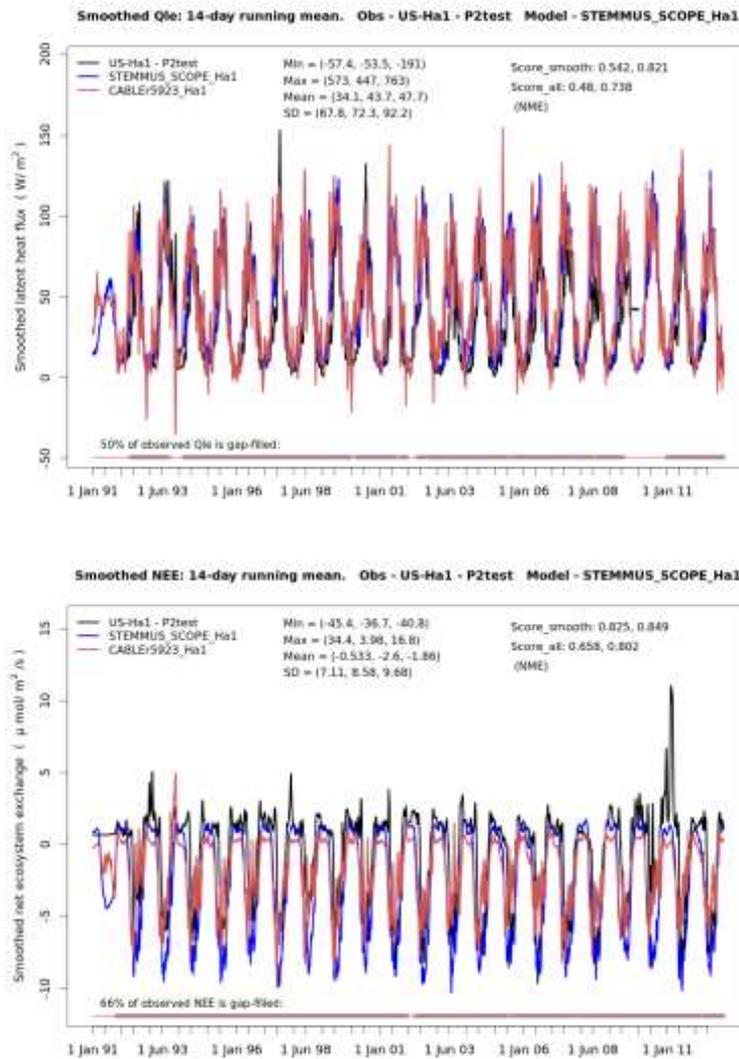
	Mod Rnet	B1	Mod Qg	B1
Bias (Timeseries)	-13	-8.6	0.78	1.3
NME (Timeseries)	0.25	0.23	2.8	5.8
NME14day (Timeseries)	0.26	0.19	0.99	1.7
Correlation (Taylor)	0.97	0.97	0.22	0.29
Grad (Scatter)	0.87	0.93	0.59	2
Int (Scatter)	-5.5	-4.5	0.71	1.6
DailyGrad (Scatter)	0.86	0.93	0.072	1.9
DailyInt (Scatter)	-5	-4.7	0.73	1.5
%Overlap (PDF)	91	92	58	36
NME (AnnualCycle)	0.25	0.17	1	1.4
NME (DiurnalCycle)	0.13	0.089	2.7	5

图 4-9 FI-Hyy站点评估总表

Fig. 4-9 Metric summary of FI-Hyy site.

### 4.3.3 温带森林生态系统能量及水碳通量的模拟

与热带和亚寒带森林系统的模拟结果类似，模型可以高精度模拟亚寒带森林生态系统  $R_n$ 、 $LE$ 、 $H$  的年际变化， $NEE$  模拟值与实测值则存在一定的差距，但  $STEMMUS-SCOPE$  的模拟值与  $CABLE$  模型的而模拟值较为接近。由于该站点的  $G$  的观测值缺失，无法评估模型在该站点对  $G$  的模拟精度。以上结果表明， $STEMMUS-SCOPE$  模型在亚寒带森林生态系统具有很好的适用性。



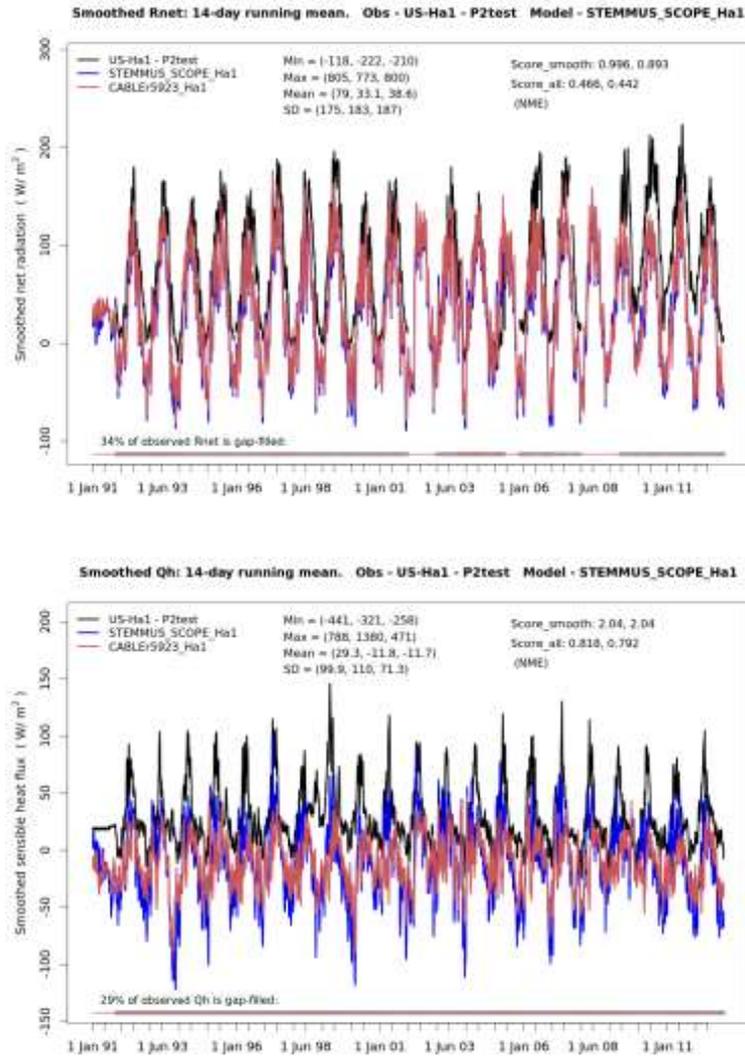
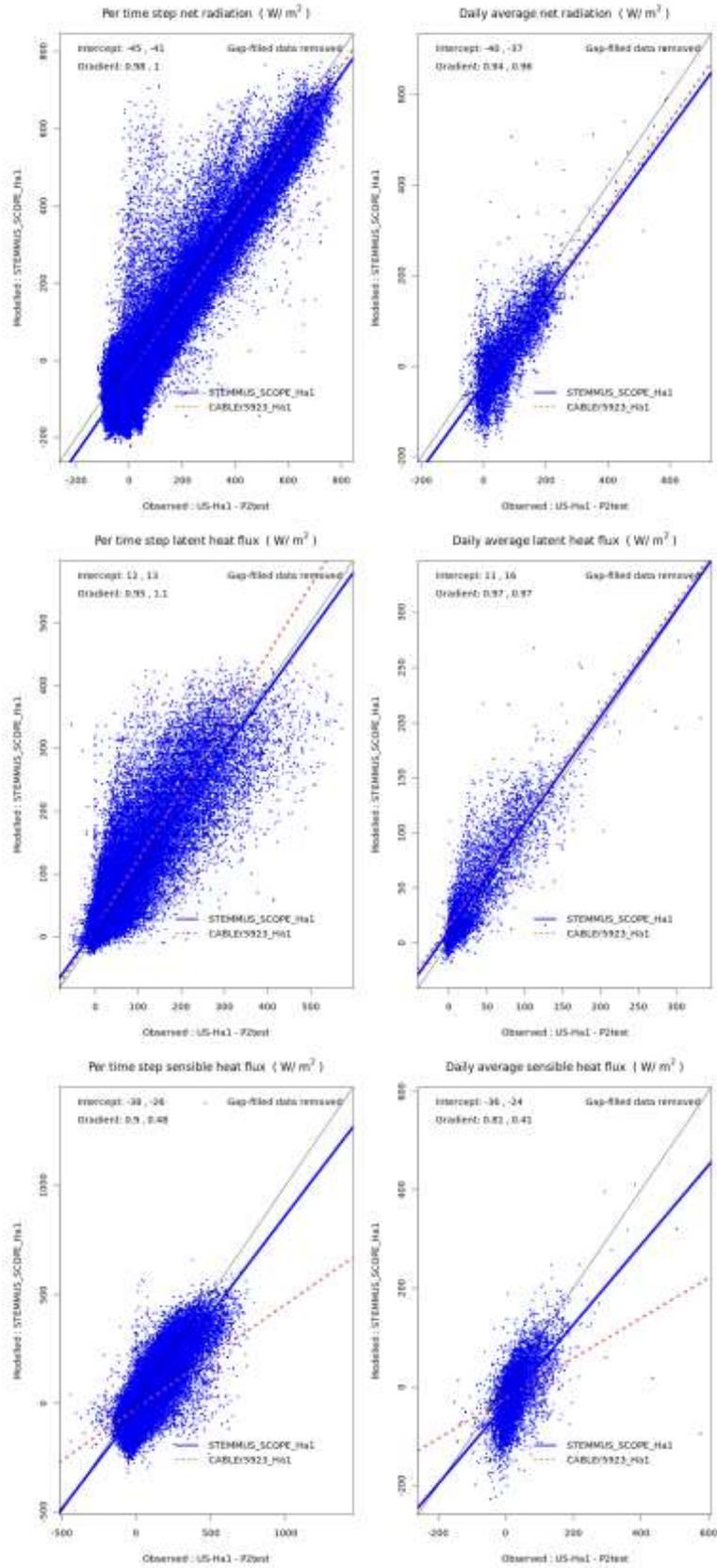


图 4-10 US-Ha1 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换 14 天动态平均

Fig. 4-10 14-day running mean of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat fluxes (G), and net ecosystem carbon exchange (NEE) of US-Ha1 site.

与年际变化结果类似，模型可以高精度模拟小时尺度 Rn、LE、H 和 NEE，其中 NEE 的模拟结果则与观测值有一定的差距，这主要是由于土壤表层温度的模拟的不确定性和土壤呼吸模拟的不确定性。以上结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型在亚寒带森林生态系统具有很好的适用性。



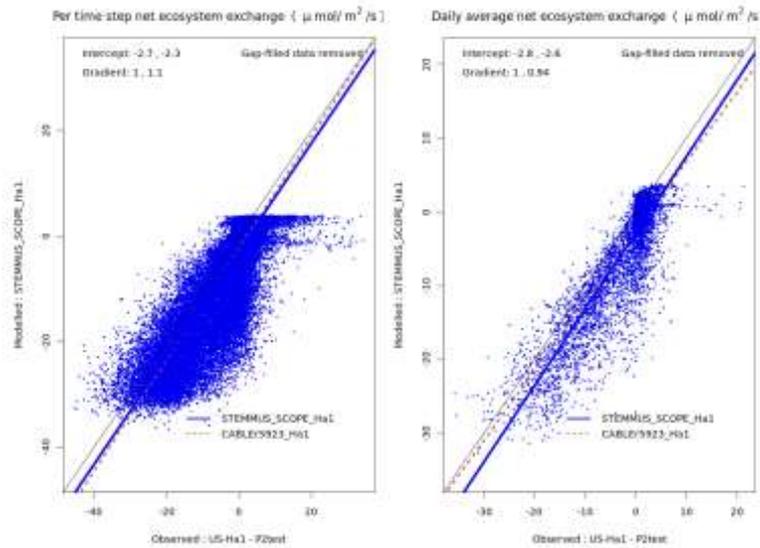
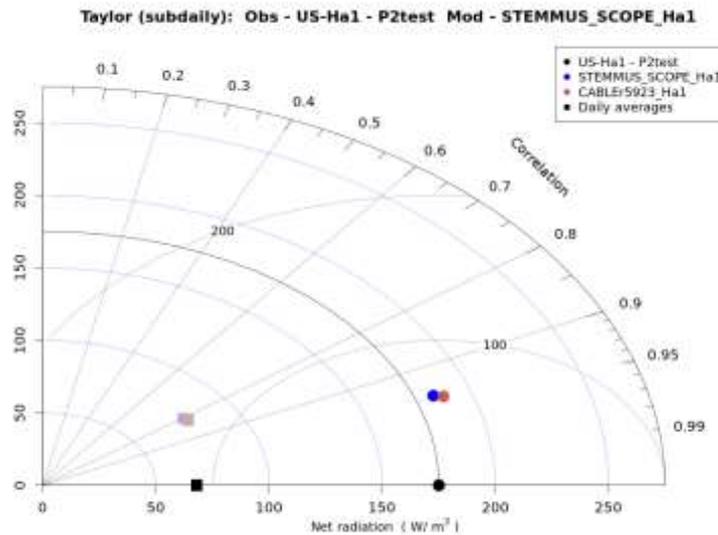


图 4-11 US-Ha1 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换半小时模拟值与观测值  
 Fig. 4-11 Hourly simulation and observation of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat

fluxes (G), and net ecosystem carbon exchange (NEE) of US-Ha1 site.

泰勒图的结果表明，STEMMUS-SCOPE 模型和 CABLE 模型都可以准确模拟热带地区森林生态系统的 Rn、LE、H、和 NEE 通量。从而证明 STEMMUS-SCOPE 模型在温带森林生态系统具有很好的适用性。



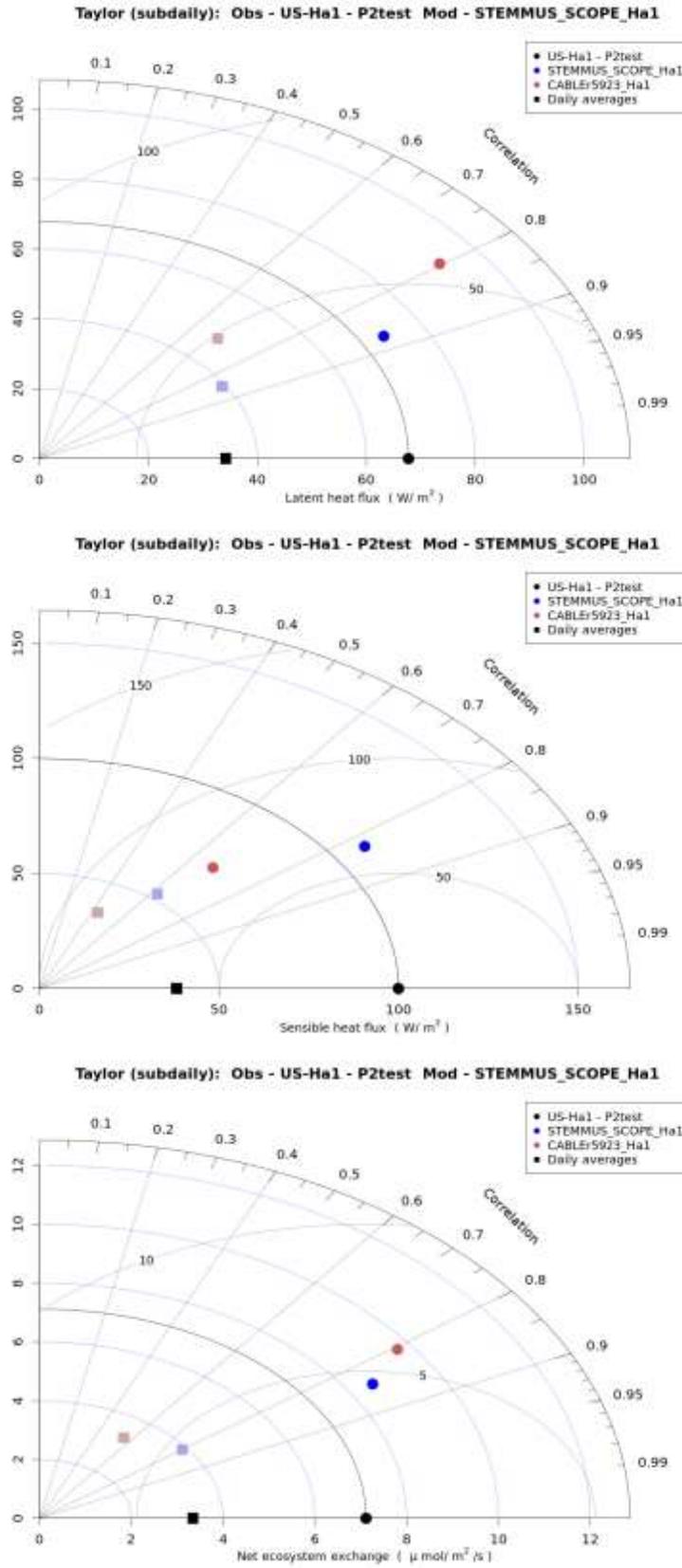


图 4-12 US-Ha1 站点净辐射、潜热、显热、土壤热通量、净生态系统碳交换泰勒图  
 Fig. 4-12 Taylor of net radiation (Rn), latent heat (LE), sensible heat (H), soil heat fluxes (G), and net ecosystem carbon exchange (NEE) of US-Ha1 site.

如表所示，STEMMUS-SCOPE模型除了净辐射的模拟精度稍低于CABLE外，其他通量的模拟精度均较好于CABLE模型。

**US-Ha1 - P2test site metric summary**

Model: STEMMUS\_SCOPE\_Ha1    Benchmarks: [B1]: CABLEr5923\_Ha1

	Mod Qle	B1	Mod Qh	B1	Mod NEE	B1
Bias (Timeseries)	9.6	14	-41	-41	-2.1	-1.3
NME (Timeseries)	0.48	0.74	0.82	0.79	0.66	0.8
NME14day (Timeseries)	0.54	0.82	2	2	0.82	0.85
Correlation (Taylor)	0.87	0.8	0.83	0.68	0.85	0.81
Grad (Scatter)	0.95	1.1	0.9	0.48	1	1.1
Int (Scatter)	12	13	-38	-26	-2.7	-2.3
DailyGrad (Scatter)	0.97	0.97	0.81	0.41	1	0.94
DailyInt (Scatter)	11	16	-36	-24	-2.8	-2.6
%Overlap (PDF)	74	74	60	71	64	71
NME (AnnualCycle)	0.42	0.61	2.3	2.3	0.84	0.77
NME (DiurnalCycle)	0.26	0.45	0.63	0.63	0.55	0.64

	Mod Rnet	B1
Bias (Timeseries)	-46	-41
NME (Timeseries)	0.47	0.44
NME14day (Timeseries)	1	0.89
Correlation (Taylor)	0.94	0.94
Grad (Scatter)	0.98	1
Int (Scatter)	-45	-41
DailyGrad (Scatter)	0.94	0.96
DailyInt (Scatter)	-40	-37
%Overlap (PDF)	67	67
NME (AnnualCycle)	1	0.93
NME (DiurnalCycle)	0.37	0.33

图 4-13 US-Ha1 站点评估总表

Fig. 5-13 Metric summary of US-Ha1 site.

## 第五章 结论

### 5.1 主要研究成果

关中平原是我国西北地区重要的粮食产区之一，面对日益短缺的淡水资源和生态环境的逐渐恶化，如何合理利用淡水资源，优化水资源配置，提高水分利用效率是该地区亟待解决的问题之一。围绕水资源高效利用这一中心思想，本研究开展了以陆面过程、生态水文过程的观测为基础，研究了该地区典型的冬小麦夏玉米农田的陆面过程及生态水文过程机理，构建了适用于该类型农田生态系统的生态水文模型，本研究旨在揭示该地区冬小麦夏玉米农田的耗水规律，构建基于土壤-植物-大气连续体的生态水文模型，为该地区水资源优化配置及农业的可持续发展提供理论依据。本文选取了位于陕西杨凌的冬小麦夏玉米农田作为研究区域，开展了农田生态系统的能量及水碳通量的观测。在通量数据的基础上，分析了该农田能量及水碳通量的季节与年际变化特征以及对环境及生物因子的响应机制。在机理分析的基础上，构建了生态水文模型，对该农田生态系统能量及水碳通量进行模拟，并以实测数据进行验证。论文的主要研究成果主要包括以下三个部分：

#### 5.1.1 构建冬小麦夏玉米农田水碳通量模拟模型

在田间尺度上，以土壤-植物-大气连续体（SPAC）系统为基础，构建了 SCOPE 和 STEMMUS 模型的耦合模型 STEMMUS-SCOPE。并对原模型的根系生长模块、根系吸水模块进行改进，提出了适用于该地区农田生态系统的生态水文模型。

（1）在没有实测土壤水分条件下，耦合模型 STEMMUS-SCOPE 可以提高对水分胁迫条件下农田生态系统水通量的模拟精度，尤其在分别模拟植物蒸腾和土壤蒸发方面比耦合前模型更为准确。

（2）耦合模型对 NEE 的模拟精度得到了显著提高，但其模拟精度与水通量模拟精度相比稍低，其误差主要是由于未考虑土壤湿度对土壤呼吸的影响，因此土壤呼吸的模拟还需进一步改进。

#### 5.1.2 生态水文模型在森林生态系统的验证

根据 PLUMBER2 提供的站点驱动和验证数据，将 STEMMUS-SCOPE 模型在热点、温带、亚寒带森林生态系统进行了合理验证，结果表明，该模型在以上所述生态系统表现较好，为全球陆地水碳循环的定量化提供技术支撑。

## 5.2 本研究创新点

本研究以不同水分胁迫条件的田间试验为依托，将田间试验与模型模拟相结合，探讨水分胁迫对 SIF 发射机制、SIF-GPP 关联机制的影响，建立基于植物水力性状的 SIF 前向模型，为进一步实现将 SIF 遥感信息与 SIF 模拟模型同化，进行农田干旱监测和预报提供参考依据。本项目的创新点具体体现在以下几个方面

(1) 在生态水分过程机理研究的基础上，基于 SPAC 系统构建了适用于该类型生态系统陆面过程模型，实现了对 SCOPE 模型和 STEMMUS 模型的耦合，提出了 STEMMUS-SCOPE 模型，并利用观测站实测数据对耦合模型进行了合理的验证，为该地区水资源的合理利用提供科学依据。

(2) 在农田和草地的验证的基础上，将模型在不同气候区森林生态系统进行验证，为全球陆地水碳循环的定量化打下基础。

(3) 基于植物水力性状的 SIF 前向模型的构建涉及植物生理学、生态学、土壤学和遥感信息学等多个学科的交叉融合，如何将田间观测的研究结果参数化，用于改进当前模型中简化的植被水力模块是课题的核心内容和难点问题。本项目拟在各个过程系统研究的基础上，探讨植物水力性状对 SIF 发射机制的影响，明确水力传输路径并对其参数化，提出适用于旱区的 SIF 前向模型。

## 5.3 本研究不足与展望

本研究基于涡度相关技术，对关中平原典型农田生态系统能量及水碳通量进行观测分析，基本揭示了该类型农田生态系统能量及水碳通量在不同时间尺度上的变化特征及影响因素。取得了一定的成果，但仍然存在一些不足需要在后边的研究中加以改善。

(1) 本研究中缺少了土壤呼吸的连续观测，因此无法对 STEMMUS-SCOPE 模型对土壤呼吸的模拟进行合理验证；此外，本研究对土壤水分的土壤温度的监测局限于浅层土壤，缺乏更深层土壤水分和土壤温度的监测；最后，也会对叶绿素荧光进行观测，用以验证 STEMMUS-SCOPE 对叶绿素荧光的模拟。

(2) 本研究仅在夏玉米农田生态系统对 STEMMUS-SCOPE 模型进行了验证，该模型在其他类型陆地生态系统或在大尺度模拟的表现还没有得到评价。在此后的研究中将围绕这一问题展开。

(3) 进行 STEMMUS-SCOPE 模型与遥感数据的同化研究。利用生态水文模型对区域以及全球尺度水碳循环的模拟需要空间信息作为基础，而卫星遥感技术是获取空间信息的主要手段之一。本研究只建立了基于过程的生态水文模型并在单点尺度上进行了验证，由于点尺度观测具有一定的不确定性，当利用该模型进行区域尺度的模拟时，数据同化能够

减小模型输出的不确定性。与其他模型不同的是，由于 STEMMUS-SCOPE 模型中可以模拟叶绿素荧光，相关遥感反演的叶绿素荧光数据可以用来与该模型进行数据同化，进一步减小光合作用模拟的不确定性。

## 参考文献

- [1] Ambavaram, M. M., Basu, S., Krishnan, A., *et al.* 2014. Coordinated regulation of photosynthesis in rice increases yield and tolerance to environmental stress. *Nature communications*, 5(1), 1-14.
- [2] Bayat, B., Van der Tol, C., Verhoef, W. *et al.* 2018. Integrating satellite optical and thermal infrared observations for improving daily ecosystem functioning estimations during a drought episode. *Remote sensing of environment*, 209, 375-394.
- [3] Bayat, B., Van der Tol, C., Yang, P., *et al.* 2019. Extending the SCOPE model to combine optical reflectance and soil moisture observations for remote sensing of ecosystem functioning under water stress conditions. *Remote sensing of environment*, 221, 286-301.
- [4] Beaudoin, N., Mary, B., Launay, M., Brisson, N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. *Quae*.
- [5] Breshears, D. D., Cobb, N. S., Rich, P. M., *et al.* 2005. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(42), 15144-15148.
- [6] Chaves, M. M., Flexas, J., Pinheiro, C. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, 103(4), 551-560.
- [7] Chassot, A., Stamp, P., Richner, W., 2001. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. *Plant and Soil* 231, 123-135, <https://doi.org/10.1023/A:1010335229111>.
- [8] Damm, A., Roethlin, S., Fritsche, L. 2018. Towards advanced retrievals of plant transpiration using sun-induced chlorophyll fluorescence: First considerations. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5983-5986.
- [9] De Kauwe, M. G., Zhou, S. X., Medlyn, B. E., *et al.* 2015. Do land surface models need to include differential plant species responses to drought? Examining model predictions across a mesic-xeric gradient in Europe. *Biogeosciences*, 12(24), 7503-7518.
- [10] De Kauwe, M. G., Medlyn, B. E., Ukkola, A. M., *et al.* 2020. Identifying areas at risk of drought-induced tree mortality across South-Eastern Australia. *Global Change Biology*, 26(10), 5716-5733.
- [11] Du, S. S., Liu, L.Y., Liu, X. J., *et al.* 2018. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite. *Science Bulletin*, 63(22), 1502-1512.
- [12] Elfving, D. C., KAUFMANN, M. R., & HALL, A. E. 1972. Interpreting leaf water potential measurements with a model of the soil - plant - atmosphere continuum. *Physiologia plantarum*, 27(2), 161-168, <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1972.tb03594.x>.
- [13] Fan, X., Hu, H., Huang, G., Huang, F., Li, Y., Palta, J. 2015. Soil inoculation with *Burkholderia* sp. LD-11 has positive effect on water-use efficiency in inbred lines of maize. *Plant and Soil* 390, 337-349, <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2410-z>.
- [14] Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* 149, 78-90, <https://doi.org/10.1007/bf00386231>.

- [15] Galmés, J., Medrano, H., Flexas, J. 2007. Photosynthetic limitations in response to water stress and recovery in Mediterranean plants with different growth forms. *New phytologist*, 175(1), 81-93.
- [16] Jonard, F., De Cannière, S., Brüggemann, N., *et al.* 2020. Value of sun-induced chlorophyll fluorescence for quantifying hydrological states and fluxes: current status and challenges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108088.
- [17] Kebbas, S., Lutts, S., Aid, F. 2015. Effect of drought stress on the photosynthesis of *Acacia tortilis* subsp. *raddiana* at the young seedling stage. *Photosynthetica*, 53(2), 288-298.
- [18] Kennedy, D., Swenson, S., Oleson, K. W., *et al.* 2019. Implementing plant hydraulics in the community land model, version 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(2), 485-513.
- [19] Klepper, B., Rickman, R.W., Taylor, H.M. 1983. Farm management and the function of field crop root systems. *Agricultural Water Management* 7, 115–141, [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(83\)90078-1](https://doi.org/10.1016/0378-3774(83)90078-1).
- [20] Köhler, P., Guanter, L., Kobayashi, H., *et al.* 2018. Assessing the potential of sun-induced fluorescence and the canopy scattering coefficient to track large-scale vegetation dynamics in Amazon forests. *Remote Sensing of Environment*, 204, 769-785.
- [21] Lee, J. E., Berry, J. A., Van der Tol, C., *et al.* 2015. Simulations of chlorophyll fluorescence incorporated into the Community Land Model version 4. *Global change biology*, 21(9), 3469-3477.
- [22] Li, S. W., Pezeshki, S. R., Goodwin, S. 2004. Effects of soil moisture regimes on photosynthesis and growth in cattail (*Typha latifolia*). *Acta Oecologica*, 25(1-2), 17-22.
- [23] Liu, L. B., Gudmundsson, L., Hauser, M., *et al.* 2020. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. *Nature communications*, 11(1), 1-9.
- [24] Liu, L. Y., Liu, X. J., Hu, J. C., *et al.* 2017. Assessing the wavelength-dependent ability of solar-induced chlorophyll fluorescence to estimate the GPP of winter wheat at the canopy level. *International Journal of Remote Sensing*, 38(15), 4396-4417.
- [25] Liu, L. Z., Yang, X., Zhou, H. K.Z, *et al.* 2018. Relationship of root zone soil moisture with solar-induced chlorophyll fluorescence and vegetation indices in winter wheat: A comparative study based on continuous ground-measurements. *Ecological Indicators*, 90, 9-17.
- [26] Man, J. G., Yu, Z. W., Shi, Y. 2017. Radiation interception, chlorophyll fluorescence and senescence of flag leaves in winter wheat under supplemental irrigation. *Scientific reports*, 7(1), 1-13.
- [27] Martineau, E., Domec, J.-C., Bosc, A., Denoroy, P., Fandino, V.r.A., Lavres Jr, J., Jordan-Meille, L. 2017. The effects of potassium nutrition on water use in field-grown maize (*Zea mays* L.). *Environmental and experimental botany* 134, 62-71, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.004>.
- [28] McDowell, N.G., Brodribb, T.J., Nardini, A. 2019. Hydraulics in the 21st century. *New Phytologist*, 224(2), 537-542.

- [29] Meroni, M., Rossini, M., Guanter, L., *et al.* 2009. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2037-2051.
- [30] Mohammed, G. H., Colombo, R., Middleton, E. M., *et al.* 2019. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote sensing of environment*, 231, 111177.
- [31] Niu, G. Y., Fang, Y. H., Chang, L. L., *et al.* 2020. Enhancing the Noah-MP ecosystem response to droughts with an explicit representation of plant water storage supplied by dynamic root water uptake. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11), e2020MS002062.
- [32] Norton, A. J., Rayner, P. J., Koffi, E. N., *et al.* 2018. Assimilating solar-induced chlorophyll fluorescence into the terrestrial biosphere model BETHY-SCOPE v1. 0: model description and information content. *Geoscientific Model Development*, 11(4), 1517-1536.
- [33] Ning, P., Li, S., White, P.J., Li, C. 2015. Maize varieties released in different eras have similar root length density distributions in the soil, which are negatively correlated with local concentrations of soil mineral nitrogen. *PLOS one* 10, e0121892, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121892>.
- [34] O'Toole, J.C., Cruz, R.T. 1980. Response of leaf water potential, stomatal resistance, and leaf rolling to water stress. *Plant physiology* 65, 428-432, <https://doi.org/10.1104/pp.65.3.428>.
- [35] Oikeh, S., Kling, J., Horst, W., Chude, V., Carsky, R. 1999. Growth and distribution of maize roots under nitrogen fertilization in plinthite soil. *Field crops research* 62, 1-13, [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(98\)00169-5](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(98)00169-5).
- [36] Pettigrew, W. T. 2004. Physiological consequences of moisture deficit stress in cotton. *Crop Science*, 44(4), 1265-1272.
- [37] Peng, Y., Yu, P., Zhang, Y., Sun, G., Ning, P., Li, X., Li, C. 2012. Temporal and spatial dynamics in root length density of field-grown maize and NPK in the soil profile. *Field Crops Research* 131, 9-16, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.003>.
- [38] Porcar-Castell, A., Tyystjärvi, E., Atherton, J., *et al.* 2014. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. *Journal of Experimental Botany*, 65(15), 4065-4095.
- [39] Qiu, B., Xue, Y., Fisher, J. B., *et al.* 2018. Satellite chlorophyll fluorescence and soil moisture observations lead to advances in the predictive understanding of global terrestrial coupled carbon-water cycles. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(3), 360-375.
- [40] Qin, R., Stamp, P., Richner, W. 2006. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland. *Soil and Tillage Research* 85, 50-61, <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.12.003>.
- [41] Rana, G., Katerji, N., 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of agronomy* 13, 125-153, [https://doi.org/10.1016/s1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/s1161-0301(00)00070-8).

- [42] Richards, J.H., Caldwell, M.M. 1987. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia* 73, 486-489, <https://doi.org/10.1007/bf00379405>.
- [43] Sabot, M. E., De Kauwe, M. G., Pitman, A. J., *et al.* 2020. Plant profit maximization improves predictions of European forest responses to drought. *New Phytologist*, 226(6), 1638-1655.
- [44] Schroder, J., Groenwold, J., Zaharieva, T. 1996. Soil mineral nitrogen availability to young maize plants as related to root length density distribution and fertilizer application method. *NJAS wageningen journal of life sciences* 44, 209-225.
- [45] Sperry, J. S., Venturas, M. D., Anderegg, W. R., *et al.* 2017. Predicting stomatal responses to the environment from the optimization of photosynthetic gain and hydraulic cost. *Plant, cell & environment*, 40(6), 816-830.
- [46] Van der Tol, C., Rossini, M., Cogliati, S., *et al.* 2016. A model and measurement comparison of diurnal cycles of sun-induced chlorophyll fluorescence of crops. *Remote Sensing of Environment*, 186, 663-677.
- [47] Van der Tol, C., Verhoef, W., Timmermans, J., Verhoef, A., *et al.* 2009. An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences*, 6(12), 3109-3129.
- [48] Verrelst, J., Van der Tol, C., Magnani, F., *et al.* 2016. Evaluating the predictive power of sun-induced chlorophyll fluorescence to estimate net photosynthesis of vegetation canopies: A SCOPE modeling study. *Remote Sensing of Environment*, 176, 139-151.
- [49] Wang, B., Feng, P., Li Liu, D., *et al.* 2020. Sources of uncertainty for wheat yield projections under future climate are site-specific. *Nature Food*, 1(11), 720-728.
- [50] Wang Y. F., Zeng Y. J., Yu L. Y., *et al.* 2021. Integrated modeling of canopy photosynthesis, fluorescence, and the transfer of energy, mass, and momentum in the soil-plant-atmosphere continuum (STEMMUS-SCOPE v1.0.0), *Geoscientific model development*, 14, 1379-1407.
- [51] Webber, H., Ewert, F., Olesen, J. E., *et al.* 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature communications*, 9(1), 1-10.
- [52] Wiesler, F., Horst, W. 1994. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions. *Plant and soil* 163, 267-277, <https://doi.org/10.1007/bf00007976>.
- [53] Williams, M., Rastetter, E. B., Fernandes, D. N., *et al.* 1996. Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a *Quercus-Acer* stand at Harvard Forest: the regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. *Plant, Cell & Environment*, 19(8), 911-927.
- [54] Wright, I. J., Reich, P. B., Cornelissen, J. H., *et al.* 2005. Modulation of leaf economic traits and trait relationships by climate. *Global Ecology and Biogeography*, 14(5), 411-421.
- [55] Xu, X. T., Medvigy, D., Powers, J. S., *et al.* 2016. Diversity in plant hydraulic traits explains seasonal and inter-annual variations of vegetation dynamics in seasonally dry tropical forests. *New Phytologist*, 212(1), 80-95.
- [56] Yoshida, Y., Joiner, J., Tucker, C., *et al.* 2015. The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from modeling and

- comparisons with parameters derived from satellite reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 166, 163-177.
- [57] Yu, L., Zeng, Y., Su, Z., Cai, H., and Zheng, Z. 2016. The effect of different evapotranspiration methods on portraying soil water dynamics and ET partitioning in a semi-arid environment in Northwest China, *Hydrology and earth system sciences*, 20, 975-990, <https://doi.org/10.5194/hess-20-975-2016>.
- [58] Yu, L., Zeng, Y., Wen, J., and Su, Z. 2018. Liquid-Vapor-Air Flow in the Frozen Soil, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 7393-7415, <https://doi.org/10.1029/2018JD028502>.
- [59] Zeng, Y. J., Su, Z. B., Wan, L., *et al.* 2011a. A simulation analysis of the advective effect on evaporation using a two-phase heat and mass flow model. *Water Resources Research*, 47(10).
- [60] Zeng, Y. J., Su, Z. B., Wan, L., *et al.* 2011b. Numerical analysis of air-water-heat flow in unsaturated soil: Is it necessary to consider airflow in land surface models?. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 116(D20).
- [61] Zhang, Y. G., Guanter, L., Berry, J. A., *et al.* 2016. Model-based analysis of the relationship between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, 187, 145-155.
- [62] Zhou, S., Duursma, R.A., Medlyn, B.E., Kelly, J.W., Prentice, I.C. 2013. How should we model plant responses to drought? An analysis of stomatal and non-stomatal responses to water stress. *Agricultural and Forest Meteorology* 182, 204-214, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.009>.
- [63] Zhou, S., Williams, A. P., Lintner, B. R., *et al.* 2021. Soil moisture–atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. *Nature Climate Change*, 11(1), 38-44.
- [64] Zhuang, J., Nakayama, K., Yu, G.-R., Urushisaki, T. 2001a. Estimation of root water uptake of maize: an ecophysiological perspective. *Field Crops Research* 69, 201-213, [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(00\)00142-8](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(00)00142-8).
- [65] Zhuang, J., Yu, G., Nakayama, K. 2001b. Scaling of root length density of maize in the field profile. *Plant and Soil* 235, 135-142, <https://doi.org/10.1023/A:1011972019617>.
- [66] 奚雷, 单楠, 杨沈斌, 张永光. 2019. 基于 SCOPE 模型的水稻不同生育期日光诱导叶绿素荧光及 GPP 模拟研究. *遥感技术与应用*, 34(03), 488-499.
- [67] 张曦, 王振南, 陆皎云, 等. 2016. 紫花苜蓿叶性状对干旱的阶段响应. *生态学报*, 36(09), 2669-2676.
- [68] 张永江, 刘良云, 侯名语, 等. 2009. 植物叶绿素荧光遥感研究进展. *遥感学报*, 13(05), 963-978.
- [69] 章钊颖, 王松寒, 邱博, 等. 2019. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展. *遥感学报*, 23(01), 37-52.

# 个人简历

1993 年 10 月 31 日出生于山东省滨州市。

2010 年 9 月就读于西北农林科技大学植物保护专业

2011 年 9 月就读于西北农林科技大学农业水土工程专业

2014 年 6 月本科毕业并获得工学学士学位

2014 年 9 月推免至西北农林科技大学水利与建筑工程学院农业水土工程专业直接攻读博士学位

2018 年 10 月至 2020 年 3 月于荷兰特温特大学（University of Twente）联合培养

2020 年 6 月至今于西北农林科技大学水土保持研究所从事博士后研究工作

## 研究成果

【1】 Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy flux, and Bowen ratio over a dry semi-humid cropland in Northwest China, Agricultural Water Management.

【2】 Evapotranspiration partitioning and crop coefficient of maize in dry semi-humid climate regime, Agricultural Water Management.

【3】 Integrating Photochemistry and Transfer of Energy, Mass and Momentum in the Soil-Plant-Atmosphere System via Dynamic Modeling Water Stress and Root System, Geoscientific Model Development.

## 主持及参与研究项目

【1】 国家自然科学基金青年项目（批准号：51879223，主持）

【2】 国家自然科学基金面上项目（批准号：51879223，参加）

