

土壤-植物-大气连续体水热、CO₂ 通量估算模型研究进展

王 靖^{1,2}, 于 强², 潘学标¹, 尹 红³, 张永强²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要:土壤-植物-大气连续体(SPAC)水热、CO₂通量的准确估算对理解陆地和大气的物质和能量交换过程有着重要意义。本文重点阐述了基于过程的土壤-植物-大气连续体水热、CO₂通量模型,同时也综述了统计模型、综合模型及基于遥感的模型的发展过程。其中水热通量统计模型包括基于温度和湿度以及基于温度和辐射的方法;CO₂通量统计模型包括基于气候因子或蒸散因子以及基于光能利用率的方法。水热通量过程模型包括大叶、双源、多源和多层的水热传输物理模型;CO₂通量过程模型包括叶片尺度及由大叶、双叶和多层方法扩展到冠层尺度的生理生态模型以及光合-蒸腾耦合模型。综合模型包括生物物理模型、生物化学模型和生物地理模型。统计模型形式简单,资料易得,对大范围的水热通量模拟具有指导意义;过程模型准确的揭示了水热和 CO₂通量传输的物理和生理过程,是大尺度综合模型的基础。未来生态系统水热、CO₂通量估算模型将集成各种技术手段进行多尺度网络观测和大尺度机理模拟。

关键词:统计模型;过程模型;综合模型;遥感

文章编号:1000-0933(2008)06-0001-0 中图分类号: 文献标识码:A

A review on water, heat and CO₂ fluxes simulation models

WANG Jing^{1,2}, YU Qiang², PAN Xue - Biao¹, YIN Hong³, ZHANG Yong - Qiang²

1 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 National Climate Center, Beijing 100081, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6):0001 ~ 000.

Abstract: Accurate modeling of water, heat and carbon dioxide fluxes is of importance in understanding the energy and mass exchange processes between land surface and atmosphere. This paper focuses on the advance in processes-based water, heat and CO₂ fluxes simulation model and reviews the development of statistic, integrated and remote sensing-based models for estimating water, heat and carbon dioxide fluxes in the soil-plant-atmosphere continuum. The reviewed statistic models included models that estimate water and heat fluxes based on temperature, humidity and radiation, and models that simulate carbon dioxide flux based on climatic factors, evapotranspiration and light use efficiency. Reviewed processed-based models covered the big-leaf model, two-source model, multi-source model and multi-layer models for water and heat transfer as well as leaf-level to canopy level models for carbon dioxide flux. Integrated models included biophysical, biochemical and biogeographic models. The statistic models are applied widely in directing the simulation of water, heat and CO₂ fluxes at large-scale level because of simple form and because the required data are obtained easily. While the process-

基金项目:中国农业大学科研启动基金(No. 2006048);中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01A6)

收稿日期:200-00-00; 修订日期:200-00-00

作者简介:王靖(1980~),男,博士,主要从事农田生态系统水热传输和碳循环模型研究. E-mail: wangj@cau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Science Foundation of Chinese Agricultural University (No. 2006048); Key Project of Knowledge Innovation Engineering of Chinese Academy of Sciences (KZCX1-SW-01-01A6)

Received date: 200-00-00; **Accepted date:** 200-00-00

Biography: WANG Jing, Ph. D. mainly engaged in water and heat transfer and carbon cycle model in the agro-ecosystem. E-mail: wangj@cau.edu.cn

based models describe the physical and physiological processes of water, heat and CO₂ flux transfer accurately and have been the foundation of large-scale integrated models. The future development of flux models is to integrate various method and technology for multi-scale network measuring and large-scale mechanism modeling.

Key Words: Statistic model; Process-based model; Integrated model; Remote sensing

土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水热和 CO₂ 传输是陆地水热循环和碳循环的重要组成部分^[1], 准确确定地表的水热和 CO₂ 通量对于理解气候变化及水碳循环极为重要^[2]。植被大气相互作用涉及降雨、蒸散和径流等水热循环过程以及光合、呼吸等碳循环过程, 只有对土壤、植被和大气中的水热平衡, 土壤与植被, 植被与大气界面水热碳传输的各个环节的物理特征和生理生态过程进行详细的研究, 才能进一步认识陆地水热碳循环过程^[3]。

由于植被和大气相互作用的复杂性和不确定性, 基于大量观测资料建立模型来评价陆地生态系统水碳循环的时空格局和变化趋势以及认识气候变化和下垫面植被和土壤的相互作用成为必要和必需的手段。近几十年来, 生态系统水热碳通量估算模型已经得到飞速发展, 从早期估算净初级生产力 (NPP) 和蒸散的统计模型, 到基于生理生态的过程模型, 再到多尺度的集成模型, 同时将模型与最新的观测技术-遥感和地理信息系统相结合研究全球和区域的水热通量成为新兴手段。

1 水热、CO₂ 通量估算模型

1.1 统计模型

1.1.1 水热通量估算模型

一类模型基于温度和湿度, 如 Thornthwaite 提出由月平均气温来估算潜在蒸散^[4]; Blaney 和 Criddle 将月作物耗水量表示为生长阶段与月平均气温的函数^[5]; Hargreaves 将潜在蒸散表示为温度和相对湿度的函数^[6]。另一类基于温度和辐射, 如 Jensen 等用辐射和温度的阶乘函数来计算参考蒸散^[7]; Samani 和 Hargreaves 将潜在蒸散表示为辐射、日平均温度和最高-最低温度差的函数^[8]。估算水热通量的统计模型其优点是形式简单, 资料易得, 用于有长序列历史资料的地区会得到很好的模拟效果, 对大范围的水热通量模拟具有指导意义, 但统计模型的经验性强, 难以推广到其它地区, 而且其理论基础差, 物理意义不明确, 不具备对未来的预测能力。

1.1.2 CO₂ 通量估算模型

一类基于 NPP 与气候因子或蒸散因子的相关关系来建立模型。其中 Miami 模型被认为是估算 NPP 的经典陆地植被模型^[9], NPP 表示为温度和降水的函数。Miami 模型需要的输入资料容易获得, 函数形式简单, 且能够真实反映 NPP 的地带性分布规律, 因此得到广泛的应用^[10]。但 Miami 模型只考虑了温度和降水两个因子, 没有考虑大气 CO₂ 浓度变化, 施肥水平变化及土地利用变化等对 NPP 的影响, 因此一些研究将这些因子引入了 Miami 阶乘模型, 通称为 β -因子方法^[11]。其次由于 GPP 能够直接估算出来^[12], 因此一些植物生产模型直接假定 NPP 与 GPP 线性相关^[13,14]。此类统计模型通常不涉及机理过程, 一般假设植被随着气候环境的改变而改变, 不能解释植被密度变化的原因, 但尽管如此仍然是当前其它模型的比较和参考标准。

另一类统计模型是光能利用率模型, 是由 Monteith 最早提出来的^[15], NPP 表示为可截获的光合有效辐射与光能利用率的乘积。模型被广泛用来监测区域和全球 NPP^[16], 许多模型假定光能利用率为常数^[17,18]。但实际上, 光能利用率依赖于许多因子, 如叶片氮含量、植物种类、温度、水分条件和叶龄等^[19,20], 因此许多研究通过增加修正因子对光能利用率模型进行了改进^[21,22]。光能利用率模型形式简单, 参数较少且有一定的物理意义, 适合于大尺度 NPP 预测, 然而由于模型假设 NPP 对光的响应为线性关系, 在不同的气候环境条件下会带来多大的误差仍需进一步研究。

1.2 过程模型

统计模型注重结果与输入因子的相关性, 常依赖于历史资料, 其区域性强而普适性差。过程模型是指通

过模拟影响水热和 CO₂ 通量传输的物理和生理过程,来揭示环境因子与水热过程的相互作用。

1.2.1 估算水热通量

估算水热通量的过程模型包括单层模型、双源模型、多源模型和多层模型。单层模型将土壤和冠层视为整体,假定冠层与大气的感热和潜热交换发生在同一个水平层,冠层吸收的太阳辐射能转换成冠层的潜热和感热两部分。当叶面积指数足够大并且下垫面供水充分时,单层模型能够较好地模拟农田的能量平衡过程,而且它的参数少,应用方便。单层模型包括 Penman 公式, Penman-Monteith 公式、Priestley-Taylor 公式和作物系数法。Penman 通过将感热和潜热通量的对流方程与能量平衡方程相结合消去表面温度推导出了 Penman 公式^[23],用于计算下垫面均一、水分供应充足、生长旺盛的矮草作物蒸散,其形式简单,物理意义明确,成为计算各种作物潜在蒸散的基础方法。但是 Penman 公式没有包括任何植被因子对蒸散的影响,不能用于计算各种作物的实际蒸散。Monteith 通过引进具有生理意义的冠层阻力改进了 Penman 公式^[24],由于其可以考虑植被叶面积指数变化、水分和氮素亏缺等对蒸散的影响,成为估算各种植被感热和潜热通量的经典方法^[25,26]。Penman-Monteith 公式应用过程中的主要问题是冠层导度的确定,冠层导度为叶片导度在冠层尺度上的扩展,最经典的叶片气孔导度模型为 Jarvis 提出的阶乘模型,将叶片气孔导度(g_s)表示为各个气象,植被和土壤因子的阶乘函数^[27]:

$$g_s = \max(g_{\max} f(\text{PPFD}) f(T) f(D) f(\psi), g_{\min}) \quad (1)$$

其中 g_{\max} 和 g_{\min} 是最大和最小气孔导度, $f(\text{PPFD})$, $f(T)$, $f(D)$ 和 $f(\psi)$ 是光合有效辐射,温度,水气压差,水势对气孔导度的限制因子。另外 Farquhar 提出了计算气孔导度的前馈阶乘模型^[28]。气孔导度从单叶到冠层的扩展有不同的方法,包括阴阳叶导度平均法^[29]、顶层阳叶取样法^[30]、权重法^[31]、有效叶面积指数法^[32]、冠层分层法、多重叶角分级法^[33]以及将冠层导度表示为光斑,遮荫和部分遮荫叶片的气孔导度在冠层上的积分等。Priestley 和 Taylor 通过引进“平等蒸发力”而简化了 Penman 公式^[34],进一步,De Bruin 和 Holtslag 在 Priestley-Taylor 方法的基础上发展了估算下垫面水分充足的低矮作物的水热通量^[35]。这种方法适于估算湿润和半湿润地区大面积低矮作物的蒸散,但在干旱半干旱地区,由于下垫面复杂的热力和动力作用,其应用受到了限制。作物系数法基于作物需水量的变化主要由作物盖度和气候因子的变化决定,当作物不受土壤水分亏缺时,实际蒸散为潜在蒸散与作物系数的乘积。Doorenbos 和 Pruitt 提供了不同气候条件下不同作物在不同生长阶段的作物系数,为那些没有实测资料的地区估算实际蒸散提供了极大的便利。但是在有实测资料的地区使用作物系数法时,必须对作物系数进行订正以获得当地作物不同生长阶段的作物系数。

在干旱半干旱地区或植被稀疏的情况下,单层模型的应用受到了很大限制,因为冠层和土壤两个表面的通量存在显著不同。因此,单层模型已被扩展为双源模型。经典的双源模型由 Shuttleworth 和 Wallace 提出,分别计算冠层和土壤的能量平衡,明确区分了冠层和土壤的能量交换,较之单层模型更接近农田能量转换的实际情况,因而提高了模型的预测精度。S-W 公式已经广泛应用于农作物和非农作物^[36,37]。然而,双源模型应用过程中的最大困难就是各项阻力的确定,模拟阻力产生的误差有时会对结果的精度造成很大影响。Choudhry 和 Monteith 在双源模型的基础上提出了均一下垫面的四层水热传输解析模式^[38]。植被冠层能量平衡的计算仍按照 S-W 公式,而土壤分成了上层完全干层和下层湿润层,对土壤阻力的处理更加精细,可以考虑更细致的土壤水分运移过程对蒸散的影响。

当下垫面不是单一植被时,单层或双源模型就不能真实地描述植被的水热通量,因为不同作物的冠层导度不同。Dolman 发展了一个多源陆地表面能量平衡模型^[39],应用于热带雨林,热带草原和农田作物能量平衡的计算,模拟短时间和长期的蒸发都取得了较好的结果。Brenner 和 Incoll 进一步扩展了 Dolman 的多源模型^[40],将下垫面区分为植被和非植被两种类型,且可以考虑下垫面有残茬时的土壤蒸发过程。

单层模型或双源模型都将植被冠层视为一层,但是田间植物具有垂直结构,不同高度上,植被所处的微环境不同,因此应将冠层按高度划分成不同的层次,根据每一层的微气象条件来计算各层的感热和潜热通量,再累加成冠层尺度的量。Waggoner 和 Goudriaan 发展了水热传输的多层模型^[41,42],每一层感热和潜热通量通过

电学类比理论计算,Chen 通过引入焓和超额热通量流两个变量建立了非耦合的感热和潜热通量的解析模式^[43];Lhomme 将 Penman-Monteith 公式扩展到了多层模型^[44],但模型中参数众多,结构复杂,难以应用。空气动力学阻力的确定是制约多层模型应用的一个重要因子,当前计算空气动力学阻力主要基于三种方法:梯度扩散理论(K-theory),高阶闭合方法和 Lagrangian 公式。其中应用最广的方法是 K-theory,但由于实验中观测到了通量反梯度传输现象^[45],K-theory 的应用受到挑战,因为在许多冠层中,涡度的尺寸几乎与冠层高度同阶,K-theory 假设的有效性不再成立。一些多层模型使用高阶闭合模型^[46]或 Lagrangian 原理^[47]来模拟冠层内的涡度传输。然而,这种高阶闭合模型与 Lagrangian 方法要求详细的冠层结构信息,计算过程耗费大量的时间,不宜应用。而且 Wu 等比较了用 K-theory 和 Lagrangian 方法计算的双层和单层模型^[48],发现两者的差别很小。因此尽管多层模型将冠层或土壤分为几层,考虑了水热在冠层和土壤中传播的层次性,但其需要的参数众多,有些参数难以获得或无法测定,而且参数估计的不确定性导致多层模型的计算结果未必比大叶和双源模型准确,因此在水热传输模拟中应用较少。

1.2.2 估算 CO₂ 通量

估算 CO₂ 通量的过程模型包括叶片尺度和冠层尺度的生理生态模型。Farquhar 等提出了 C₃ 植物叶片光合作用的生化模型^[49],叶片光合基于羧化和电子传递两个基本过程。叶片净光合速率表示为胞间 CO₂ 分压、入射光通量密度和叶温的函数。Collatz 等在 Farquhar 模型的基础上提出了一整套 C₃ 作物叶片光合的计算模型和参数^[50],并进一步发展了 C₄ 作物叶片光合作用的生化模型^[51]。叶片尺度的生理生态模型极大的推动了冠层尺度和区域尺度光合模型的发展,开启了用生理生态过程模型估算 NPP 的方法。冠层尺度的光合模型是叶片尺度光合模型在冠层上的扩展,根据模型对冠层的不同处理形式分为大叶模型,双叶模型和多层模型。

大叶模型将冠层看作一个伸展的大叶片,将叶片尺度的模型直接应用到冠层。其扩展过程的主要困难是由于叶片光合对氮含量和光强的响应非线性,而且不同冠层深度叶片的微环境存在差别,因此大叶模型会产生一定的误差。但由于形式简单,物理意义明确,参数较少且易获得,因此在估算站点尺度的作物光合,区域尺度以及全球尺度 NPP 的模型中广为应用^[52~55]。大叶模型适于当叶面积指数较小时来估计冠层光合,当叶面积指数较大时其误差是显而易见的:1) 叶片光合对叶片氮含量和光强的响应非线性,而且不同冠层深度叶片的微环境存在差别,观测到的阳叶氮含量比平均大叶的氮含量低 40% 以上^[56];2) 冠层不同层次和同一层次的不同叶片由于倾角和方位角的不同,接受的光强不同,平均估计会过高估计冠层光合^[57];3) 冠层氮含量的分布不是最优化。

双叶模型将冠层中的叶片分为受光和遮荫的叶片,分别计算阳叶和阴叶吸收的光强、叶面积指数和光合速率。双叶模型是在大叶模型和多层模型之间寻求恰当的平衡。Norman 最早提出将光合作用的叶片划分为阴阳叶^[58],Reynolds 等发现阴阳叶的划分可以准确的模拟冠层光合作用^[59],Wang 和 Leuning 建立了冠层导度、光合作用和能量分配的双叶模型,主要包括一个简单而精巧的辐射模式,一个改进的光合-气孔导度耦合模式和一个新的叶片能量平衡参数化方案。双叶模型的优点是较大叶模型更真实,较多层模型更有效率。

从理论上讲,要准确描述冠层的光合作用,多层模型是必要而且准确的。因为在整个冠层内,上下冠层所接受的光强存在很大差别且叶片氮含量的分布不同,而且冠层内的微气象条件也存在差别。多层模型在计算冠层光合时一般采用如下的处理方法:1) 冠层内叶片根据倾角和方位角的不同所接受的辐射有差别,如 Baldocchi 提出的 CANWHT 模型^[60],采用随机空间和球面叶角分布模型来处理辐射在冠层内的传输;2) 叶片氮含量在冠层内的分布,如 Leuning 在冠层光合作用的时空积分模型中考虑了冠层氮含量以及光合能力的指数衰减廓线^[61];3) 冠层微气象的差别,如 Gu 等提出的完全多层模型中考虑了微气象和 CO₂ 浓度在冠层内的分布对 CO₂ 通量的影响^[62]。多层模型在处理光吸收以及叶片氮含量的分布比大叶模型模拟冠层光合的精度有所提高,但是考虑冠层微气象对冠层 CO₂ 通量模拟的影响很小^[63]。

1.2.3 水热和 CO₂ 通量耦合模型

水热传输和 CO₂ 传输是不可分隔的两个过程。一方面光合和蒸腾发生在同样的生理器官之中,蒸腾是植

物为了光合而必须付出的水分损失^[64];另一方面水分传输调控着碳氮循环,植物由于水分亏缺对气孔导度的影响会影响光合作用。因此,气孔成为研究水汽和 CO₂ 耦合传输的必由之路。Ball 等认为气孔导度是叶面上空气的相对湿度、叶面 CO₂ 浓度和净光合速率的函数^[65],从而第一次将气孔导度和光合作用联系起来,为将来的光合和蒸腾耦合开辟了道路。由于气孔响应失水而收缩,失水速率与水汽压差而不是与叶面相对湿度成正比,因此 Leuning 用叶面水汽压差取代空气相对湿度修正了 Ball-Berry 模型^[66];基于这种耦合思想,各种作物和各类光合蒸腾耦合模型建立起来^[67,68]。Tuzet 等通过引进叶水势对气孔导度的影响,建立了一整套土壤-作物-大气水汽和 CO₂ 传输的耦合模型^[69],其中叶水势由蒸腾和根系吸水动力学控制。Wang 等建立了冠层尺度的光合蒸腾耦合模型,模拟了华北平原冬小麦生育期的水热和 CO₂ 通量^[70]。将光合和蒸腾耦合,进而将水热传输和 CO₂ 传输相耦合,成为当前和未来的一个重要研究方向和前沿科学问题^[71]。

1.3 基于过程的水热碳通量综合模型

1.3.1 陆面过程/生物物理模型

陆面过程模型模拟土壤-植被-大气系统辐射、热量、水汽和动量交换,主要用于大气环流模式中。最早的陆面过程模型是 Manabe 提出的“水桶”模式^[72],认为地面的蒸发跟桶里的水量成正比。水桶模式是孤立的物理过程模式,不能真实估计植被的反馈作用。但由于简单且有效,被气象学界广为采用。Deardorff 提出的大叶模型考虑了植被在陆面水热过程中的作用^[73],为后来陆面过程模式考虑植被开辟了道路。从 80 年代初期开始,更复杂的植被模式发展起来,特别是细致地考虑了植被对陆面水分和能量收支所起的作用,如 BATS 模型^[74],简单生物圈模式(SiB),ISBA 模型^[75]。这一时期的陆面过程模型强调植被在计算地表能量平衡中的作用,可模拟植被和大气的水热和能量交换,而对植被与大气的碳交换则没有深入考虑。第三阶段的陆面过程模式主要根据光合作用和植物水分的关系,考虑了植物的水汽吸收并将植物光合作用的生物化学模式引入到陆面过程模式中。如能量和物质传输模型(GETEM)^[76]、AVIM 模型^[77]、LSM 模型^[78]、改进的简单生物圈模式(SiB2)等^[79]。Cox 在海气耦合模式中加入了一个动态全球植被模式,认为考虑碳循环反馈的全球增温效应更强^[80]。Tsvetsinskaya 等把作物生长模式 CERES-Maize 加到 BATS 中,模拟了玉米的生长发育对地面通量交换的影响^[81]。双向耦合模型研究气候过程与生态系统过程的相互作用,可以模拟地气之间的能量、水汽和 CO₂ 通量,不过这些研究仍然处在探索过程。

1.3.2 生物地球化学模型

生物地球化学模型模拟陆地生态系统碳、氮和水分循环,其特征是使用气候和土壤数据以及植被类型作为驱动变量,使用参数化方法描述植被分布,可以模拟生态系统光合作用、呼吸作用和土壤微生物分解过程,能计算土壤-植物-大气之间的养分循环以及温室气体交换通量。当前广泛用来计算全球和区域初级生产力、碳氮循环、水热通量、温室气体排放、土壤碳氮动态循环过程,如 CENTURY^[82],TEM^[83],BIOME3^[84],CEVSA^[85],TRIFFID^[86]等。生物地球化学模型广泛用于评价和预测全球变化背景下区域性和全球性的能量水分和碳氮循环及其时空格局,成为当前分析和预测大尺度生态系统过程的有力工具,且会对实验过程给予新的启示。但生物地球化学模型无法预测植被的分布及演替过程。

1.3.3 生物地理模型

与生物地球化学模型不同的是,生物地理模型基于植被与气候处于平衡状态且无滞后效应以及气候因子决定陆地植被的分布和特征这两个基本假设,模拟陆地生态系统不同植被类型分布对气候的响应及对资源的竞争,因此能够模拟植被的分布及其演替过程。最初的生物地理模型基于气候因子与陆地植被的相关性而建立,通过气候来划分植被或者通过植被的边界来对气候进行分类^[87],如 Koppen 由陆地植被的边界来确定不同气候类型的边界而制定的气候分类系统^[88]以及 Holdridge 由不同气候要素的组合类型来确定植被的边界^[89]。其后,新的模型考虑了资源限制因子和生态生理因子对植被结构和分布的限制作用,如 BIOME2^[90],DOLY^[91]和 MAPPS^[92]模型。植被类型的分布由植物的生态生理因子限制决定,而植被的主要结构特征由资源限制决定。生物地理模型已经广泛地用于对全球植被类型的划分并取得了很好的效果,但这类模型假设植

被与气候处于平衡状态,也不能反映植被的结构与功能的综合作用^[93]。

1.4 基于遥感的模型

遥感作为监测区域下垫面能量平衡和水分状况的手段得到了广泛关注和应用。传统的基于单点的方法难以推广到下垫面几何结构与物理性质非均匀的区域尺度上去。以点代面的等值线内插法在区域上应用其估算精度显著降低。从单点观测资料推广到区域上,主要受到地形效应、下垫面植被类型和地面特性差异这三个方面的制约。卫星遥感数据提供了覆盖全球的观测资料,且具有区域性和实时性的特点,其应用前景十分广阔。基于遥感估算水热和 CO₂通量的模型可以分为三种类型:

遥感为水热和 CO₂通量估算模型提供简单的生物物理参数和背景资料或应用遥感数据来检验模型的结果。

遥感方法与 SVAT 模型相结合,主要指应用遥感资料作为模型的输入驱动变量或应用遥感资料来调整和验证模型^[94, 95]。SVAT 模型详尽地描述了大气、土壤和植被的生物物理过程,可以方便的与气候模型以及水文模型相结合。但由于需要大量的地表特征参数,而在区域上这些参数的确定非常困难,因此 SVAT 模型要在区域上应用就必须与遥感技术相结合。

(3) 完全基于遥感建立模型,这类模型常常利用统计模型所表述的关系,如基于遥感数据估算 NPP 的模型;完全基于遥感估算蒸散的模型主要是热惯量模型。

遥感方法尽管在估算区域水热碳通量中得到了广泛的应用,但仍然有很多因子制约了其发展,这些因子主要是图像信息源、地表物理参数的反演精度、空气动力学阻抗和冠层阻抗的估算精度以及模型估算结果的验证问题;另一个难点是尺度扩展,高分辨率卫星遥感对某个区域的监测是瞬时性的,而要获得日尺度的水热碳通量,就必须对瞬时尺度的计算结果扩展到日时间尺度,在扩展过程中会产生多大的误差,以及采用何种扩展方法都是当前的热点问题。

2 模型的局限及存在的问题

水碳通量估算模型已经从统计模型发展到了描述生态系统生理生态过程的综合模型,同时与最新的遥感和 GIS 技术结合起来研究区域和全球尺度的水碳循环(表 1 总结了各类模型的主要过程、时空尺度和适用范围)。但是,模型只是真实世界的抽象,其建立常依赖于建模者的目的以及建模者对系统的认识,因此模型对真实世界的反映不可避免的存在偏差。当前各类模型普遍存在的局限性包括模型的普适性较差、参数的确定方法不恰当以及模型的验证和应用薄弱。而正是如此,模型的发展永无止境,而且不同模型的优缺点不同,在发展模型的同时,必须注重模型之间的比较。一方面要让模型无限可能的接近真实世界,同时又必须将控制系统的因子抽象出来,建立真实世界的简化模型。当前研究存在的问题及需要深入开展研究的工作:

(1) 尽管从叶片尺度到区域尺度的水碳通量模型众多,研究相当深入,但不同时空尺度水碳耦合机制及控制因子间相互关系仍缺乏深入系统研究,不同时空尺度下,农田水碳耦合机制及控制因子不同,控制因子间的相互关系是值得深入研究的问题。

(2) 不同尺度间模型的比较以及模型自上而下或自下而上扩展时带来的误差没有得到充分的研究,机理复杂、参数众多的模型,参数的累积误差会抵消模型对现实世界精细考虑带来的精度,如大叶模型,双叶模型和多层模型用来估计农田水碳通量时的差异尚没有一致的结论。

(3) 大尺度模式中,植被对气候的反馈作用研究远远不够深入,植被不仅仅受气候影响和控制,其本身也对生物地球化学循环产生影响并进一步对气候产生反馈作用,但到目前为止,植被对区域气候影响的认识仍然非常薄弱。

(4) 尽管气候数值模式和陆面遥感参数反演技术均有明显发展,但陆面遥感资料在数值模式中的有效利用仍然存在许多问题。观测站点的有限性制约了数值模式中地表属性参数化方案的准确性。动态实时的遥感监测信息可以弥补这个不足,但实际上大量的遥感观测数据在植被和大气相互作用研究中并没有得到充分利用。

表 1 各类模型的主要过程、时空尺度和适用范围

Table 1 Processes, temporal and spatial scale and application of different models

模型	主要过程	尺度		适用范围
		时间步长	空间范围	
统计模型	水碳通量与气象因子的相关关系	日,月,年	站点,区域,全球	具有长序列历史资料的地区,供其它模型参考
过程模型	大叶模型 双源模型 多层模型	瞬时,日	站点	站点尺度准确估算水热碳通量
综合模型	生物物理模型	瞬时,日	区域,全球	主要用于大气环流模式中
	生物化学模型	日,月,年	区域,全球	计算区域和全球初级生产力、碳氮循环和温室气体排放等
	生物地理模型	日,月,年	区域,全球	对全球植被类型的划分
基于遥感的模型	遥感与统计、过程模型相结合	瞬时,日,月	站点,区域,全球	从站点到全球尺度的水碳通量估算

3 模型的发展方向

尽管模型存在各种各样的问题,但是作为研究站点、区域和全球生态系统能量和水碳循环,土壤、植被和大气的相互作用以及全球变化的影响等各种问题的必不可少的手段,将会在未来得到更广阔的应用。以前由于缺乏大尺度、长期的生态试验和观测数据,传统的估算水热碳通量的生态系统模型的建立以站点尺度、少数的对比试验和观测数据为基础,然后通过自下而上的方法将小尺度的结果和生态系统过程机理扩展到大尺度,尽管这种模型促进了对生态系统格局和过程时空变化的理解,但其结果的可靠性和可信度都较低^[96]。植被和生态定量遥感可获得大尺度上地表生物特性参数和地表物理参数,随着定量遥感技术的发展,描述下垫面植被结构的遥感模式得到了进一步发展,如精细描述冠层结构的 4 尺度模型^[97]和三维可视化模型^[98],这些模式的发展极大推动了由卫星遥感提取陆地生态系统信息并提供了大量的基础参数供大尺度水热碳通量模型使用。随着遥感技术在生态领域的广泛应用以及长期定位生态试验的实施,当前的生态系统模型将会趋向于大尺度机理模拟,综合应用各种技术手段进行多尺度网络观测,并将数据和模型融合。

当前在涡度相关数据的支持下,许多生态系统模型得到了进一步的验证和发展^[99~101]。Morales 等用 EUROFLUX 的资料评价了各种基于过程的水热碳通量模拟模型^[102],指出各种生态系统模型必需进一步改进来准确揭示生态系统的关键过程。可以预见,随着全球通量网的长期运行,各种生态系统模型将会得到进一步的验证和发展,而且基于涡度相关数据的生态系统尺度的模型也将是未来的一个发展方向。但必须指出的是,尽管涡度相关技术被认为是当前测定地表水热和 CO₂ 通量的最好方法,成为当前测定和分析不同类型生态系统植被与大气水热碳交换的新工具^[103]。但其使用中存在许多不确定性,如能量不闭合现象^[104,105]等,Massman 等分析了涡度相关的不确定性并指出了误差的主要来源^[106]:仪器的相关参数和仪器的野外安装问题;仪器采样问题;风速和其它物理量功率谱,协谱特性,高频和低频衰减问题;密度变化对 CO₂ 和水汽通量计算的影响;平流的订正和坐标系统变换问题;夜间通量和重力波等方面。因此在基于涡度相关数据建立模型时,必须考虑将模型和数据同化以更准确揭示生态系统水碳循环。

其次如何把全球变化引起的生态系统不稳定性以及人类活动的影响加入到生态系统模型中,并进一步估算气候变化背景下的生态系统水热与碳通量,同时考虑把生态系统植被的不同发育与演替阶段及过程加入到生态系统模型中都将未来的重要研究方向。

References:

- [1] Liu C M, Wang H X, et al. The interface processes of water movement in the soil-crop-atmosphere system and water-saving regulation. Beijing: Science Press, 1999, 194.

- [2] Sun R, Liu C M. A review on research of land surface water and heat fluxes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3) :434 — 438.
- [3] Hutjes R W A, Kabat P, Running S W, *et al.* Biospheric aspects of the hydrological cycle. *Journal of Hydrology*, 1998, 212 :1 — 21.
- [4] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 1948, 38 :55 — 94.
- [5] Blaney H F, Criddle W D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service Tech. 1950, Paper No. 96, 48.
- [6] Hargreaves G H. Estimation of potential and crop evaporation. *Trans. ASAE*, 1974, 17 :701 — 704.
- [7] Jensen M E, Wright J C, Pratt B J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop, and soil data. ASAE Paper No. 69 — 941. Winter meeting of the ASAE at Chicago, Ill., December 1969. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI.
- [8] Samari Z A, Hargreaves G H. Water requirements, drought and extreme rainfall manual for the United States. — International Irrigation Center, Utah State University, Logan UT, 1985.
- [9] Lieth H, Whittaker R H. Modeling the Primary Productivity of the World. *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, New York, 1975, 237 — 263.
- [10] Pittock A B, Nix H A. The effect of changing climate on Australian Biomass Production - A preliminary study. *Climatic Change*, 1986, 8 :243 — 255.
- [11] Adams B, White A, Lenton T M. An analysis of some diverse approaches to modeling terrestrial net primary productivity. *Ecological Modelling*, 2004, 177 :353 — 391.
- [12] Wofsey S C, Goulden M L, Munger J W, *et al.* Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260 :1314 — 1317.
- [13] Gifford R M. The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink. *Australian Journal Plant Physiology*, 1994, 21 :1 — 15.
- [14] Roxburgh S H, Berry S L, Buckley T N, *et al.* What is NPP? Inconsistent accounting of respiratory fluxes in the definition of net primary production. *Funct. Ecology*, 2004, 19 : 378 — 382.
- [15] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1977, 281 :277 — 294.
- [16] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70 :29 — 51.
- [17] 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 : 5263 — 5283.
- [18] Prince S D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12 : 1313 — 1330.
- [19] Linder S. Potential and actual production in Australian forest stands. In *Research for Forest Management*. Eds. J. J. Landsberg and W. Parson. CSIRO, Melbourne, 1985. 11 — 51.
- [20] Joel G, Gamon J A, Field C B. Production efficiency in sunflower: the role of water and nitrogen stress. *Remote Sens. Environ.*, 1997, 62 :176 — 188.
- [21] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95 :209 — 228.
- [22] Chen D X, Coughenour M B. Photosynthesis, transpiration, and primary productivity: Scaling up from leaves to canopies and regions using process models and remotely sensed data. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB4033, doi:10.1029/2002GB001979.
- [23] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc.*, 1948, 193 :120 — 145.
- [24] Monteith J L. Evaporation and environment. *Symposia of the Soc. Exp. Bio.*, 1965, 19 :205 — 234.
- [25] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24, Rome, 1977.
- [26] Katul G G, Parlange M B. A Penman-Brutsaert model for wet surface evaporation. *Water Resources Research*, 1992, 28 :121 — 126.
- [27] Jarvis P G. The interpretation of leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, 1976, 273 :593 — 610.
- [28] Farquhar G D. Feed forward responses of stomata to humidity. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1978, 5 :787 — 800.
- [29] Bailey W G, Davies J A. Bulk stomatal control on evaporation. *Boundary-layer Meteorol.*, 1981, 20 :401 — 415.
- [30] Whitehead D, Okali D U U, Fasehun F E. Stomatal response to environmental variables in two tropical forest species during the dry season in Nigeria. *J. Appl. Ecol.*, 1981, 18 :571 — 587.
- [31] Duncan W B, Loomis R S, Williams W A, *et al.* A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 1967, 38 :181 — 205.
- [32] Szeica G, Long I F. Surface resistance of crop canopies. *Water Resour. Res.*, 1969, 5 :622 — 633.
- [33] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, *et al.* A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43 :505 — 531.
- [34] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.*, 1972, 100 :

81—92.

- [35] De Bruin H A R, Holtslag A A M. A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept. *J. Appl. Meteor.*, 1982, 21: 1610—1621.
- [36] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1985, 111: 839—855.
- [37] Stannard D I. Comparison Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and Modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland. *Water Resour. Res.*, 1993, 29: 1379—1392.
- [38] Choudhury B J, Monteith J L. A four-layer model for heat budget of homogeneous land surfaces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1988, 114: 373—398.
- [39] Dolman A J. A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 65: 21—45.
- [40] Brenner A J, Incoll L D. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands. *Agric. For. Meteorol.*, 1997, 84: 187—205.
- [41] Waggoner P E, Reifsnnyder W E. Simulation of the temperature, humidity and evaporation profiles in a leaf canopy. *J. Appl. Meteorol.*, 1968, 7: 400—409.
- [42] Goudriaan J, Waggoner P E. Simulating both aerial microclimate and soil temperature from observations above the foliar canopy. *Neth. J. Agric. Sci.*, 1972, 20: 104—124.
- [43] Chen J. Uncoupled multiplayer model for the transfer of sensible and latent heat flux densities from vegetation. *Boundary-layer Meteorology*, 1984, 28: 213—225.
- [44] Lhomme J P. Extension of Penman's formulae to multi-layer models. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1988a, 42: 281—291.
- [45] Denmead O T, Bradley E F. On scalar transport in plant canopies. *Irrigation Science*, 1987, 8: 131—149.
- [46] Wilson J D. Turbulent transport within the plant canopy. In *Estimation of Areal Evapotranspiration*, Black T A, Spittlehouse D L, Novak M D, Price D T, (eds); 1989, 43—80. IAHS Publication 177.
- [47] Hsieh C, Katul G G, Schieldge J, *et al.* The Lagrangian stochastic model for fetch and latent heat flux estimation above uniform and nonuniform terrain. *Water Resources Research*, 1997, 33: 427—438.
- [48] Wu A, Black A, Verseghy D L, *et al.* Comparison of two-layer and single-layer canopy models with lagrangian and K-theory approaches in modeling evaporation from forests. *Int. J. Climatol.*, 2001, 21: 1821—1839.
- [49] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 1980, 149: 78—90.
- [50] Collatz G J, Ball J T, Grivet C, *et al.* Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agric. For. Meteorol.*, 1991, 54: 107—136.
- [51] Collatz G J, Ribas-Carbo M, Berry J A. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C₄ plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1992, 19: 519—538.
- [52] Sellers P J, Hall F G. FIFE Special Issue. *J. Geophys Res*, 1992, 97: 18343—19109.
- [53] Kull O, Kruijt B. Leaf photosynthesis light response: a mechanistic model for scaling photosynthesis to leaves and canopies. *Functional Ecology*, 1998, 12: 24—36.
- [54] Amthor J S. Scaling CO₂-photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. *Photosynthesis Research*, 1994, 39: 321—350.
- [55] Friend A D, Stevens A K, Knox R G, *et al.* A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v 3.0). *Ecological Modelling*, 1997, 22: 249—287.
- [56] Friend A D. Modelling canopy CO₂ fluxes: are 'big-leaf' simplifications justified? *Global Ecology & Biogeography*, 2001, 10: 603—619.
- [57] Wang Y P, Leuning R. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I. Model description and comparison with a multi-layered model. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 91: 89—111.
- [58] Norman J M. Modeling the complete crop canopy. In: Barfield B J, Gerber J F. (Eds.), *Modification of the Aerial Environment of Plants*. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, 1979. 249—277.
- [59] Reynolds J F, Chen J, Harley P C, *et al.* Modeling the effects of elevated CO₂ on plants: extrapolating leaf response to a canopy. *Agric. For. Meteorol.*, 1992, 61: 69—94.
- [60] Baldocchi D D. A lagrangian random walk model for simulating water vapor and sensible heat flux densities and scalar profiles over and within a soybean canopy. *Bound. -layer Meteor.*, 1992, 61: 113—144.
- [61] Leuning R, Kelliher F M, De Pury D G G, *et al.* Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: Scaling from leaves to canopies. *Plant Cell Environ.*, 1995, 18: 1183—1200.
- [62] Gu L, Shugart H H, Fuentes J D, *et al.* Micrometeorology, biophysical exchanges and NEE decomposition in a two-story boreal forest—development and

- test of an integrated model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94: 123 — 148.
- [63] Baldocchi D D. Scaling Water Vapor and Carbon Dioxide Exchange from Leaves to a Canopy: Rules and Tools. *Scaling Physiological Processes, Leaf to Globe*, Ehleringer R R and Field C B, eds., Academic Press, New York. ATDD No. 91/02, 1993. 77 — 114.
- [64] Cowan I R. Regulation of water use in relation to carbon gain in higher plants. p. 589 — 613. In Lange O L. *et al.* (ed.) *Encyclopedia of plant physiology. II. Water relations and carbon assimilation*, New Series, Vol. 12B. Springer-Verlag, New York, 1982.
- [65] Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Biggins J. (eds.) *Progress in Photosynthesis Research*. Nijhoff Publ., Dordrecht-Boston-Lancaster. 1987, 4: 221 — 227.
- [66] Leuning R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. *Plant Cell Environ*, 1995, 18: 339 — 355.
- [67] Yu G R, Kobayashi T, Zhuang J, *et al.* A coupled model of photosynthesis-transpiration based on the stomatal behavior for maize (*Zea mays* L.) grown in the field. *Plant and soil*, 2003, 249: 401 — 416.
- [68] Kim S H, Lieth J H. A Coupled Model of Photosynthesis, Stomatal Conductance and Transpiration for a Rose Leaf (*Rosa hybrida* L.) *Annals of Botany*, 2003, 91: 771 — 781.
- [69] Tuzet A, Perrier A, Leuning R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26: 1097 — 1116.
- [70] Wang J, Yu Q, Li J, *et al.* Simulation of diurnal variations of CO₂, water and heat fluxes over winter wheat with a model coupled photosynthesis and transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 194 — 219.
- [71] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, *et al.* Modeling the exchanges of energy, water and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 1997, 275: 502 — 509.
- [72] Manabe S. Climate and the ocean circulation; I: The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, 97: 739 — 774.
- [73] Deardorff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83: 1889 — 1903.
- [74] Dickinson R E, Sellers A H, Kennedy P J, *et al.* Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model, NCAR/TN-275 + STR, 1986.
- [75] Noilhan J, Planton S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, 117: 536 — 549.
- [76] Chen D X, Coughenour M B. GEMTM-A general model for energy and mass transfer at land surfaces and its application at the FIFE sites. *Agric. Forest Meteorol.*, 1994, 68: 145 — 171.
- [77] Ji J A. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 445 — 451.
- [78] Bonan G B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide. NCAR Tech. Note NCAR/TN-417 + STR, 1996. 150.
- [79] Sellers P J, Bounoua G J, Collatz D A, *et al.* Comparison of radiative and physiological effects on doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, 1996, 271: 1402 — 1406.
- [80] Cox P M, Richard A B, Chris D J, *et al.* Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, 408: 184 — 187.
- [81] Tsvetsinskaya E A, Linda O M, William E E. Investigating the effects of seasonal plant growth and development in three-dimensional atmospheric simulations. Part II: Atmospheric responses to crop growth and development. *J. Climate*, 2001, 14: 711 — 729.
- [82] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al.* Analysis of factors controlling organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, 51: 1173 — 1179.
- [83] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234 — 240.
- [84] Haxeltine A, Prentice I C, Creswell I D. A Coupled Carbon and Water Flux Model to Predict Vegetation Structure. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7: 651 — 666.
- [85] Cao M K, Woodward F I. Dynamics responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393: 249 — 252.
- [86] 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: 63 — 83.
- [87] Mao L X, Sun Y L, Yan X D. Modeling of carbon cycling in terrestrial ecosystem: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2189 — 2195.
- [88] Koppen W. Das geographisches system der climate. In: Koppen W, Geiger R, eds. *Handbuch der Klimatologie*. Berlin: Gerbruder Borntraeger. 1936,

1—46.

- [89] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data, *Science*, 105:367—368.
- [90] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, *et al.* A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J. Biogeogr.*, 1992, 19:117—134.
- [91] Woodward F I. *Climate and Plant Distribution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [92] Neilson R P, King G A, Koerper G. Towards a rule-based biome model. *Land Ecol*, 1992, 7(1):27—43.
- [93] Zhou G S, Wang Y H. Global change and climate-vegetation classification: study and review. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24):2587—2593.
- [94] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1 Formulation. *Journal of Hydrology*, 1998, 212—213:198—212.
- [95] Medina J L, Camaco E, Reca J, *et al.* Determination and analysis of regional evapotranspiration in Southern Spain based on Remote Sensing and GIS. *Phys. Chem. Earth*, 1998, 23:427—432.
- [96] Cao M K, Yu G R, Liu J Y, *et al.* Multi-scale observation and cross-scale mechanistic modeling on terrestrial ecosystem carbon cycle. *Science in China, Ser. D. Earth Sciences*, 2005, 48 Supp. I:17—32.
- [97] Chen J M, Leblanc S. A 4-scale bidirectional reflection model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35:1316—1337.
- [98] Wu M X, Wang J D, Xie D H, *et al.* The object-oriented 3-dimensional visual data model in the quantitative remote sensing research on the vegetation. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(4):413—420.
- [99] Anderson M C, Norman J M, Meyers T P, *et al.* An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101:265—289.
- [100] Clark K L, Cropper W P, Gholz H I. Evaluation of Modeled Carbon Fluxes for a Slash Pine Ecosystem: SPM2 Simulations Compared to Eddy Flux Measurements. *Forest Science*, 2001, 49:52—59.
- [101] Williams M, Law B E, Anthoni P M, *et al.* Use of a simulation model and ecosystem flux data to examine carbon-water interactions in ponderosa pine. *Tree Physiology*, 2001, 21: 287—298.
- [102] Morales P, Sykes M T, Prentice C I, *et al.* Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes. *Global Change Biology*, 2005, 11:2211—2233.
- [103] Baldocchi D, Falge E, Gu L, *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, 82:2415—2434.
- [104] Wilson K, Goldstein A, Falge E, *et al.* Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. Forest. Meteorol.*, 2002, 113:223—243.
- [105] Wang J, Yu Q, Lee X H. Simulation of energy and CO₂ fluxes and crop growth at different time steps from hourly to daily. *Hydrological Process*, 2007, 21:2474—2492.
- [106] Massman W J, Lee X H. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 121—144.

参考文献:

- [1] 刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控. 北京: 科学出版社, 1999, 194.
- [2] 孙睿, 刘昌明. 地表水热通量研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(3):434—438.
- [87] 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬. 陆地生态系统碳循环模型研究概述. *应用生态学报*, 2006, 17(11):2189—2195.
- [93] 周广胜, 王玉辉. 全球变化与气候-植被分类研究和展望. *科学通报*, 1999, 44(24):2587—2593.
- [98] 吴门新, 王锦地, 谢东辉等. 植被定量遥感真实结构模型中面向对象的三维可视化数据模型. *遥感学报*, 2005, 9(4):413—420.