

文章编号: 1007-4619(2005)06-0751-09

陆地植被二氧化碳通量尺度扩展研究进展

王培娟, 孙 睿, 朱启疆

(北京师范大学 地理学与遥感科学学院遥感与地理信息系统研究中心, 遥感科学国家重点实验室,
环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 定量的估计陆地植被的光合作用, 是估算作物产量和净初级生产力的基础。简要介绍了当前国内外 CO₂ 通量观测研究的方法以及与尺度问题有关的一些地学问题, 重点阐述了陆地植被气孔导度模型和光合作用模型的尺度扩展以及尺度转化方法, 总结了从植被叶片尺度到冠层尺度的 4 种尺度扩展模型(大叶模型、多层模型、两片大叶模型以及多层一两片大叶模型)以及从冠层尺度到群落尺度的尺度扩展方法, 并对上述模型和方法的适用范围、应用优势以及存在的问题等进行了分析和讨论, 指出对不同的研究对象, 选择合适尺度的模型和参数是研究成败的关键。

关键词: 尺度扩展; CO₂ 通量; 气孔导度; 遥感

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

CO₂ 在全球变暖、全球碳平衡、光合作用、净第一性生产力、气孔行为和水分利用等方面具有非常重要的作用, 对我们赖以生存的地球环境状况具有非常重要的影响^[1], 因此, CO₂ 通量在各种尺度以及尺度转换之间的研究中占有越来越重要的位置^[2]。陆地植被作为陆地生态系统中的重要组成部分与核心环节, 在地表与大气的物质、能量与动量交换以及全球气候变化中扮演着重要的角色^[3-4]。定量的估计陆地植被的光合作用, 是估计作物产量和净生产力的基础^[5]。绿色植物通过光合作用, 吸收空气中的二氧化碳, 将其转变成生物有机碳, 为生物体自身的生存奠定物质基础, 同时绿色植被还释放出氧气, 改善人们赖以生存的环境质量。近年来, 随着各国工业化进程的加剧, 大气中的 CO₂ 含量越来越高, 不断地威胁着我们的生存环境。1984年, 国际地学界就提出了开展广泛合作, 进行地圈-生物圈相互作用的研究, 以揭开科学奥秘, 保护人类赖以生存的地球环境, 并将国际地圈-生物圈计划(International

Geosphere-Biosphere Programme-IGBP)、全球环境变化国际人文计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change-IHDP)、全球气候研究计划(World Climate Research Programme-WCRP)以及国际生物多样性计划(Diversitas)等研究计划共同构成国际全球环境变化的四大研究计划。国际地圈-生物圈计划的核心项目“全球变化与陆地生态系统”(Global Change and Terrestrial Ecosystem-GCTE)正成为当前国际全球变化研究中最活跃和不断扩展的项目^[6]。围绕此核心, 国内外的科研工作者开展了各种各样的科学研究工作, 并取得了一定的成果。

陆地植被光合生产力研究涉及的研究领域非常广, 生物、生理、生态、物理、化学、气象、地理等, 根据其研究目的、研究对象和时间尺度而有差异。光合过程的时间尺度可以从皮秒(10-12s)至上百年, 其空间尺度从分子水平到组织、器官、个体、群体一直到生态系统和生物圈尺度^[1, 7, 8]。对不同的研究对象, 选取不同的时空尺度是研究的基础; 同时, 对同一研究对象, 研究其不同时空尺度的扩展规律也是目前研究的热点和难点问题。本文围绕陆地植被气孔导度和光合作用的尺度扩展模型展开讨论, 重

收稿日期: 2005-02-03; 修订日期: 2005-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(40271081)、北京市自然科学基金重点基金(4051003)、北京市共建项目(SYS100270431)和国家重点基础研究发展规划项目“973计划”(G20000779)。

作者简介: 王培娟(1978-), 女, 北京师范大学在读博士研究生, 主要从事遥感在生态环境中的应用、图像处理等方面的研究, 已发表论文6篇。E-mail: peijuan_wang@163.com.

点介绍了模型的国内外研究进展,分析了不同模型的适用范围及优缺点,阐述了尺度问题在研究中的重要性。

2 CO₂ 通量观测研究

目前,常用的陆地碳通量观测方法主要有箱式法、微气象法和化学法^[9,10]。

箱式法又可分为静态箱式法和动态箱式法。静态箱式法一般用密闭箱扣在被测表面并密封,箱内空气与外界没有任何交换,定量测定箱内被测气体浓度随时间的变化,从而根据定义求取被测表面该种气体的通量。静态箱式法的测定环境受人为干扰,与自然状态不同,动态箱式法主要针对静态箱式法的不足而设计的。其原理是在静态箱相对的两个侧面各开一个小孔,两孔高度不一,一般差 5 cm,以避免造成箱内气体的直接对流,且尽量保证一定流量(流量大小应尽量使箱内外气压一致以保证箱体近地面层空气状况不受明显干扰为准)的气体平稳地流过被测表面,通过测定箱体进出口处的被测气体浓度就可计算被测气体通量。微气象法是通过测量近地面层的湍流状况和被测气体的浓度变化计算被测气体通量的方法。微气象法又可以分为涡度相关法、能量平衡法、空气动力学法和质量平衡法。化学法是通过化学反应对二氧化碳的吸收进行间接测定,也称为碱液吸收法,主要用于测定土壤呼吸作用。

涡度相关技术(eddy correlation technique)是对森林、灌木、草地或农田与大气间进行非破坏性的 CO₂ 湍流通量测定的微气象学技术。近年来,由于涡度相关技术的进步,使长期和连续的涡度相关测定成为可能,并已广泛应用于陆地生态系统 CO₂ 吸收与排放的测定。世界范围大型的碳通量观测网络如 FLUXNET 项目也在 1997 年成立。FLUXNET 有 Ameriflux(南北美洲通量网)、EUROFLUX(欧洲通量网)、Medeflux(地中海通量网)、Asiaflux(亚洲通量网)和 Ozflux(大洋洲通量网)等区域性网络系统加上一些世界其他地区的独立站点组成^[10]。目前,全球通量网络(FLUXNET)内已经有 100 个以上的研究小组主要利用涡度相关技术测定陆地生态系统各种植被与大气间 CO₂、H₂O 和能量通量。中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)是以中国科学院生态系统研究网络为依托,以微气象学的涡度相关技术和箱式气相色谱法为主要技术手段,

进行典型生态系统与大气间 CO₂ 和水热通量长期观测的网络。目前,ChinaFLUX 已经正式启动,拥有 6 个微气象和 16 个箱式气相色谱法观测站,在进行长期通量观测的同时,开展生态系统碳循环和水循环过程的综合研究,并系统收集观测站区的植被、土壤、水文和气象等科学数据^[11]。

3 尺度问题

3.1 尺度的概念

尺度是生态学中的一个基本概念,早已引起了广泛关注。通常意义上的尺度是研究对象或现象在空间上或时间上的量度,即空间尺度和时间尺度^[12]。尺度的存在根源于地球表层自然界的等级组织和复杂性,本质上是自然界所固有的特征或规律,而为有机体所感知。遥感中的尺度更多的属于生态学领域,与地理学或地图学中的比例尺(Scale)不同,并且表现为相反的含义。大尺度通常指较大的空间范围,对应于小比例尺、低分辨率;而小尺度则对应于大比例尺、高分辨率。尺度的概念主要有以下几个基本特征^[13]:

(1)多维性与二重性。遥感中的尺度主要指空间和时间两个维度,表现为时空二重性特征。自然界中,自然现象和过程的空间和时间尺度是紧密相关的,一定空间尺度内的实体都有一定的形成演化过程,从而也就与一定的时间尺度相对应。将二者结合起来就能够更为充分地获得研究对象的信息,也就更有助于揭示和把握其规律性。

(2)层次复杂性。尺度层次复杂性是地表自然界等级组织和复杂性的反映。地表自然界的发展演化是一个系统性的复杂过程。因而在研究中也应该构筑相应的尺度体系。

(3)变异性。所研究的对象在不同尺度上会表现出不同的特征,正是这种变异性增加了跨尺度预测的难度。

3.2 尺度效应

地球空间信息科学异于一般意义上信息科学的主要特点在于其研究对象的特殊性。地球表面空间是一个复杂的巨系统而且与人类的关系极为密切。因而我们所需要的地表空间信息在时间上和空间上的分辨率都有极大的跨度,在某一尺度上人们观察到的性质,总结出的原理或规律,在另一尺度上可能仍然有效,可能相似,也可能需要修正^[14],因此需要

进行尺度效应的研究。定量地学描述的是地学与其他学科交叉的基础,是遥感科学研究中的关键。国外的尺度效应研究基本上仍停留在不同尺度同一种量的线性或非线性关系的经验研究水平上^[14-16]。

3.3 尺度分析

尺度分析主要面临两方面的问题,即怎样进行尺度选择和如何完成尺度间的转换与推绎。这两方面的问题紧密联系、相辅相成^[13]。

尺度选择是进行研究的起点和基础,关系到研究中实验的设计、信息的收集、研究方法的确定以及模型的选择等。遥感测量尺度往往是根据对地观测的主要目标与观测系统的工程可行性和运行经济性折中设定的^[17],对于特定的应用来说,选择正确/合适的尺度(空间分辨率)需要考虑下列因素:需要的地表景观信息,用来提取信息的方法和地表景观的空间结构^[18]。

尺度转换(Scaling)就是跨越不同尺度的辨识、推断、预测或推绎。不同尺度上研究实体和过程的性质受约于相应的尺度,每一尺度上都有其约束体系和临界值。经典等级理论认为,尺度转换必然要超越这些约束体系和临界值,转换后所获得的结果将很难理解^[19,20]。不同尺度的系统之间存在着物质、能量和信息的交换与联系,正是这种联系为尺度转换提供了客观依据。遥感的空间尺度转换主要包括两个方面:尺度上推(upscaling),从高分辨率向低分辨率转化的过程;尺度下推(downscaling),从低分辨率向高分辨率转化的过程^[21]。这两种不同尺度的模型之间的尺度转换问题已经引起了众多科研工作者的重视,逐步成为遥感科学研究的热点和难点问题。

4 尺度扩展模型研究

尺度扩展包括时间扩展和空间扩展两个积分过程^[22]。为了预测冠层对环境扰动的长期响应(例如:全球 CO₂ 浓度增加),不仅需要知道叶片的光合和呼吸过程,而且要理解植物的根在植物的呼吸、生长和再生中的作用,这是时间尺度扩展研究的问题;空间尺度的扩展主要是将冠层内所有叶片的辐射通量、CO₂ 通量、水热通量积分到整个冠层,从而扩展到群落、全球尺度。

叶片、冠层的生理过程大致包括能量传输过程、物质交换过程和生理调节过程三大过程,对应于光

合作用模型、气孔导度模型和蒸腾蒸散模型。目前,很难严格区分植物的光合作用模型和蒸腾作用模型,因为两者是相互依赖的,有些耦合模型可同时模拟光合速率、蒸腾速率和气孔导度等,从而能够实现叶片尺度碳水耦合的碳水过程模拟^[23]。

对陆地植被碳通量的研究,主要是从植物的光合作用入手,研究植物的光合作用强度,进而得到植被的净吸收碳量。目前,植物光合作用的模拟和研究已经从经验模型发展到过程模型,从研究单叶片的光合作用发展到整个冠层尺度,进而发展到群落尺度,植被光合作用的时空尺度扩展(scaling up)问题,引起越来越多的科研工作者的关注,在尺度转换的过程中带来的反馈机制的变化、以及寻求在模型简化和机理完善之间恰当的平衡,是目前植被光合作用模拟研究的热点和难点。

4.1 气孔导度子模型的尺度扩展研究

当只考虑植被的蒸散量,忽视植被气孔阻力与光合作用的耦合关系时,通常采用阶乘计算模式来估算气孔导度^[24]。阶乘计算模式最初由 Jarvis 提出,认为作物叶片气孔导度(g_s)同时受太阳辐射强度(S_0)、空气的饱和水汽压差(VPD)、空气温度(T_a)和根系的土壤水势(v)等因素的影响,即:

$$g_s = g_{sm} f(S_0) f(T_a) f(VPD) f(v) \dots \quad (1)$$

式中, g_{sm} 是叶片最大气孔导度, f 函数表示气孔导度随各因子变换的订正值,在 0-1 之间变化。这种模式形式直观,曾在植物的蒸腾模式中被广泛使用,但他的缺点是机理意义不明确,考虑的因子越多,参数的确定越困难,各个因子之间的相互作用也越复杂^[8]。

当需要模拟植被叶片光合作用过程和 CO₂ 通量时,一般采用气孔导度光合作用模式和 CO₂ 通量计算模式^[24]。气孔导度叶片光合的耦合模式最初由 Ball 和 Berry 提出,他们认为气孔导度(g_s)是叶片净 CO₂ 吸收速率(A_n)、叶片表面空气中的相对湿度(h_s)和空气中 CO₂ 摩尔比(C_s)的函数,在植物水分不亏缺的条件下,有:

$$g_s = m \frac{A_n h_s}{C_s} + b \quad (2)$$

式中, m 和 b 是回归系数,此计算模式称之为 Ball-Berry 模型。由于叶片蒸腾失水和饱和水汽压差(VPD)的关系比叶面相对湿度(h_s)密切,Leuning R. 使用 VPD 替代了 h_s ,进一步修正 Ball-Berry 模型,气孔导度由下式计算:

$$g_s = g_0 + \frac{a_1 A_n}{(C_s - \Gamma^*) \left(1 + \frac{VPD}{VPD_0} \right)} \quad (3)$$

式中, Γ^* 是 CO_2 补偿点, VPD 是叶片表面饱和水汽压差, VPD_0 是经验参数。 g_0 和 a_1 是参数。其中, $1/a_1 = 1 - C_i/C_s$, C_s 是叶片表面的 CO_2 分压, C_i 是细胞内部的 CO_2 分压。

张永强将上述模型扩展到冠层尺度, 得到了冠层导度 (g_c) 冠层光合 ($A_{n,c}$) 耦合模式^[25]:

$$g_c = a' \frac{A_{n,c} P_a}{(C_s - \Gamma^*) \left(1 + \frac{VPD}{VPD_0} \right)} + b' LAI \quad (4)$$

式中, a' , b' 是回归系数, P_a 是大气压, Γ^* 是 CO_2 补偿点 (P_a), VPD_0 是经验系数 (1500Pa)。 C_s 可通过大气的 CO_2 分压 (C_a) 和叶片边界层导度 (g_b) 计算, 有:

$$\frac{C_a - C_s}{P_a} \frac{g_b}{1.4} = A_{n,c} \quad (5)$$

研究中, 将冠层光合作用和蒸腾作用通过冠层导度耦合起来, 建立一个耦合的冠层光合导度蒸散模型 (CPCEM), 结果显示模型模拟的 CO_2 通量与涡度相关实测结果非常一致, 潜热通量与涡度相关系统实测的结果变化比较一致, 但模拟结果比实测结果高。

4.2 光合作用子模型的尺度扩展研究

4.2.1 叶片到冠层水平的 CO_2 通量尺度扩展研究

在植物器官、个体尺度的生理生态学过程模型中, 叶片尺度的过程模型发展得最为完善。许多较大尺度的模型多在叶片模型的基础上扩展而成。20世纪80年代, Farquhar等人提出了叶片光合作用的生化模型^[26], 这种模型基于羧化和电子传递两个光合作用, 也即叶绿体的光合速率分为受 Rubisco活性限制的光合作用速率 (J_c) 和由 RuBP再生速率限制的光合作用速率 (J_r), 它依赖于电子传递速率, 主要由光量子通量密度 (PFD) 和叶肉细胞 CO_2 浓度 (C_i) 决定, 奠定了较大尺度模型的基础^[8]。

目前, 广泛应用的叶片水平到冠层水平尺度扩展的光合作用模型主要有大叶模型 (Big-Leaf Model)、多层模型 (Multi-layer Model)、两片大叶模型 (Two-Big-Leaf Model) 和多层两片大叶模型 (Multilayer-Two-Big-Leaf Model)。

(1) 大叶模型 (Big-Leaf Model)

大叶模型把陆地植被冠层简化为一片大叶, 不

考虑植被冠层内部太阳直射光和漫射光的散射、反射等相互作用。大叶模型需要的参数不能通过实际测量获得, 由于参数的非线性关系, 也不能通过简单的算术平均获得^[22]。在实际应用中, 通常是根据已有的先验知识假设冠层中的参数, 例如, Farquhar假设冠层内叶片的光合作用和吸收的光合有效辐射分布是完全相同的, 利用单叶片的光合作用模型就可以计算整个冠层的光合作用。Jeffrey S Amthor利用大叶模型分析了叶片的物理、生理、化学特性, 考虑植被和环境之间的相互作用, 定量地预测了冠层和群落植被对环境变化的响应。分析结果认为: 叶片和冠层的光合作用受到吸收的光量子通量密度 (PPFD, Photosynthesis Photon Flux Densities)、大气中的 CO_2 压力、大气到叶绿体的 CO_2 导度、冠层温度和冠层中叶片氮含量等因素的限制^[27]。Sellers开发了 SB2模型, 该模型具有明确的物理学、植物生理生化以及生态学基础, 并与遥感技术相结合, 可以用于估计全球的植被生产力^[28]。

但是, 上述模型由于没有考虑冠层内部的相互作用, 具有如下缺点^[29-31]:

①没有考虑冠层垂直结构的变化。由于整个冠层的光合作用速率、气孔传导和氮元素的分布是不均匀的, 因此对整个冠层来说不能用一个固定的常量来代替。大量的研究表明, 冠层内部的光合作用速率、气孔导度和氮元素的分布与冠层顶部到冠层内某一深度的累积叶面积指数有关, 一般而言, 与累积叶面积指数呈指数递减;

②冠层内部各片叶子的受光情况不同, 导致冠层内部各叶片的温度也不相同, 也不能用某一片叶子的温度值作为冠层叶片的温度值来计算整个冠层的光合作用;

③叶片光合作用的光量子响应是非线性的, 不能使用一片叶子的平均吸收辐射作为计算冠层光合作用的基础。

由于大叶模型上述缺点的存在, 致使整个冠层光合作用的估计值偏高, 从而导致冠层 CO_2 通量的估计值偏高。

(2) 多层模型 (Multi-layer Model)

植被的能量和物质的传输必须通过冠层, 对于高大的植物, 层次的意义更加重要。多层模型关注植物和环境的垂直结构, 把整个冠层看成是一个水平均一、垂直分层的实体, 将冠层垂直地分为若干层, 所有的结构参数、物理参数、生理参数仅在垂直方向变化, 他们在叶片级别上都是可测量的, 仅需要

知道一些参数(例如入射辐射、温度、湿度差、边界层导度)的空间分布。这样,在计算每层的 CO_2 通量时,可以采用前面提出的大叶模型,然后将所有层的计算结果累加得到整个冠层^[22]。Balocchi D. D. 和 Harley P. C. 利用多层积分模型计算了从叶片到冠层的 CO_2 和水汽的光合(光合作用、气孔导度、土壤根和树干的呼吸)过程、微气象(辐射传输、扰动传输和表面能量交换)过程。利用该方法,计算了温带阔叶林的光合和蒸发,并用观测的数据进行了实地验证^[32, 21]。

但是,多层模型也存在着诸多的不足:

①计算时需要耗费大量的时间,对计算机的配置要求比较高;

②计算时没有考虑不同受光条件下叶片温度的差异,仅仅是将大叶模型用在多层冠层中;

③在应用多层模型时,模型需要的参数需要逐层考虑,这就给模型的参数化带来很大困难;

④将整个冠层分为若干层时,没有考虑各层之间的相互作用,仅仅是对各层的计算结果进行简单叠加,违背了大自然的相互作用和反馈机制。

(3) 两片大叶模型 (Two-Big-Leaf model)

为了解决大叶模型和多层模型在冠层内部不同受光条件下叶片温度的不同,许多研究者提出了两片大叶模型 (Two-Big-Leaf model), 将冠层内的所有叶片分为两大类:受光叶片 (sunlit leaves) 和背光叶片 (shaded leaves)。研究发现,受光条件相同的叶子其 CO_2 浓度和叶片温度基本相同,对 CO_2 通量和接收到的净辐射的贡献也基本相同,而不同受光条件的叶子之间上述值则存在很大的差别^[33]。于是,将冠层内的所有叶子区分为受光叶片和背光叶片,其权重值为各部分的叶面积在整个冠层中的比值,根据冠层的叶面积指数,计算整个冠层的 CO_2 通量。这一方法可以表述如下:

$$A_{\text{conopy}} = A_{\text{sun}} \text{LAI}_{\text{sun}} + A_{\text{shade}} \text{LAI}_{\text{shade}} \quad (6)$$

其中, A_{conopy} 为植被冠层的光合作用总量; A_{sun} 和 A_{shade} 分别为受光叶片和背光叶片的光合作用量; LAI_{sun} 和 $\text{LAI}_{\text{shade}}$ 分别表示受光叶片和背光叶片的叶面积指数。

Joon K in 和 Shashi B. Vema 利用冠层辐射传输模型,分别计算了冠层受光叶片和背光叶片的光合作用,并考虑了土壤的呼吸作用,将模型模拟的结果与涡度相关观测的结果相比较,发现在水分供应充足的条件下,模型模拟的结果与地面实测的结果吻合得比较好,但是在水分胁迫的条件下,模型模拟

的结果会比实测的结果偏高;采用同样的方法计算冠层的气孔导度,结果与实测结果吻合的很好^[34]。Wang Y. P. 和 Leuning R. 利用提出的一层、两片大叶模型分别计算了冠层的受光叶片和背光叶片的感热通量、显热通量和 CO_2 通量,他采用的模型包括:一个简单的鲁棒的辐射模型和一个改进的叶片模型,来解释气孔导度和光合作用之间的相互作用,解释气孔对水汽压差和可利用的土壤水分的响应;使用叶片能量平衡方程的简单解作为辐射导度的新参数。最后,将利用一层、两片大叶模型计算的结果与利用多层模型计算的结果进行比较,发现在中性气候条件下,小麦冠层的感热通量、显热通量和 CO_2 通量的误差都控制在 5% 以内,但计算时间与多层模型相比,则节省了 10 倍^[33]。Leuning R. 等人在小麦生长期对 2 块小麦地(一块为施了肥的小麦地,一块为受控制的麦田)的 228 个测量样点进行微气象通量数据的观测,研究结果表明,利用一层、两片大叶模型模拟的结果与地面实际测量的结果在辐射通量、潜热通量和 CO_2 通量之间吻合的非常好,但感热通量的结果不是很理想^[35]。一层、两片大叶模型需要较少的参数,很适合于合并到区域乃至全球尺度的气候模型中。Wang Y. P. 和 Leuning R. 在 1998 年提出的模型中,与多层模型相比,会高估受光叶片每小时的光合、潜热通量和冠层导度,低估每小时的感热通量,平均误差一般为 5%。为了克服模型的上述缺点, Wang Y. P. 在 2000 年又提出了一个改进的两片大叶模型,将受光叶片的光合作用区分为受 Rubisco 羧化作用控制的光合作用和受 RuBP 再生限制的光合作用两种类型。研究发现,受光叶片的上部,主要是受 RuBP 再生限制,在受光叶片的下部,主要是受 Rubisco 羧化作用控制,因此将受光叶片分为两部分单独计算他们的光合作用,平均误差为 3%,计算时间仅比两片大叶模型多 1%^[36]。Chen J. M. 等利用两片大叶模型对加拿大北方森林的 NPP 进行模拟和估算,取得了很好的结果^[37, 38]。Dai Yongjiu 提出了分别计算受光叶片和背光叶片的光合作用、气孔导度、叶片温度和能量通量的一层、两片大叶模型,并将此模型合并到两层的通用陆地模型中 (CLM 2L Common Land Model 2 Layers),计算结果显示,两层的 CLM 在热带常绿阔叶林和北方针叶林两种树种中比一层的 CLM (CLM 1L) 有了很大的改进^[18]。

(4) 多层 两片大叶模型 (Multilayer Two-Big-Leaf Model)

在复杂的多层模型中,不仅考虑冠层内部各层之间、以及冠层和空气之间的相互反馈作用,并且在计算每一层的光合作用时,又将受光叶片 (sunlit leaves) 和背光叶片 (shaded leaves) 分开考虑,也就是说在计算每一层的冠层 CO_2 通量时,采用了两片大叶模型,而后又将每层的计算结果累加得到整个冠层的 CO_2 通量。Leuning R. 利用数值方法得到了植被冠层内各层的同化、气孔导度、净辐射、蒸腾、感热传输和叶片温度的耦合解,所用模型的关键特征是:假设叶倾角分布为球形的条件下,分别计算受光叶片和背光叶片的辐射吸收;利用同化和气孔导度的耦合方程,解叶片能量平衡方程,解释叶片温度对同化和导度的影响;利用了冠层内氮元素浓度的指数分布特征;利用五点高斯积分技术求解整个冠层的通量值。同时,Leuning R. 还对模型中的重要参数进行了敏感性分析,设定了参数的边界条件^[22]。肖文发根据野外条件下对杉木针叶光合作用的测定结果,考虑光合作用对光的非线性响应特性,及其所处的实际冠层环境变量和冠层的空气动力学特性的相关关系,以简化的林冠辐射传输模型为基础,结合不同部位和年龄针叶的光响应曲线,实现了叶室测量结果向冠层环境的调整,并进行了冠层光合作用模拟的初步研究。认为该方法可以对冠层光合作用及物质生产进行不同时间和空间尺度上的理论模拟和计算^[39]。然而,多层模型需要消耗大量的计算时间,并且其计算精度与两片大叶模型相比,提高并不显著。

因此,在实际应用过程中,可以根据应用研究的目的和需要,选取合适的模型,计算冠层的 CO_2 通量。

4.2.2 冠层到像元水平的 CO_2 通量尺度扩展研究

遥感技术优越于其他技术的最主要的方面是遥感能够快速、准确的监测地表的宏观信息,因此,将微观尺度研究的成果推广到遥感影像的像元尺度,进行自然界的快速、宏观监测,才能充分发挥遥感技术的优势,更好地为人类服务。

对陆地植被 CO_2 通量的研究来说,从冠层尺度到遥感影像像元尺度扩展的难点是:

(1)混合像元问题。在冠层的尺度上,研究都是基于纯净的、覆盖均匀的冠层进行的;而在遥感影像的像元尺度上,由于遥感数据空间分辨率的限制,使得遥感影像中的混合像元大量存在,为了准确地将研究区域从冠层尺度扩展到遥感影像的像元尺度,需要对遥感数据进行混合像元处理。从遥感数

据入手,对于混合冠层,需要区分冠层的类别及其所占的比例,对于稀疏植被覆盖区,需要知道植被在像元中所占的比例,从而能够精确的计算出植被的 CO_2 通量。

(2)尺度转换过程中的参数扩展。由于从叶片到冠层尺度的扩展需要的参数都是叶片尺度上的,而冠层到像元水平的尺度扩展需要提供冠层尺度,甚至是像元尺度的参数。在地面数据的采集过程中,获取冠层或像元尺度的数据要比获取叶片尺度的数据复杂得多,这就为参数的准备和扩展提供了难度。

在模型的应用时,需要考虑模型参数的尺度范围,针对所研究对象的尺度,选择合适的参数尺度是模型应用的关键环节。Liu J 等利用遥感数据(每 10 天的叶面积指数、每 10 天的 NDVI 土地覆盖类型)、气象数据(温度、入射的短波辐射、降水、湿度)和土壤数据(田间持水量)等作为过程模型(BEPE Boreal Ecosystem Productivity Simulator)的输入参数,计算了 1993 年加拿大 Quebec 省的净第一性生产力(NPP, Net Primary Productivity)和蒸散(ET, evapotranspiration)^[40]。孙睿、周宇宇和冯险峰应用 BEPS 模型分别采用 TM、ASTER 和 MODIS 数据,计算了长白山、祁连山和全国的 NPP 和 ET^[41, 42, 23],对长白山和祁连山地区的 NPP 模拟结果利用实测数据进行验证, R^2 分别为 0.8014 和 0.7023,达到了预期的精度要求,对全国的 NPP 和 ET 进行敏感性分析,认为模拟偏差主要来源于 LAI 数据的误差,这就为我们今后的参数准备工作提供了参考。Waring R. H. 利用量子利用效率模型,结合遥感数据,估计了 Harvard 森林总生态系统生产力(GEP, Gross Ecosystem Productivity),并将模型的计算结果与涡度相关观测的结果进行比较,显示出高度的一致性, R^2 在 1991 和 1992 年分别为 0.97 和 0.99^[43]。Chen J. M. 等分析认为大叶模型在估算冠层的光合作用时,利用冠层导度代替气孔导度,极大的抑制了冠层的同化速率,同时,叶片光合作用对气象变量的响应是非线性的,在对光合作用的日间变化进行计算时,如果不考虑日内光合作用的变化,就会产生很大的计算误差。由于各种误差之间的相互抵消作用,大叶模型对冠层光合作用的季节变化进行估算比较适合,但对冠层光合作用日间变化的估算则存在着偏差,因此,他对加拿大北部森林采用两个大叶光合作用模型,考虑了气象变量的日内变化,对冠层进行了时间和空间尺度的扩展,模拟结果利用地面

实测的 163 个数据点进行验证, R^2 达到 0.8129^[44]。

5 结 论

CO₂ 通量的研究近年来逐渐成为世界各国关注的焦点, 主要围绕着全球变暖、CO₂ 浓度升高等一系列与人民生活息息相关的现状, 展开各种各样的科学研究, 找到解决问题的最佳办法和途径。研究者们经过长期的研究, 在观测手段、模型计算等方面已经取得了很大的进展, 由于人们越来越多的希望从宏观的角度了解 CO₂ 的时空变化, 卫星遥感资料在研究中的作用也越来越大, 并且方法也越来越成熟。随着遥感数据应用的推广, 地面观测点上的数据与遥感监测面上的数据之间的尺度转换关系, 也成为当今研究的热点和难点问题。不同尺度的数据之间并不是一种简单的线性关系, 因此研究一种行之有效的空间尺度转换方法是非常必要的。同时, 如何实现地面观测的瞬时数据向长的时间段的扩展, 亦即时间尺度转换, 也成为我们所关心的热点问题。

参 考 文 献 (References)

- [1] Yang X, Wang M X. Review of Several Aspects of Terrestrial Carbon Cycling [J]. *Advance in Earth Sciences* 2001, **16**(3): 427-435. [杨昕, 王明星. 陆面碳循环研究中若干问题的评述 [J]. *地球科学进展*, 2001, **16**(3): 427-435.]
- [2] Harley P C, Baklochki D D. Scaling Carbon Dioxide and Water Vapour Exchange from Leaf to Canopy in a Deciduous Forest - I. Leaf Model Parameterization [J]. *Plant Cell and Environment* 1995, **18**: 1146-1156.
- [3] Sun R, Zhu Q J. Distribution and Seasonal Change of Net Primary Productivity in China from April 1992 to March 1993 [J]. *Acta Geographica Sinica* 2000, **55**(1): 36-45. [孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究 [J]. *地理学报*, 2000, **55**(1): 36-45.]
- [4] Tao B, Ge Q S, Li K R, et al. Progress in the Studies on Carbon Cycle in Terrestrial Ecosystem [J]. *Geographical Research* 2001, **20**(5): 564-575. [陶波, 葛全胜, 李克让等. 陆地生态系统碳循环研究进展 [J]. *地理研究*, 2001, **20**(5): 564-575.]
- [5] Ghassen Asrar. Theory and Applications of Optical Remote Sensing [M]. A Wiley-interscience Publication. New York: Chichester Brisbane Toronto Singapore 1989.
- [6] Zhang X S, Zhou G S, Gao Q, et al. Study of Global Change and Terrestrial Ecosystems in China [J]. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences Beijing), 1997, **4**(1-2): 137-144. [张新时, 周广胜, 高琼等. 中国全球变化与陆地生态系统关系研究 [J]. *地学前缘*, 1997, **4**(1-2): 137-144.]
- [7] Jarvis P G. Scaling Processes and Problems [J]. *Plant Cell and Environment* 1995, **18**: 1079-1089.
- [8] Yu Q, Xie X Q, Sun S F, et al. Advances in Simulation of Plant Photosynthetic Productivity and Canopy Evapotranspiration [J]. *Acta Ecologica Sinica* 1999, **19**(5): 744-753. [于强, 谢贤群, 孙淑芬等. 植物光合生产力与冠层蒸散模拟研究进展 [J]. *生态学报*, 1999, **19**(5): 744-753.]
- [9] Qin D H. Global Carbon Cycling [M]. Beijing: China Meteorological Press 2003. [秦大河. 全球碳循环 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [10] Yu G R. Global Change Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem [M]. Beijing: China Meteorological Press 2003. [于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.]
- [11] Wen X F, Yu G R, Sun X M. Uncertainties in Long Term Studies of Net Ecosystem CO₂ Exchange with the Atmosphere Based on Eddy Covariance Technique [J]. *Advances in Earth Science* 2004, **19**(4): 658-663. [温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的不确定性 [J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(4): 658-663.]
- [12] Wu J G. Landscape Ecology: Concepts and Theories [J]. *Chinese Journal of Ecology* 2000, **19**(1): 42-45. [郭建国. 景观生态学——概念与理论 [J]. *生态学杂志*, 2000, **19**(1): 42-45.]
- [13] Lü Y H, Fu B J. Ecological Scale and Scaling [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2001, **21**(12): 2096-2105. [吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法 [J]. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2096-2105.]
- [14] Li X W, Wang J D, Strahler A H. Scale Effects of Plank Law over Non-isothermal Blackbody Surface [J]. *Science in China Series E* 1999, **42**(6): 652-656.
- [15] Li X W. Observe the Earth in Multi-angle and Thermal Infrared Remote Sensing [M]. Beijing: Scientific Publishing House 2001. [李小文. 多角度与热红外对地遥感 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [16] Li X W, Wang J D, Strahler A H. Scale Effects and Scaling up by Geometric-optical Model [J]. *Science in China Series E*, 2000, **43**(supp): 17-22.
- [17] Su L H, Li X W, Huang Y X. An Review on Scale in Remote Sensing [J]. *Advance in Earth Sciences* 2001, **16**(4): 544-549. [苏理宏, 李小文, 黄裕霞. 遥感尺度问题研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2001, **16**(4): 544-549.]
- [18] Dai Y J, Robert E, Wang Y P. A Two-Big-Leaf Model for Canopy Temperature Photosynthesis and Stomatal Conductance [J]. *Journal of Climate* 2004, **17**(12): 2281-2299.
- [19] Yue T X, Liu J Y. Issues on Multi-Scales in Ecogeographical modeling [J]. *Quaternary Sciences* 2003, **23**(3): 256-261. [岳天祥, 刘纪远. 生态地理建模中的多尺度问题 [J]. *第四纪研究*, 2003, **23**(3): 256-261.]
- [20] Guo D Z, Fang T, Du P J, et al. Hierarchical Structure and Scaling for Complex System [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2003, **32**(3): 213-217. [郭达志, 方

- 涛, 杜培军等. 论复杂系统研究的等级结构与尺度推绎 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, **32**(3): 213–217.]
- [21] Liang S L. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces[M]. New Jersey: A John Wiley & Sons INC., Publication, 2004.
- [22] Leuning R, Kelliher F M, De Pury D G G, et al. Leaf Nitrogen, Photosynthesis, Conductance and Transpiration: Scaling from Leaves to Canopies [J]. *Plant Cell and Environment* 1995, **18**: 1183–1200.
- [23] Feng X F. Simulating Net Primary Productivity and Evapotranspiration of Terrestrial Ecosystems in China Using a Process Model Driven by Remote Sensing[D]. Doctoral Thesis in Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2004. [冯险峰. 基于过程的中国陆地生态系统生产力和蒸散遥感研究 [D]. 中国科学院地理科学与资源研究所博士论文, 2004.]
- [24] Luo Y, Yu Q, Ouyang Z, et al. Water Heat CO₂ Flux and Photosynthesis Model in SPAC: (I) Modeling [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 2001, (2): 90–97. [罗毅, 于强, 欧阳竹等. SPAC系统中的水热 CO₂ 通量与光合作用模型: (I) 模型建立 [J]. 水利学报, 2001, (2): 90–97.]
- [25] Zhang Y Q. Water and Heat Transfer Mechanics in the Soil-Atmosphere Continuum and Regional Evapotranspiration Model [D]. Doctoral Thesis in Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2004. [张永强. 土壤-植被-大气系统水、热传输机理及区域蒸散模型 [D]. 中国科学院地理科学与资源研究所博士论文, 北京: 2004.]
- [26] Farquhar G D, Vammerer S, von Berry J A. A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C³ Plants [J]. *Planta* 1980, **147**: 78–90.
- [27] Jeffrey S Amthor. Scaling CO₂ Photosynthesis Relationships from the Leaf to the Canopy [J]. *Photosynthesis Research* 1994, **39**: 321–350.
- [28] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A Revised Land Surface Parameterization (SIB²) for Atmospheric GCMs Part II: The Generation of Global Fields of Terrestrial Biophysical Parameters from Satellite Data [J]. *Journal of Climate* 1996, **9**: 706–737.
- [29] Sellers P J, Berry J A, Collatz G J, et al. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration: III. A Reanalysis Using Improved Leaf Models and a New Canopy Integration Scheme [J]. *Remote Sensing of Environment* 1992, **42**: 187–216.
- [30] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A Revised Land Surface Parameterization (SIB²) for Atmospheric GCMs Part I: Model Formulation [J]. *Journal of Climate* 1996, **9**: 676–705.
- [31] Spitters C J T. Separating the Diffuse and Direct Component of Global Radiation and its Implications for Modelling Canopy Photosynthesis Part II: Calculation of Canopy Photosynthesis [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 1986, **38**: 231–242.
- [32] Baklocchi D D, Harley P C. Scaling Carbon Dioxide and Water Vapour Exchange from Leaf to Canopy in a Deciduous Forest II: Model Testing and Application [J]. *Plant Cell and Environment* 1995, **18**: 1157–1173.
- [33] 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 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 1998, **91**: 89–111.
- [34] Kin J, Vem a S B. Modeling Canopy Photosynthesis: Scaling Up from a Leaf to Canopy in a Temperate Grassland Ecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 1991, **57**: 187–208.
- [35] Leuning R, Dunin F X, Wang Y P. A Two-Leaf Model for Canopy Conductance, Photosynthesis and Partitioning of Available Energy II: Comparison with Measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 1998, **91**: 113–125.
- [36] Wang Y P. A Refinement to the Two-Leaf Model for Calculating Canopy Photosynthesis [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2000, **101**: 143–150.
- [37] Chen J M, Chen W, Liu J, et al. Annual Carbon Balance of Canada's Forests During 1895–1996 [J]. *Global Biogeochemical Cycle* 2000, **14**: 839–849.
- [38] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net Primary Productivity Mapped for Canada at 1 km Resolution [J]. *Global Ecology & Biogeography* 2002, **11**: 115–129.
- [39] Xiao W F. A Study on Photosynthesis Modeling and Scaling up from a Leaf to Canopy in a Chinese Fir Plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica* 1998, **18**(6): 621–628. [肖文发. 杉木人工林单叶至冠层光合作用的扩展与模拟研究 [J]. 生态学报, 1998, **18**(6): 621–628.]
- [40] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-Based Boreal Ecosystem Productivity Simulator Using Remote Sensing Inputs [J]. *Remote Sensing of Environment* 1997, **62**: 158–175.
- [41] Sun R, Chen J M, Zhu Q J, et al. Spatial Distribution of Net Primary Productivity and Evapotranspiration in Changbaishan Natural Reserve China Using Landsat ETM+ Data [J]. *Can. J. Remote Sensing* 2004, **30**(5): 731–742.
- [42] Zhou Y Y. LAI Reversion NPP Simulation: Measurement and Validation with Field Data [D]. Master Thesis in Beijing Normal University, 2004. [周宇宇. LAI反演和 NPP模拟及地面测量和验证 [D]. 北京师范大学硕士论文, 2004.]
- [43] Waring R H, Law B E, Coulten M L, et al. Scaling Gross Ecosystem Production at Harvard Forest with Remote Sensing: a Comparison of Estimates from a Constrained Quantum-use Efficiency Model and Eddy Correlation [J]. *Plant Cell and Environment* 1995, **18**: 1201–1213.
- [44] Chen J M, Liu J, Cihlar J, et al. Daily Canopy Photosynthesis Model Through Temporal and Spatial Scaling for Remote Sensing Application [J]. *Ecological Modeling* 1999, **124**: 99–119.

A Review on Scaling of CO₂ Flux in Terrestrial Vegetation

WANG Pei-juan, SUN Rui, ZHU Qi-jiang

(Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China)

Abstract It is fundamental to calculate photosynthesis of terrestrial vegetation quantitatively for estimating agricultural and terrestrial ecosystem net primary productivity. In this paper, some methods of observing CO₂ flux and some problems of scaling on geography in the world are reviewed briefly, and stomata conductance model and photosynthesis model are analyzed in detail. At the same time, four kinds of upscaling models from leaf to canopy (big-leaf model, multi-layer model, two-big-leaf model, and multi-layer-two-big-leaf model) and some upscaling methods from canopy to community are summarized at length. Advantages and disadvantages are analyzed for all the models and methods, through which a conclusion was drawn that the key of the success in remote sensing researches is how to select suitable models and parameters according to different objects.

Key words scaling; CO₂ flux; stomata conductance; remote sensing