

生态边界层水热交换模型及模拟研究进展^{*}

江学顶¹, 黄锦灿², 郭 烁¹, 夏北成¹

(1. 中山大学环境科学系, 广东 广州510275; 2. 佛山市南海气象局, 广东 佛山 528200)

摘要: 分析了1950年以来关于生态边界层水热交换及耦合模型的发展过程, 并把生态边界层水热交换模型研究分为4个阶段, 即水桶模式与陆面过程、考虑生态边界层的生物物理过程的植被微气象模式(BATS和SiB模式)、考虑植被的生物化学过程的模式、水热模式和气候模式及生态模式的初步融合。最后对该领域的研究存在的问题进行了综合分析, 并提出了新的发展方向。

关键词: 生态边界层; 水热交换模式; 陆面过程

中图分类号: P404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2005)S1-0322-05

1 生态边界层及其与环境系统的关系

生态系统中生物与环境之间存在一特殊的“物质薄层”^[1,2], 其物质的物理属性既受外界环境的影响, 也受生物生命活动的直接影响, 把这一特殊的物质薄层称为生态边界层^[3]。陆生植物地上部分的生态边界层是与植物紧密相连的空气薄层, 地下部分的生态边界层是与植物根系相接触的土壤薄层, 水生植物的生态边界层是与生物体相接触的水薄层。区域水分交换模式考虑的是, 在一定区域内, 含水量变化率与其水分收支状况的平衡问题, 其对生态边界层的研究具有重要的理论和实际意义。在不考虑人为影响的条件下, 含水量的变化包括土壤、植被、大气含水量的变化; 水分的收入包括云雾降水、地表与地下径流带来的水分、大气运动输送的水分等; 水分的支出包括地表蒸发与植被蒸腾、地表与地下径流、大气运动输送的水分等。此外, 在这种过程中, 还存在土壤—植被—大气系统的内部作用, 如植物根系的抽吸作用等。生态边界层的研究就是解决覆盖地球表面的森林、农田、水域、荒漠等陆地生态系统与大气相互作用的问题, 揭示陆地生态系统对低层大气流场的热力和动力学效应, 揭示边界层气象学模式设计中的地表参数化过程, 还应揭示变化了的大气环境对生态系统结构、功能和终极生产力的影响。全球大气环流模式(GCM)和区域气候模式(RCM)以陆—气的能量交换作为边界层条件, 而陆面过程模拟(LSM)是以地表参数化过程为基础来实现陆—气能量交换, 在LSM中, 水分散失过程的模拟是重要的一

环。大气中的热能及水汽主要是通过边界层的湍流运动输送获得。所以, 生态边界层水分散失过程的模拟对湍流、大气稳定度、大气水平运动(风)、大气抬升、温度和湿度的变化等有重要影响。生态边界层水分散失过程中, 地面蒸发、潜热交换、水汽水平汇集、对流降雨等都与植被生长、覆盖度、生态系统功能、区域气候及地面能量平衡等直接相关。只有对土壤和植被及大气边界层中的水热平衡、土壤与植被、植被与生态边界层的水汽和能量交换的各个环节进行研究, 才能对生态边界层的作用过程及其结构功能认识清楚。

近50年来, 国内外对不同时空尺度、不同陆面条件和气候状况下的水分散失过程进行了深入研究, 在其物理和生物过程考虑的全面性与复杂性、在生态系统能量交换、生态动力学模拟的模式、生态边界层模拟的时空尺度等方面都不断改进, 许多关于水分散失的耦合模式、土壤—植被—大气连续体的耦合数值模式不断建立和发展, 并且不断应用于生态边界层的实际研究中。

2 生态边界层水热散失耦合模式发展过程

地—气之间的水热交换对区域生态环境和气候效应有着重要影响。关于水热散失的模拟1950年就已开始。虽然很多研究者在研究过程中没有独立考虑生态边界层的问题, 但是他们所研究的问题都与生态边界层密切相关。根据生态边界层理论的发展和研究的内容, 关于生态边界层水热过程的模拟研究可分为4个阶段: 第1阶段(1950—1970年)

^{*} 收稿日期: 2005-03-15

作者简介: 江学顶(1979年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 夏北成; E-mail: zsxhc@163.com

仅考虑土壤—大气的物理过程,其代表为 Budyko (1956) 提出的“Bucket”(水桶模式)和 Deardorff 的陆面过程模式;第2阶段(1980—1990年)考虑生态边界层的生物物理过程,以植被微气象模式、BATS 和 SiB 为代表;第3阶段(1990—1996年)考虑植被的生物化学过程,以 SiB2 为代表;第4阶段(1996年至今)以边界层气象学和系统生态学为基础建立了生态边界层理论,在其研究中结合区域水热散失模式和区域气候模式逐步实现气候模式与生态模式的双向耦合,并且陆面过程参数化模式不断得到完善。

2.1 “Bucket”(水桶模式)和陆面过程模式

Budyko^[3]于1956年首先提出了孤立物理过程模式“Bucket”(水桶模式);Manabe (1969)^[4]首先在 GCM 中加入了陆面的水动力过程;此外,Deardorff^[5]在1977年提出了陆面蒸散发模式,并在1978年提出了地—气相互作用的参数化,使陆面过程的研究迈出了重要的一步。

Budyko 基于质量守恒定律建立了“水桶模式”,其原理是将陆面看作一定厚度的土壤层。其认为上层土壤含水量是降水、蒸发、地表径流三个通量的函数,并假定土壤层具有一定的田间持水量,降水使土壤层含水量增加,地面蒸发使水量减少,当累积水量超过水桶的容量,多余的水将形成地表径流而从“水桶”中流出。

Manabe 首次将陆面过程引入 GCM,至1980年以前,GCM 中的水分输送过程没有或仅简单考虑植被的作用,使用简单指定的参数,未能考虑不同地区土壤地质和植被种类差异的影响,对蒸散过程的描述真实性较差,土壤未作分层处理,没有考虑土壤内部的水分传输。但由于其简单性和有效模拟性,至今仍被沿用。

陆面过程模式用于与大气动力学模式相耦合,以模拟陆面变化对大气运动,乃至全球气候的影响,反过来用于模拟气候变化对陆面生物圈的影响,Deardorff 提出了地—气相互作用的参数化,为陆面过程模式的研究做出了巨大贡献。

水桶模式的出现及其与 GCM 的结合,以及地—气相互作用的参数化,这些都使生态学与气象学的研究方法和模式有了初步结合,对于生态边界层理论研究来说,这个阶段可以称作生态边界层水热散失及耦合模式的萌芽或者初级研究阶段。

2.2 生态边界层物理过程的模拟

1980年以来,在进行水分散失过程模拟研究的时候,在土壤和大气之间增加了植被层研究,开始实现微气象学、中尺度气象学与生态学的交叉研

究,虽然这时候还没有提出生态边界层理论,但是已形成了作生态边界层水热散失耦合模式的研究思想。McCumber 等^[6]的多层土壤模式在大气环流及中小尺度气候模式中广泛用,Dickinson^[7]提出了考虑植被影响的陆面过程模式。关于植被的物理过程对显热与潜热交换、蒸发与蒸腾等的作用的研究得到迅速发展,这类模式中有关植被的水热平衡包括:降水截流、下渗、再蒸发,气孔阻力和蒸腾,植物根系对土壤水的抽吸作用,表层和深层土壤中的湿度分布等。Dickinson^[8]还在1986年发展并修改了生物圈—大气圈模式(BATS),BATS 模式中,地面土壤层和根系层的水分控制方程考虑了根部降水、蒸发、渗透、土壤层之间的水分交换等,还考虑了降水被植被冠层截留后再蒸发或下落、下渗到土壤中以及当土壤水分小于田间持水量和土壤水分达到饱和时,土壤表面的地表径流情况。Sellers^[9]在1986年提出了简单生物圈模式(SiB),SiB 模式考虑的基本过程与 BATS 类似,模式中包含2层植被(冠层、地表植被)和3层土壤(表层、根系层、深土层),最后建立了植被层的截水控制方程组和土壤水分控制方程组,使生态边界层的水分传输研究向更深刻的层面发展。

此类模式通过引入植被层,使对生态边界层水分过程的模拟比“Bucket”更为合理,还能较好的模拟陆面的感热、潜热等情形。生态边界层包含的过程不仅有生物物理过程还包括生物化学过程,考虑土壤—植被—大气相互作用中的生物化学过程关系到生态边界层水热模拟的准确性,同时大部分模式对土壤过程的处理是概念性的,这些模式对水流通量的计算误差也是显著的,还有待进一步完善和发展。

2.3 植被生物化学过程及其水分过程模拟

从1980年到1990年,以Sellers等的SiB2为代表的植物生理—生物化学耦合机理模式,以及其他复杂的生物地球化学循环耦合模式和动态的生物地球耦合模式等的陆面模式迅速发展。1990年以来,应用考虑植被的地—气相互作用参数化模式,研究了不同类型下垫面的水分交换,并对此类模型作了进一步发展。季劲钧^[10]建立一个陆面过程与二维大气边界层相耦合的模式,耦合模式中包含了发生在大气边界层、植被冠层和土壤表层各种动力、热力和水文过程,并运用这一模式模拟了荒漠环境中一片绿洲的不均匀地表面形成的局地气候。刘树华等^[11]1995年研究了植被对近地面水热交换影响的参数化模型,1996年进行了土壤—植被—大气连续体中蒸散过程的数值模拟^[12],还研究了半干旱

地区植被覆盖度对边界层气候的热力影响^[13]。Sellers 等^[14]（1996）发展的 SiB2 模式实现了通过群落光合作用的估算来推算冠层的气孔阻力，进而实现了光合作用与水汽传输的耦合。

土壤—植被—大气水热传输（SVAT），即地表与大气之间的水热传输是陆面过程研究的重点之一。SVAT 的复杂程度，由最初的“Bucket”中只考虑地面与大气之间的传输问题，发展到通过考虑生态边界层水平方向的不均匀性等问题，最终建立多个植被层的物理—化学—生物联合模型。通过对植被冠层的不同假设，SVAT 可分为单层模型、双层模型和多层模型。单层模型将整个生态边界层看作一个整体，不考虑土壤—植被系统内部的水热相互作用过程，如 BATS；双层模型分别考虑冠层和土壤，如 SiB；多层模型根据冠层微气候的差异对冠层进行分层，如 SiB2。

对应单层模式、双层模式、多层模式，需要对不同分层列出各自对应的能量平衡方程并分别计算其中的每一项。冠层微气象模式中关于冠层潜热通量的计算，需要植被叶面蒸腾量的计算，而蒸腾量的计算对应考虑不同的生物物理化学过程，有其不同的计算方法，所以对土壤—植被—大气连续体内水分交换的估计，主要基于能量平衡方程。冠层微气象模式中通常对土壤层的处理是粗糙的，因而其模拟时间受到限制，主要用于短时间模拟。

此类模式在第二阶段模式的基础上，通过耦合植被界面的气孔导度与光合作用，系统地模拟了植物界面的光合作用发生过程，认识到光合作用对气孔阻抗大小的控制，从而影响植被和生态系统的水热循环，可以方便计算出水热的收支状况，但是大部分模式离生态边界层所需要研究的气象与生态的双向耦合还有一定的差距，而且在微观上对冠层辐射输送过程的重视还不够，而这正是保证其他通量计算精度的根本所在，所以在植被对大气边界层影响、土壤—植被—大气辐射、水分、热量、动量运移和贮存的模拟模式研究方面还有待进一步的深入。

2.4 水热模式、气候模式及生态模式的初步融合

1998 年孙卫国等^[15]分析了农田植被层上方的湍流输送，并发展了不同下垫面水分与能量传输模式，刘和平等^[16]对森林冠层边界层湍流传输进行了观测和数值模拟。同年，张晶等^[17]发展了一个改进的陆面模式。这些研究对不同类型的下垫面与大气之间的水热交换进行了研究，使土壤—植被—大气传输模拟研究的内容更加多地考虑了生态边界层的作用。

赵鸣等^[18]综合研究国外同类模式并建立了一个土壤—植被—大气近地层的相互作用模式，莫兴国^[19]在土壤—植被—大气系统水分能量传输模型中考虑了地下水的影响，并对模型中冠层动量湍流交换反梯度传输现象的描述进行了改进，在此基础上，依据冠层内动量和热量的交换以及辐射传输过程，同时求解地表、冠层能量平衡方程，进而模拟饱和—非饱和土壤的水热传输。刘树华等^[20]还在 SiB 的基础上，发展了一个改进的 SiB 模式。刘和平等^[21]首先从 SiB 物理模型出发，对其控制方程进行了修改，发展了不同下垫面水分与能量传输模式，使其既能在有植被下垫面使用，又能扩展到考虑水汽运动的沙漠地区使用。

王汉杰等^[22]1999 年在生态边界层一维、二维和三维模式中充分考虑了小尺度生态边界层的水热交换，使水热耦合模型在小尺度生态系统研究上得到了合理利用。2001 年，刘树华等^[23]概述了国内外陆面过程参数化模式（LPM）的研究，并对 LPM 进行了改进^[23]，该模式能被应用于地球表面不同土壤和植被类型的陆面过程的相互作用研究，通过土壤结构参数和陆面过程湍流通量的参数化，可广泛应用于不同类型的区域。在模式中，大气—陆面系统包括 3 个子系统：近地层大气、冠层和土壤活跃层，这个发展的陆面过程参数化模式可应用于不同气候区域能量平衡和气候的模拟研究。2004 年刘树华等^[24]在陆面物理过程参数化方案中较详细地考虑了植被和地面的各种物理参量如地面和叶面的反射率和发射率，净叶面面积指数，植被的物理阻抗等，并与大气边界层模式耦合。2004 年，刘树华等^[25]基于大气边界层和植被冠层微气象学基本原理，建立了一个森林生态系统与大气边界层相互作用的数值模式，并应用该模式模拟了森林生态系统的能量平衡、植被温度、植被冠层内空气温度、地表温度日变化特征，及森林生态系统下垫面大气边界层各气象要素的日变化特征，该模式为气候模式与生态模式的双向耦合研究奠定一个良好的基础。

3 存在的问题

生态边界层水热交换模型及耦合模式经历了一个较长的发展过程，从最简单的物理模式“Bucket”，逐步加入生物物理过程与生物化学过程，并不断考虑植被及生态下垫面对水分输送过程的影响，逐步实现了气候模式与生态模式的双向耦合。但是，在研究中还存在着明显不足，发展双向耦合的区域气候模式，研究较大尺度的生态系统与

气候系统的相互作用，将是生态边界层研究的一个主要方向。

3.1 下垫面非均匀性问题

非均匀下垫面近地层土壤、植被和大气之间的相互作用是一个复杂的物理、化学、生物过程，各因子对气候影响的相对重要性及其物理机制还不够了解，下垫面和气候综合作用对生态边界层的影响也需要进一步弄清楚。由于其涉及到相当多的物理、生化变量，其相互作用极其复杂，增加了改进陆面过程模式的难度。下垫面对陆地和生态边界层水热交换有重要影响，但因提供模拟的起始边界条件和模拟验证实际观测资料较少，给数值模拟研究带来了一定的局限性。虽然可以用通量平均法和概率密度函数方法及同时用这两种方法简单处理陆面的非均匀性，但关于下垫面非均匀性问题的细致模拟仍有待进一步研究。

3.2 对植被物理和生物化学过程模式的简化问题

目前对生态下垫面的水分散失耦合模式研究，通常对生物物理过程进行了简化，对于某些特别物理过程的考虑欠全面，例如在植被冠层内辐射强度的分布问题上，一般都非常简单的函数，而且把植物温度上下看成均匀一致的，因此与实际情况不相符。同时，应当被考虑在水分输送过程中的植被冠层分层、及生物化学过程对叶面蒸腾起控制作用。但是，生物化学过程的模拟非常复杂，而由于计算时间等限制，模式的简化是一个迫切问题。

3.3 模式的全面性问题

由于各模式研究对象不一样，因而容易忽略一些重要的物理过程，至使这些模式难以用于土壤—植被—大气系统进行全面描述和模拟，例如，考虑冠层对生态边界层水热输送影响研究方面，通常对土壤层的处理是粗糙的，因而只能做短时间模拟。同时关于生态边界层水热交换与大气圈、水圈、陆地系统的相互作用机制问题仍然受陆面过程模式、微气候模式发展的限制。

3.4 生态边界层水热交换复杂性问题

生态边界层的水热交换是复杂的，其受到的影响也是复杂多变的，所以生态边界层水热交换模式很少考虑气候特别是微气候的反馈作用因子。例如，城市生态边界层的水热交换与城市热岛和城市降水、城市局地环流、大气污染等相互影响，因此如何解决城市水热交换与城市气候模型的耦合问题，还有很长的路要走。

3.5 综合利用景观生态学和生态边界层理论研究区域水热交换问题

目前生态边界层的研究主要从微观角度出发，

随着人们越来越重视区域环境变化，这就需要把研究整个区域的生态下垫面，但因为下垫面的非均匀性和复杂性，限制了生态下垫面与区域环境水热交换相互作用机制的研究。随着景观生态学的发展，为生态下垫面从微观到宏观的研究提供了条件，因此如何从景观生态角度出发，研究景观尺度上的水热交换及输送机制也将成为区域水热平衡及其影响研究的一个难点。

生态边界层水热散失耦合模式的研究自 20 世纪 50 年代以来取得了很大进展，所考虑的过程越来越复杂、尺度也越来越多元化，随着各个阶段的发展，各种模式中对生态边界层的因素考虑的越来越全面，随着研究的深入，正在逐步实现气候模式与生态模式的双向耦合。但仍有一些尚待解决的问题，如下垫面的非均匀性问题、植被冠层辐射问题、对生物化学过程模式的简化、建立与不同生态系统相对应的地表水热平衡模型以及如何在生态系统效应的中小尺度生态边界层模式中考虑水热输送问题，如何在为区域气候学模式乃至 GCM 模式提供生态系统强迫效应的参数化方法中考虑水热交换问题，如何研究景观尺度上的水热交换问题等，今后的研究也要向这些方面发展。

参考文献:

[1] 熊文愈,王汉杰. 论生态界面系统[J] . 南京林业大学学报,1986(2): 1— 10.

[2] 王汉杰. 生态界面理论研究的最新进展[J] . 南京林业大学学报(生态学专辑), 1991, 15: 6— 10.

[3] BUDYKO M I. The heat balance of the Earth' s surface[M] . Gidrometeoizdat, 1956. 255.

[4] MANABE S. Climate and the ocean circulation I: The atmosphere circulation and the hydrology of the earth' s surface[M] . Mon. Wea. Rev. , 1969. 97: 939— 805.

[5] 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.

[6] MCCUMBER M C, PIELKE R A. Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. Part 1: Soil layer[J] . Geophys Res 1981, 86: 9929 — 9938.

[7] DICKINSON R E. Modeling evapotranspiration for three— dimensional global climate models [A] . Hanson J E, et al eds. Climate Process and Climate Sensitivity [C] . Geophys. Monogr. , Amer. Geophys. Union, 1984. 29: 58— 72.

[8] DICKINSON R E. Biosphere—Atmosphere Transphere Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model [M] . NCAR/ TN— 275 + STR, 1986.

[9] SELLERS P J, MINTZ Z, SUD Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation

models [J] . Atmos Sci , 1986, 43: 505— 531.

[10] 季劲钧, 苗曼倩. 不均匀植被分布对地表面和大气边界层影响的数值试验[J] . 大气科学, 1994, 18(3): 293— 302.

[11] 刘树华, 黄子琛, 刘立超, 等. 植被对近地面层水热交换影响的参数化模型[J] . 应用生态学报, 1995, 6(2): 149— 154.

[12] 刘树华, 黄子琛, 刘立超. 土壤— 植被— 大气连续体中蒸散过程的数值模拟[J] . 地理学报, 1996, 51(2): 118— 125.

[13] 刘树华, 刘和平. 不同下垫面湍流输送计算方法的研究[J] . 应用气象学报, 1996, 7(2): 229— 237.

[14] SELLERS P J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric studies: technical gloal fields of terresrial biophysical parameters from satellite data [J] . Climate, 1996, 9: 706— 737.

[15] 孙卫国, 刘树华. 农田植被层上方湍流通量输送特征分析[J] . 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 251— 257.

[16] 刘和平, 桑建国, 刘树华. 森林冠层边界层湍流传输的观测和数值模拟[J] . 气象学报, 1999, 57(6): 715— 728.

[17] 张晶, 丁一汇. 一个改进的陆面过程及其模拟试验研究[J] . 气象学报, 1998, 56(1): 1— 19.

[18] 赵鸣, 江静, 苏炳凯. 一个引入近地层的土壤— 植被— 大气相互作用模式[J] . 大气科学, 1995, 19(4): 405— 414.

[19] 莫兴国. 土壤— 植被— 大气系统水分能量传输模拟和验证[J] . 气象学报, 1998, 56(3): 323— 332.

[20] 刘树华等. 森林冠层上下湍流谱结构和耗散率[J] . 中国科学(D 辑), 1998, 18(5): 469— 480.

[21] 刘和平, 刘树华等. 不同下垫面水分与能量传输模式[J] . 大气科学, 1999, 23(4): 449— 461.

[22] 王汉杰, 王信理. 生态边界层原理与方法[M] . 北京: 气象出版社, 1999: 100— 146.

[23] 刘树华, 李新荣, 刘立超, 张景光. 陆面过程参数化模式的研究[J] . 中国沙漠, 2001, 21(3): 304— 311.

[24] 刘树华, 蔺洪涛, 胡非等. 土壤— 植被— 大气系统水分散失机理的数值模拟[J] . 干旱气象, 2004, 22(3): 1— 10.

[25] 刘树华, 邓毅, 胡非, 等. 森林生态系统与大气边界层相互作用的数值模拟[J] . 应用生态学报, 2004, 15(11): 2005— 2012.

Advances in Studies of Moisture heat Exchange Models and Simulation at Eco boundary Layer

JIANG Xue ding, HUANG Jin can, GUO Luo, XIA Bei cheng

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on a wide range of literatures on Moisture heat Exchange Models and Simulation at Eco boundary Layer, this paper analyzed the progress of moisture heat exchange models and simulation since 1950. Four phases of development were summarized, namely the “Bucket” model and Land Simulation Model (LSM); the vegetation micrometeorology models based on the biophysics courses of vegetation at the eco boundary layer; the models based on the biochemistry courses of vegetation; the primary amalgamation of moisture heat models, climate models and ecology models. The problems existing in relevant study, such as insufficient foundation of study, and relative backward approach, etc., were analyzed. Meanwhile the vision for development in this research is proposed as well.

Key words: eco boundary layer; moisture heat exchange models; land simulation model (LSM).