

陆面过程中的水文模式研究

杨新兵¹, 逯进生², 鲁绍伟³

(1. 北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点开放实验室, 北京 100083;

2. 北京市园林绿化局, 北京 100029; 3. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 陆面水文过程模拟是解决全球环境恶化与气候异常的最好方法, 是当前学术界关注的热点。对陆面过程的涵义、模式的发展、陆面过程中水文参数的描述进行了总结, 提出了在陆面水文过程研究中存在的尺度匹配误差、数据共享矛盾、参数不确定性等不足及今后的研究方向。

关键词: 陆面过程; 水文过程; 陆面水文过程

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0046-05

Study on Hydrological Mode on Land Surface Processes

YANG Xin-bing¹, LU Jin-sheng², LU Shao-wei³

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Education Ministry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Municipal Bureau of Parks and Afforestation, Beijing 100029, China;

3. Shijiazhuang College of Economics, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: The Modeling on Land Surface Hydrological Processes is the best measure to solve the exacerbation across global environment, and the same to the climate abnormality. So it's also the hot focus in academia nowadays. The authors summarized the definition, development of the mode and the hydrological parameter on land surface processes, and point out the shortage and future study trend about size match error, data sharing conflict and indefiniteness of parameter existed in the research of hydrological process.

Key words: land surface processes; hydrological processes; land surface hydrological processes

人类活动对气候的影响是各种各样的, 近年来, 森林锐减、土地沙漠化、荒漠化、干旱持续、全球变暖以及水资源缺乏等一系列重大的全球环境问题和气候异常已引起了世界各国政府及科学界空前的重视, 成为科学前沿的重大课题。水文循环是指地球的水分在全球和区域尺度下, 通过蒸发、水汽输送、降水、下渗以及径流等过程不断地转化、迁移的现象, 是联系地球系统地圈-生物圈-大气圈的纽带。人类活动、土地利用方式的改变等已干预了人类生存空间, 改变了陆地下垫面的物理基础, 引起陆地表面太阳辐射、反照率、水热交换等物理过程的变化^[1~3]。因此, 深入研究陆地上各种下垫面水文与大气之间相互作用的物理、生化和能量交换过程, 已为当今水文学、气象学和气候学家所面临的重大挑战。

1 陆面过程涵义和模式发展

大气边界层发展、地表温度和湿度等与气候研究密切相关的地球系统由大气圈、水圈、岩石圈、生物圈和冰雪圈等子系统构成, 各个子系统之间既相对独立又相互依赖。如图 1 所示, 一个子系统与其它子系统之间通过边界的物质和能量的交换在相互作用和影响。地球表面作为大气系统惟一有物理意义的界面, 是大气能量的主要输入面^[4]。陆面土壤、

植被和坡度的不均匀自然特性使地球表面隐含了极大的湍流通量、感热通量和潜热通量的不均匀性^[5,6]。地表特征的变化通过改变水汽饱和率、热容量、反照率和粗糙度等来影响地气之间的各种交换, 最终影响气候系统。Phillips (1956) 创立了世界上第一个大气环流模式 (GCM) 的 50 多年来, GCM 已有了很大的改进^[7]。现在利用 GCM 进行数值模拟已经成为研究气候变化的一种重要手段。

陆面过程是指发生在地-气之间动量、热量和水分交换的物理过程, 包括地面上的热力交换、水文循环和生物循环, 地表面与大气间的能量和物质交换以及地面以下土壤中的热传导和水分交换过程等, 它们可以对大气环流和气候产生一定的影响^[8~11]。从严格的意义上讲, 它应该包括陆面上发生的所有的物理、化学、生物和水文等过程, 以及这些过程与大气过程的相互作用。它包括了全球系统五大圈 (大气圈、岩石圈、生物圈、水圈和人类圈) 中几乎所有的圈层。其时间尺度可以从微秒到万古, 空间尺度可以从分子到全球。广义的陆面过程不仅包括了地-气之间的物理交换, 而且也包括了下垫面植被对气候演变的影响。气候形成、变化和预测的研究已经成为当前世界性的战略问题。

在大气与陆地下垫面界面上, 由于大气条件及太阳辐射

* 收稿日期: 2006-12-06

基金项目: 北京市科委 2006 年度科技计划重大项目 D0706007040191 - 07

作者简介: 杨新兵 (1978 -), 男, 河北人, 北京林业大学博士, 研究方向: 森林水文、水文与水资源。

的强迫,不断地与大气进行动量、能量和物质的交换。一个实用的陆面过程模式必须描述5个物理的或者生物的过程^[11~13]:土壤动力热力学过程:确定土壤中水、热输送和大气间相互作用的物理过程;植物生理过程:确定控制植物蒸腾的生物物理过程;湍流输送过程:确定湍流输送在陆面过程中的作用,确定动量、热量和物质输送的大气和边界层阻力;水分平衡过程:确定降水量的分配,估算土壤含水量、径流量、蒸发量、蒸腾量;辐射平衡过程:确定每种植被层和土壤表面的可利用能量,估算感热通量和潜热通量。

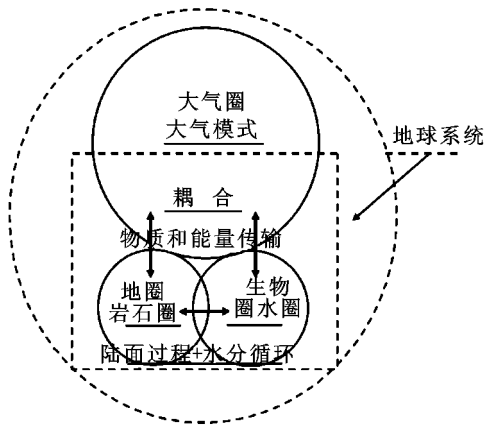


图1 陆—气交换示意图(仿张强,1998)

土壤—植被—大气之间物质、能量的输送及地—气相互作用过程对边界层的发展非常重要。特别是两者之间的辐射通量、动量通量、感热通量、潜热通量影响着大气的运动、温度、湿度和降水场,陆地表面土壤含水量、植被覆盖率、叶面积指数和反射率等物理状况,直接影响到近地面层与大气之间的物质、能量的交换,从而影响大气边界层结构、大气环流和气候。所以,无论在气候模式还是在大气边界层模式中,都必须考虑它们的影响,特别是在不同下垫面局地中小尺度气候模式和大气边界层模式的研究中尤为重要。自Deardorff^[14]于1978年提出了地—气相互作用的参数化以来,许多学者在此方面做了大量工作。考虑植被生物物理作用的陆面物理过程模式,如,Dickinson发展了一个生物圈—大气圈传输模式(Bio-sphere-Atmosphere Transfer Scheme(BIATS));还有被广泛应用在大气环流及中小尺度气候中的McMann和Pielke的多层土壤模式^[15]。近年来,Robert和Zhao等研究了耦合的大气圈—生物圈—水圈环境模式和大气—海洋—海冰—陆地气候预测模式^[16,17]。国内学者在土壤—植被—大气系统的物质、能量输送的数值模拟和生物圈—大气圈输送模式方面也做了许多工作,如李劲钧^[18]的耦合大气—植被—土壤之间的物理交换过程和植被生理生长过程的AVIM陆面过程模式;刘树华等^[19]的沙漠生态系统植被生产力模型、生物圈—大气圈输送模式、草原下垫面土壤—植被—大气物质能量输送模式、植被对近地面层水热交换影响的参数化模型、土壤—植被—大气连续体中的蒸散过程的数值模拟和干旱半干旱地区植被覆盖率对边界层气候影响的数值模拟等等。

2 陆面过程中的水文模式研究

一个区域的水文循环既受气候系统的控制,又受陆面系统的影响。单纯从小流域出发研究水分循环亦不能满足当前发展形式的需要,必须从大尺度乃至全球范围内来研究,这将成为水文科学面临的重要挑战。陆面水文过程通过下垫面向大气输送水汽直接影响大气降水、大气温度和大气运动等天

气、气候状况;同时,气候状况的变化也直接影响陆面水文过程,如大气增暖影响径流等水资源量的变化等。自从60年代地球物理流体动力学实验室ESSA(the Environmental Science Services Administration)的研究人员在大气环流模式(GCM)中置入一个陆地水文分量以来^[20],其原理是将一定厚度的土壤看成一个“水箱”,降水和融雪使其中的水分增加,蒸发则使其减少,若积累的水超过“水箱”的容量时,即土壤最大含水量,则多余的水就变成径流损失。水分循环的引入使得他的模拟比较成功,从而使陆面水文过程成为气候模型中的研究重点之一。然而,陆面要素在模式格点内存在着明显的次网格变化,特别是陆面水文过程,它包括的降水、径流、蒸发和渗透过程都存在很强的次网格不均匀性。对这些问题认识的不断深化使气象学者和水文学者更加关注大气模式中对陆面水文过程的处理^[12,15,16]。随着研究的深入,人们发现对局地气候乃至范围较大的区域性气候的了解不能仅限于对大气的认识,需同时考虑下垫面的状况,这已被越来越多的人取得共识,试验结果表明:陆面特征对气候有明显影响。总之,如果大气环流模式中没有陆面过程的参与,那么就很难模拟出当地的气候状况以及它们的演变。

2.1 土壤水模型

土壤水分不仅在水循环中扮演重要角色,而且影响从几小时到多年尺度的气候变化。土壤水通过蓄水能力把降水分为蒸发和径流,影响着水量平衡各项分配;同时通过反射率和蒸发影响着太阳辐射转化为潜热和感热,进而影响能量平衡各项分配。在非均匀地表条件下,土壤表层水分分布的空间变率相当大,因此,系统地分析非均匀下垫面条件下,土壤水分的时空分布特征对于陆面过程水分循环或水文过程参数化乃至全球变化研究有着极其重要的意义。Walker和Shukla^[20],Johnson^[21],谢志清^[22]等进行了土壤水分对环境生态和区域气候影响的敏感性试验研究,特别强调了土壤湿度的重要性。根据土壤的分层,陆面模式中对土壤水传输以及计算基本上分为三类:水桶型单层模式、强迫—恢复型两层模式(VIC模式采用此方案)和扩散型多层模式(BATS、SSiB等模式采用此方案)^[12,13,23,24]。扩散型多层模式较详细的考虑了植被根系的分布,更加深入地考虑了深层水的向上扩散,因此能更加真实和详细的描述土壤内部的传输过程。

2.2 可能蒸发

蒸发过程是水分循环中的主要组成部分之一,由于水转变为水汽状态时需要耗费相当多的热量,所以蒸发过程同样是热量交换的主要因素。也就是说,蒸发的一些特征值,建立了下垫面与大气之间热最交换过程及水分交换过程的直接联系。蒸发的研究可追溯到道尔顿时代,他首先发现了温度、湿度、风速对蒸发的影响,计算蒸发的公式大体可分为下述三大类^[25,26]:经验公式法、水文法(水量平衡法、水分运动通量法、蒸渗仪法)、微气象学法(波文比—能量平衡法、空气动力学法、能量平衡—空气动力学阻抗综合法、湍度相关法、遥感法)。目前陆面模式对可能蒸发的计算主要有三种方法^[12,13,23,24]:空气动力学方法:主要根据空气的紊动扩散理论来探讨可能蒸发,其要点是梯度的存在导致了水汽交换。BATS、SSiB、BUCKET等模型采用了该方法;Penman-Monteith方法:Penman结合热量平衡和空气动力学途径提出了确定可能蒸发的方法,1965年Monteith在Penman公式中引入气孔阻抗(或表面阻抗),使得方程的应用扩展到有植被覆盖的表面。VIC等模型采用了此方法;Priestly-Taylor方法,是Penman-Monteith方程的简化,BIOME2模型采用了此方法。

2.3 地表能量交换

陆面参数化方案的主要目的是通过近地表的大气强迫(降水、气温、风速、辐射等),给出陆面能量收支和水量平衡的现实描述,有效地估计到达地面的辐射及感热和潜热。大气与陆面相互影响的主要途径是它们之间动量、水汽和能量的交换,而这种交换量的大小又取决于下垫面土壤的结构、特征、初始状况以及是否有植被、以及植被类型等等。土壤-植被-大气之间物质、能量的输送及地-气相互作用过程对大气边界层的发展非常重要。特别是两者之间的辐射通量、动量通量、感热通量、潜热通量影响着大气的运动,温度、湿度和降水场,自 Deardorff 于 1978 年提出了地-气相互作用的参数化以来,许多学者在此方面做了大量工作^[14,27]。陆面过程模式的最终目的是要得到地表感热通量 H 和潜热通量 E 。在各个陆面过程模式中感热通量和潜热通量(水汽通量)的计算方案是有所不同的^[6],主要方法有 Priestly-Taylor 法、Penman-Monteith 联立方程法、曳力系数法和阻力法等。

地表热力分布不均匀是形成大气环流最根本的原因之一,所以,地表土壤温度的参数化几乎与大气数值模式同时出现,只是最初的土壤温度的参数化是非常简单的,有些模式甚至采用给定的经验常数或特定的函数来描述,带有很大的主观随意性。在 70 年代,土壤温度的计算方案取得了长足进展。期间分别建立了土壤绝热法、感热相关法和辐射相关法等参数化方法,同时分别建立了土壤模式法(热传导法)余项强迫法和强迫恢复法等多种可预报方法^[6]。其中土壤模式法和强迫恢复法效果较好,且应用较普遍。

2.4 植被覆盖模型

植被覆盖面在全球陆面中占有较大的比例,植被的作用不仅影响着大气环流和气候,而且植被分布状态的改变还能够引起重要的气候变化^[1]。植被影响气候系统的时间尺度范围也相当广。最近的研究鉴于土壤水分和植被对大气模式的重要性,开始认识到土壤湿度和植被的边界作用表示的与土壤温度同样好是非常必要的。所以,近年来发展和完善陆面过程模式的关键是对土壤水分和植被影响的参数化处理。80 年代以来 GCM 中陆面参数化的一大进展是显示的引入了植被的作用,本质上它们都属于计算土壤-植被-大气间传输方案(SVATS, Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes),其中应用最为广泛、最具代表性的两个陆面参数化模式是: Dickison^[28]建立的 BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Schemes) 和 Sellers^[29]建立的 SiB (Simple Biosphere Model) 模式。Garrett^[30]在它的对流云、对流边界层和森林覆盖之间的相互作用作用模式中考虑了植被。Aathes^[31]首先用对植被影响考虑的比较好的中尺度模式定量估计了亚热带地区的热力对比。Mahfouf 的模拟^[32]定量地给出在一个有很好蒸散的植被面和一个干燥地面并存的环境所能产生的局地环流强度。总体来看,近几年与陆面过程模式耦合的较广泛的中尺度模式主要是 Anthes 等人建立的 MM4 模式和 Pielke 等人建立的三维中尺度模式。目前也有人试图用 MM5 (MM4 模式的发展) 和 RAMS (Pielke 和 Cotton 模式的发展) 中尺度模式与陆面过程模式进行耦合^[33-34]。

对植被蒸腾的参数化考虑相对要迟一些。代表植被过程的主要的叶孔阻尼、叶面多次反射、水分储存和动力作用等四个关键因子,其中动力作用通过粗糙度就能较容易反映,而较难处理的是其它三个因子。较早初步考虑植被影响的参数化方案大约直到 70 年代末才出现。同时包括土壤和

植被的陆面过程模式最早见于 Federer 的研究^[35]。但其中对陆面过程的处理还是相当粗糙而不成熟的。如 Charney^[36]和 Sud^[37]进行了地面反照率、粗糙度的改变等对陆面过程的敏感性试验。初步较成形的陆面参数化方案是 McCumber 和 Pielke 建立的多层模式^[38]。直到 80 年代中才陆续出现了一些真正可实用的陆面过程模式, Sellers 等人^[39]建立了简单的生物模式即 SiB; Dickinson 等人建立了 BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme) 模式。

2.5 径流模型

径流量模拟的精度直接影响着土壤湿度,而土壤湿度在不同的时间尺度上影响着蒸发以及区域气候的水分和能量收支平衡,可见径流在模式中的真实描述是十分重要的,但却是目前陆面参数化过程中考虑最少的部分。在水文学领域,对于进行径流模拟和预测的水文模型却早已存在,发展至今,在国内外已有很多很成熟的水文模型,如: SHE (System Hydrologic European) 模型, TOPMODEL (TOPography based hydrological MODEL) 模型, 新安江模型等^[40]。这些水文模型的重点在降水径流的模拟和水分收支的计算上,因此,对流域径流的产汇流计算进行了较详尽的考虑。为了更加真实的对陆面水文过程进行描述,解决气候模式中陆面参数化方案简单的问题,需要寻求合理的大尺度水文模型,考虑将其同气候模式进行耦合,来弥补原气候模式中对径流计算的不足,而气候模式中的陆面过程是气候模式和水文模型耦合的共同界面,基于以上的考虑,许多科研工作者在这方面做了大量的工作。

在很多陆面过程模式中,对径流和排水只是做了简单的处理^[13],如 VIC、SSiB 把重力排水和基流放在一起作为深层渗漏; BATS、CLASS (Canadian Land Surface Scheme) 以及 ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) 等模式除了排水以外,只考虑表层径流; BEST (Best Approximation of Surface Exchanges)、LAPS (Land Atmosphere Parameterization Scheme) 等模式则考虑各层土壤层的壤中流。AVIM 模型认为当上层土壤水分饱和时开始产生径流,到达地面的降水不再渗入土壤而是完全作为地表径流流走,不考虑汇流过程。Koster 和 Milly 明确指出^[41]: 径流与蒸发是密切相关的,没有好的径流预报,决不能得到好的蒸发计算,当然也必然歪曲对天气的影响作用。Xu Liang、Agnes Ducharme、Reed M Maxwell、苏凤阁、郝振纯等人^[42-46]基于不同基础陆面过程模型,对水文过程的径流进行模拟探讨,效果明显。

Hemderson Seller 等人于 1993 年在 PILPS 计划中对当前较流行的 25 个陆面过程模式进行了系统地比较^[47]。如仅从陆面参数统一后的 14 个陆面过程模式对土壤水分的模拟值与 HAPEX 实验资料比较的结果来看,单独强调陆面过程的能量部分或水文部分都会使模式出现较大误差,而这两部分都有所考虑的陆面模式则误差较小。所以今后应该在所有的陆面模式中把能量部分和水文部分作为一个不可分割的整体来看。

2.6 遥感监测获取陆面水文过程参数

遥感技术以其独特的优势,在陆面过程研究中的应用受到广泛关注,在陆面过程研究中,遥感的最终目的是要将获取的地表参数及能量通量代入陆面过程模式,从而对陆面过程的参数化进行改进,并为区域性或全球性气候模式提供改进的陆面过程参数化方案。大多数国际陆面过程实验将遥感作为重点项目列入了实验^[48,49],其基本目标之一是发展和验证卫星遥感获取地表感热、潜热和辐射通量的方法。

光学遥感在反演地表反射率、地表温度等参数方面具有

较大优势,但在反演土壤湿度方面,其发展前景远不如微波遥感。微波遥感监测土壤水分具有坚实的物理基础,即:土壤的介电特性和土壤水分含量有密切关系。Jackson^[50]对遥感与土壤水文模型的结合研究进行了综述,指出有较多的研究者在裸露土壤条件下,建立了利用遥感数据作为输入参数的水文模型。近20年中,遥感观测和解释水文过程已获得巨大进展。当前在遥感获取地表参数方面已针对不同的地表参数在不同的遥感数据之间建立了遥感反演算法,利用多种遥感数据获取地表参数也是今后陆面过程研究的方向。

3 陆面水文过程模式研究中存在的问题与展望

3.1 存在的问题

3.1.1 尺度不匹配

按照 Hostetler^[51]的观察结果,无论是大气环流模式,还是水文模型,其大部分参数误差产生于耦合过程的尺度不匹配问题。陆面模式是水文模型和气候模型耦合的共同界面,但二者在时空尺度上存在较大差异。时间上,气候模式的积分步长从几分钟到1h不等,而水文模型的时间步长从小时到月不等。在空间上,水文模型突破了常规的流域界限而扩大到与大气环流模式相应的大尺度区域上。因此,以尺度为突破口,寻找陆面模式同水文模型耦合的尺度界面将是研究关键。

3.1.2 数据不能共享

陆面模式是大尺度下发展的主要基于能量交换的气候预测模型,现代大尺度的水文模拟主要是基于水量交换的水文预测模型,现有的水文-气候模型多为单向连接,二者数据不能共享,存在很多不确定性。由于二者对陆面参数的取法不同,时间步长不等,对同一网格或流域得到不同的土壤含水量和地表蒸发量估算,使得大气环流模式与水文模型对水量和能量平衡描写不一致,缺乏整体性,影响对气候的模拟和预测。

参考文献:

- [1] 刘春蓁. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 115 - 119.
- [2] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [3] 李家春, 欧阳兵. 陆面过程的模式与观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [4] Avissar, R., Pielke, R. A. The impact of plant stomatal control on mesoscale atmospheric circulations[J]. Agric. For. Meteorol., 1991, 54: 353 - 372.
- [5] Dickinson R E Land-atmosphere interaction[R]. U. S. Nation Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991 - 1994. 1995. 917 - 922.
- [6] 张强. 简评陆面过程模式[J]. 气象科学, 1998, 18(3): 295 - 305.
- [7] 刘晓东. 大气环流模式中陆面过程的参数化及其敏感性研究[J]. 气象科技, 1990, (5): 14 - 23.
- [8] 杨兴国, 牛生杰, 郑有飞. 陆面过程观测试验研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 83 - 89.
- [9] 牛国跃, 洪钟祥, 孙荻芬. 陆面过程研究的现状与发展趋势[J]. 地球科学进展, 1997, 12(1): 20 - 25.
- [10] 穆宏强, 夏军, 胡玉惠. 陆面过程参数化方案研究综述[J]. 人民长江, 2000, 31(7): 10 - 13.
- [11] 孙荻芬. 陆面过程研究的进展[J]. 新疆气象, 2002, 25(6): 1 - 6.
- [12] 曹丽娟. 分布式陆面水文过程模式的研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2004.
- [13] 孙翠梅. 水阳江流域陆面水文过程模式的研究[D]. 中国气象科学研究院, 2006.
- [14] Deardorff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation[J]. J. Geophys. Res., 1978, 83: 1889 - 1903.
- [15] Mccumber M C, Pielke R A. Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model[J]. J. Geophys. Res., 1981, (86): 9929 - 9938.
- [16] Robert L W, Larry E B. Coupled atmosphere biophysics hydrology models for environmental modeling[J]. Journal of Applied Meteorol., 2000, 39(6): 931 - 944.
- [17] Zhaomin W, Lawrence A M. A simple coupled atmosphere-ocean-sea ice land surface model for climate and paleoclimate[J]. Journal of Climate, 2000, 13(6): 1150 - 1172.
- [18] Ji Jinjun, A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface[J]. Journal

3.1.3 观测资料缺乏

降雨对陆面水文系统的通量和状态分配有重要作用,并且是水文模型的重要输入。但用于验证大气环流模式网格内描述水文循环的地表蒸发量、土壤含水量、径流等数据很难直接获取。观测资料依然缺乏。另外,由于参数的定性和定量确定既随不同下垫面类型和性质,也随时间和空间而变,是十分复杂的,同时,还受空间非均匀性和变异度的影响,从现有的知识水平、已掌握资料和信息来看,它们中很多还带有很大的不确定性,存在很大误差,给陆气相互作用研究带来极大的困难。

3.1.4 产汇流机制复杂

水文模型中的产汇流形成机制是复杂的,受不同下垫面的地形、土壤、地质、植被和气候条件的综合影响,具有高度的非均匀性。目前对径流等水文过程的描述还缺乏一种行之有效的办法。因此,引入比较符合实际的土层渗透过程,对降水过程进行更加真实的参数化,尽量从物理基础上去描述蒸发、土壤水传输、产汇流等水文过程,以减少参数率定所带来的不确定性,是今后发展的目标。

3.2 展望

真实的陆面水文过程将会涉及很复杂的大气物理过程、生物过程、水文过程等,所以它实际上是一个气象学、生物学、生态学、水文学和农林学等多学科交叉的新的研究领域。单独强调陆面过程的能量部分或水文过程的水量部分都会使模式出现较大误差,而这两部分综合考虑会减小误差。所以今后,应该在所有的陆面模式中把能量部分和水文部分作为一个不可分割的有机整体来研究。从搜集的大量资料中发现:陆面水文过程的研究几乎都是在气象领域,水文工作者涉及的较少。建立一种新型的既能真实描述水文过程,又能与大气模式相耦合的陆面水文模式正是当代大气科学和水文科学迫切需要解决的挑战性课题,也是目前国际地学界研究的热点和前沿。

- of Biogeography, 1995, 22, 445 - 451.
- [19] 刘树华,文平辉,张云雁. 陆面过程和大气边界层相互作用敏感性实验[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 534 - 549.
- [20] 周亚军,陈葆德,孙国武. 陆面过程研究综述[J]. 地球科学进展, 1994, 9(5): 26 - 32.
- [21] Johnson, K D, D Entekhbi, The implementation and validation of improved land - surface hydrology in an atom spheric general circulation model[J]. J. Cilm. ,1993, 6:1009.
- [22] 谢志清,丁裕国,刘晶森. 不同下垫面条件下土壤含水量时空变化特征的对比分析[J]. 南京气象学院学报, 2005, 25(5): 625 - 632.
- [23] 苏凤阁,郝振纯. 陆面水文过程研究综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(6): 795 ~ 801.
- [24] 曹丽娟,刘晶森. 陆面水文过程研究进展[J]. 气象科技, 2005, 33(2): 97 - 103.
- [25] 魏天兴,朱金兆,张学培. 林分蒸散耗水量测定方法述评[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(3): 85 - 91.
- [26] 孙景生,熊运章,康绍忠. 农田蒸发蒸腾的研究方法与进展[J]. 灌溉排水, 1993, 13(4): 36 - 38.
- [27] 刘树华,张景光,刘昌明. 荒漠下垫面陆面过程和大气边界层相互作用敏感性实验[J]. 中国沙漠, 2002, 22(12): 636 - 644.
- [28] Dickinson R E, Henderson - Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere - Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model[R]. NCAR Techn, Note - 275 + STR, 1986.
- [29] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C et al. A simple biosphere model (SiB) for use with GCMs[J]. J Atmos Sci, 1986, 43(6): 505 - 531.
- [30] Garrerr, A J. A parameter study of interactions between connective clouds the connective boundary - layer. and forested surface, Mon[J]. Wea. Rev. ,1982, 110; 1 041 - 1 059.
- [31] Anthes , R A. Enhancement of connective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid region [J]. J. Clim. APPL. Meteor. ,1984. 23: 541 - 554.
- [32] Mahfouf J ,Richard, E ,Mascart, P. The influence of soil and vegetaion on the development of mesoscale circulation[J]. J. Clint. Appl. Meteor. ,1987. 26: 1 483 - 1 495.
- [33] Anthes R A ,et al. Description of the perm state/NCAR mesoscale model version 4 (MM4) ,NCAR Tech[R]. note , 1987 ,NCAR/ TN - 282 - STR ,
- [34] Pielke. R A , W R Cotton , R L Walke. Comprehensive meteorological modeling system - RAMS[J]. Metrorol. Atmos. Rhys, 1992. 49: 69 - 91.
- [35] Federer, C A. A soil - plant - atmosphere model for transpiration and availabilty of soil water[J]. Water Resource. Res. , 1999, 15: 555 - 562.
- [36] Charney J G, Quirk W J, Chow S H, et al. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions [J]. J Atmos Sci, 1977, 34(9): 1 366 - 1 385.
- [37] Sud Y C, Shukla J, Mintz Y. Influence of Land surface Roughness on Atmospheric Circulation and Rainfall: A Sensitivity Experiment with a GCM[M]. NASA Tech. Memo, 1985: 86 - 291.
- [38] McCumber, M C , R A Pielke. Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. part I; Soil layer[J]. J Geophy. Res. , 1981. 86: 9 929 - 9 938.
- [39] Sellers. P J, Y Mintz. The design of a Simple Biosphere model (SIB) for use within general circulation models[J]. Atmos. Sci. . 1986, 43: 505 - 531.
- [40] 张志强,余新晓,赵玉涛. 森林对水文过程影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 113 - 116.
- [41] Koster R D, Milly P C D. The interplay between transpiration and runoff formulations in land surface schemes used with atmospheric models[J]. J of Climate, 1997, 10: 1 578 - 1 591.
- [42] Xu Liang and Zhenghui Xie, A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models[J]. Advance in Water Resources, 2001, 24(9 - 10): 1 173 - 1 193.
- [43] Agnes Ducharne, Catherine Golaz, Etienne Leblois et al. Development of a high resolution runoff routing model, calibration and application to assess runoff from the LMD GCM[J]. Journal of Hydrology, 2003, 280(1 - 4): 207 - 228.
- [44] Reed M. Maxwell, Norman L. Miller. On the Development of a Coupled Land Surface and Groundwater Model[J]. Journal of hydrometeorology, 2005, 6: 233 - 247.
- [45] 苏凤阁,郝振纯. 一个陆面过程模式对径流的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 423 - 433.
- [46] 谢正辉,刘谦,袁飞,等. 基于全国 50km × 50km 网格的大尺度陆面水文模式[J]. 水利学报, 2004, (5): 76 - 82.
- [47] Henderson - Sellers, A. The project for intercompazison of land - surface paramterization schemes[J]. Bull. amez. Meteor. Soc. , 1993. 74(7): 1335 - - 1348.
- [48] 高峰,王介民,孙成权,等. 遥感技术在陆面过程研究中的应用进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 359 - 366.
- [49] 全球尺度水文学: 陆地表面过程模拟的进展[J]. 地球科学进展, 1993, 8(2): 62 - 65.
- [50] Jackson T J. Soil - water modeling and remote sensing[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1986, 24(1): 37 - 46.
- [51] Hostetler S W. Hydrologic and atmospheric models: the problem of discordant scales[J]. Climate Change, 1994, 27: 345 - 350.