

陆面水文过程研究进展

曹丽娟 刘晶淼

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 在简单介绍陆面过程模式和水文模型发展的基础上,阐述了陆面水文过程包括的各种物理过程,介绍了陆面水文模式研究的发展现状,并对国内外进展作了总结。重点介绍了目前国内外用于同气候模式耦合的陆面水文模型,指出了陆面水文过程研究以及与大气模式耦合过程中存在的问题,讨论了陆面水文过程研究的发展方向:应在加强蓄满和超渗两种产流机制兼容的混合产流模型及融雪径流模型的研究的基础上,改进传统水文模型,发展基于传统水文模型的大尺度陆面过程水文模型。

关键词 陆面水文过程 径流 陆面模式 水文模型

引言

陆面过程对气候的重要作用在许多研究工作中得到了证实,如 Charney^[1,2]的地面反照率研究, Walker^[3]和 Shukla^[4]等的土壤水分对环境生态和区域气候影响的敏感性试验, Sud 等^[5]地面粗糙度的改变对陆面过程的敏感性试验。他们的工作都表明:陆面特征对气候有明显影响。

目前,在大气模式中发展更加详尽的陆面过程模式已成为气候研究中的热点问题。发展适合不同大气模式的陆面过程模式并将它们分别耦合于相应的大气模式中是大气模式发展和完善的必然趋势。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、蒸发和下渗过程都存在很强的次网格不均匀性。发生在陆面的蒸发、径流、下渗等水文过程直接影响大气降水、大气温度和大气运动等天气、气候状况,并会对区域天气、气候的形成及变化产生影响,同时气候变化会影响不同时间尺度上的降水、蒸发、径流及水循环特征。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描述^[6]。

1 陆面过程中水文过程描述

陆面过程包括陆面上发生的所有的物理、化学、生物和水文过程,以及这些过程与大气过程的相互作用,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。

最早的陆面过程研究出现在 20 世纪 50 年代, Budyko 提出简单的陆面方案来参数化大气和陆面相互作用。首先将陆面特征引入大气环流模式(GCM)的是 Manabe (1969)^[7],他首次在 GCM 中引入陆面水文过程,从而使陆面水文过程成为气候模型中的研究重点之一。他采用一个非常简单的“水桶(Bucket)”模式描述陆面水文过程,在整个陆面上将地面参数(地面反照率、空气动力学粗糙度、土壤湿度)取为均值,将土壤看作“水箱”,降水和融雪使其中的水分增加,蒸发则使其水分减少,若积累的水超过“水箱”容量,即土壤最大含水量时,多余的水成为径流。80 年代以来,出现了第 2 代物理模型,这类模型的代表有: BATS (Biosphere Atmosphere Transfer Scheme) 模型^[8]和 SiB (Simple Biosphere Model) 模型^[9]。90 年代以来,新一代陆面模式可以模拟植物的物理生物化学过程,代表模式有 SiB2^[10]、LSM^[11]和 AVIM^[12]。近 20 年来,陆面模

自然科学基金面上项目(40375035)和“中国气候系统模式创新工程”项目共同资助

作者简介:曹丽娟,女,硕士研究生,从事陆面水文过程研究

收稿日期:2004 年 3 月 10 日;定稿日期:2004 年 7 月 12 日

式的发展取得了长足的进步,尽管陆面模式在某个或某些方面的模拟效果较好,但是目前仍没有一个模式能很好地模拟整个过程。

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。然而,用于验证 GCM 网格内描述水文循环的蒸发、土壤含水量、径流深等数据很难直接获取。在陆面水循环要素中,径流是最易测得的,在世界上许多大江大河上都有常规观测点。对月、季、年水量平衡的验证,可通过对比流域总出口断面的实测径流和模拟径流,从而对 GCM 预测大尺度区域水量平衡进行检验。因此,有必要利用水文模型把每个 GCM 网格上模拟的径流深转化成流域出口断面的流量^[13]。

陆面过程中水文过程的描述主要考虑了水分收支平衡。对于陆面水分收支过程,降水一部分被植被叶面截流,一部分直接降落到地面。叶子截流的降水一部分用于蒸发,另一部分滴落到地面,与直接降落到地面的降水一起渗入土壤中或形成表面径流。土壤中的水和叶面上截流的水通过蒸发返回大气,植被的根系从土壤中抽吸水分再由叶面向大气蒸腾水汽。这样形成了一个大气、陆面水分循环圈。水分循环不仅决定了水的分布和平衡,还通过蒸发和降水过程,对能量的再分配起着决定性作用。

径流在陆面过程模式水量平衡计算中占有重要地位,却是陆面参数化过程中考虑最少的部分,径流计算的误差直接影响土壤含水量的计算精度,从而会影响蒸发以及陆面水热平衡的计算。目前,大多数陆面模式中对径流的描述主要存在以下不足:简单假定网格内的土壤植被等具有均匀的性质,没有考虑产流的不均匀性,如下渗能力的不均匀性和蓄水容量的不均匀性对产流的影响。没有考虑网格点内和网格点之间沿坡面和河网的汇流过程。因此,发展陆面水文模式,并将其耦合于陆面模式,通过提高径流的模拟精度,无疑可以大大提高陆面过程对能量和水分平衡的模拟精度。

2 陆面过程模式中水文过程研究进展

土壤水传输、径流和排水、裸土蒸发、植被蒸腾、冠层上的水分贮存与蒸发等过程都是陆面模式要考虑的水文过程,不同陆面模式对这些过程的参数化

有很大的不同。为了提高陆面模式对陆-气之间的水、能量和碳交换的模拟,国际上开展了陆面参数化方案相互比较计划(PILPS),其目的是更好地了解大气模式中陆面方案的模拟能力和可能应用^[14]。

目前陆面模式中对可能蒸发的计算主要有 3 种方法:总体动力学方法、Penman Monteith 方法和 Priestly-Taylor 方法。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。因此土壤水在陆气间能量和水分交换的物理过程中起着重要作用,是陆面水文过程必须要考虑的方面。根据土壤的分层,陆面模式中对土壤水的描述主要有:水桶型一层方案,BUCKET 和 SECHIBA2 采用此方法;强迫-恢复型两层方案,模式 VIC、ISBA、BEST、CSIRO9 和 BIOME2 等对土壤水的描述采用了此方法;扩散型多层方案,大多数模式将土壤分为 3 层,如 BGC、LAPS、LPM(Land Surface Model)、SSiB、BATS 和 CLASS 等。

PILPS 结果表明不同陆面模式对陆面水文过程的模拟结果差异较大。其中一个原因是模式考虑的径流和排水过于简单。BUCKET、SECHIBA2 和 BIOME2 等模式认为土壤底部为不透水层,不考虑重力排水。还有一些模式,如 VIC、SSiB 把重力排水和基流放在一起作为深层渗漏。由于土壤分层不同,土壤水模型亦有所不同,各模式对径流的参数化也表现出很大的差异。从径流成分上来看,一些模式除了排水以外,只考虑表层径流,如 BATS、CLASS 和 ISBA,还有一些模式在每层土壤中都考虑侧向径流,即考虑各土壤层的壤中流,如 LAPS、PLACE、BEST、CSIRO、CENTURY 等。

已有的陆面过程模式中水文循环过程只是作为被动诊断变量,估算办法既粗糙又不准确,不能反映它对气候变化影响的重要机制。Koster 和 Milliman^[15]明确指出: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。另外,蒸发既难估计准确,又难得到可靠的测量数据来印证。而全球不同流域中都有河道径流不同分辨率的长序列丰富积累数据,有利于发展模式结果的检验。所以,新一代陆面过程模型中包含一个好的水文过程显得尤为重要,并且是可能的。

在水文上,用于模拟和预测径流的水文模型早已存在。但传统水文模型重在降雨径流的模拟和水分收支的计算上,忽略对能量平衡的考虑。研究气候与水文要素的相互影响,需要水文模型与气候模型的耦合,在气候模型中应包含对陆面水文过程的现实描述,陆面参数化方案正是二者耦合的共同界面。为了提高对陆面水文过程的模拟能力,包括对地表水循环和地下水的更详尽的描述,以及对次网格降水过程的处理,提高陆面模式对径流的模拟能力,就需要发展能够同陆面模式耦合的水文模型,并寻找二者耦合的契机。

2.1 流域水文模型简介

流域水文模型根据不同的标准有多种分类^[16],根据模型结构和参数的物理完善性,目前常划分为系统(黑箱)模型、概念性模型和分布式物理模型。概念性流域水文模型代表有^[16]:美国的 Stanford 流域模型(SWM)和 Sacramento 模型,日本的 Tank 模型,中国的新安江模型等,这些模型都是集总式的。随着计算机技术, GIS, DEM 技术和遥感技术的迅速发展,分布式水文模型的研制和建立成为可能,分布式模型分为紧密耦合型和松散耦合型。分布式物理模型概念的提出始于 1969 年(Freeze 和 Harlan^[17])。SHE(European Hydrological System)^[18]模型是最早的分布式水文模型的代表,模型考虑了截留、下渗、土壤蓄水量、蒸散发、地表径流、壤中流、地下径流、融雪径流等水文过程。其后发展的 CEQUEAU^[19]模型,将流域分为方形网格,输入所有网格的地形、地貌、雨量等特征,对每一个网格进行计算,在防洪、水库设计等诸多方面有适用性。Susa^[20]流域模型,强调地表水和地下水的合成,除可模拟径流外,还可以用于预测土地利用的水文效应。

国内对分布式物理模型的研究开展较晚,但也进行了有益的探索和研究。李兰^[21,22]等提出了一种分布式水文模型,不仅可以用于分析降水径流规律,还可以用于洪水预报。郭生练等^[23]提出了一个基于 DEM(Digital Elevation Model)的分布式流域水文物理模型,该模型将流域划分为网格单元,详细描述了网格单元的截留、蒸散发、下渗、地表径流、地下径流、融雪等水文物理过程,在每一个网格上用地形高程来建立地表径流之间的关系。地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术的飞速发展,使得以数字地

形模型(DTM)、数字高程模型(DEM)存储地形信息,以地形空间变化为主要结构,用地形信息模拟水文响应的水文模型蓬勃发展起来。如郭方等^[24]将 TOPMODEL 应用在淮河流域史河水系。任立良等^[25,26]建立了基于 DEM 的数字流域水文模型,该模型的基本结构是:在流域栅格 DEM 数据上,应用数字高程流域水系模型(DEDNM)^[27]的原理和方法自动提取流域水系,构建数字流域。徐雨清等^[28]应用 GIS 与 RS 技术研究了黄土高原半干旱地区降雨径流关系问题。王腊春等^[29]将遥感资料应用到新安江模型的参数提取,用泰森多边形将流域分块,每一个分块用新安江模型计算产流,用遥感资料提取产流参数。

2.2 陆面过程模式对径流的模拟

径流,是陆面参数化过程考虑最少的部分,目前,在陆面模式中对径流过程的模拟还很不完善。GCM 中的陆面参数化方案对水文过程的描述主要限制于地表与大气之间垂直方向水分交换,但在水平方向上却假定是均匀的,即在一个 GCM 网格内认为土壤及植被特性参数不变。然而许多研究已显示了地形、土壤特性的空间不均匀性对产流、土壤含水量及蒸发计算所产生的重要影响。为了反映计算网格内由于土壤水空间分布的不均匀性所引起的产流不均匀性问题,新安江模型的蓄水容量曲线的思想得到了广泛的应用。如由新安江模型而来的 ARNO 模型^[30,31],该模型得名于最初被用于意大利 ARNO 河流域,模型包括两部分:土湿平衡和径流向流域出口的传输,该模型不但广泛用于径流预报,而且用于改进 GCM 中对水文过程(降雨、蒸发、径流)描述的不足,成功地耦合于 Hanburg 气候模型中^[32]。

VIC 模型(Variable Infiltration Capacity)是一个不断发展的陆面水文模型。该模型参加了 PILPS 许多项目^[33~37],研究了从小流域到大陆尺度再到全球尺度,在不同气候条件下的应用。模型最初由 Wood^[38]提出,仅包括一层土壤。Liang^[39]等在原模型基础上,发展为两层土壤的 VIC-2L 模型。之后又在模式中增加了一个薄土层(通常取为 100 mm),将模型发展为三层土壤模型 VIC-3L^[40,41],该模型吸取了新安江模型的蓄水容量曲线的思想,考虑了网格系统内由于地形、土壤及植被的变化产生的入渗能力的变化,网格的入渗能力用一个抛物线

型函数描述。模型考虑了陆面植被分类的次网格变化、土壤湿度空间可能分布的次网格变化、地形高度的次网格变化、低层土湿区(基流)的非线性回退、降雨的次网格空间变化等。蒸发计算采用空气动力学方法,包括冠层蒸发、裸土蒸发和植被蒸腾。VIC-3L模型已经同时考虑了两种产流机制——蓄满产流和超渗产流以及地表和地下水的相互作用过程^[42]。

VIC模型的产流思想又不断地被其它陆面参数化方案所引用,以改善以往对产流方案的处理,如法国的陆面模式ISBA^[43],以及德国的陆面模式SEWAB(Surface Energy and Water Balance)^[44]。Habets等^[45]在陆面参数化方案ISBA中耦合MODCOU大尺度水文模型,用于法国西南部Hapex-Mobilhy区域,进行日径流和日蒸发以及年水量收支的模拟。模型以单向耦合的方式运行,大气强迫输入ISBA模型,每个网格上的地表径流及重力水再进入MODCOU水文模型,经过汇流至流域出口,没有对大气的反馈。

改进陆面过程模式中对水文过程的描述,尤其是通过实测径流过程对模型进行检验,在国际上已有许多研究^[46,47]。但在国内,气候与水文工作者大都局限于各自的领域。气候工作者给出气候的可能变化,水文工作者就通过大尺度水文模型进行气候变化对水文水资源影响研究,真正气候模型与水文模型的耦合工作未见具体实施。目前已有许多研究通过在GCM中加入汇流计算方案,或者改进原有模型对径流的参数化方案,进行径流模拟。

张井勇等^[48],利用区域系统环境集成模式RIEMS(Regional Integrated Environmental Model System)与大尺度汇流模型LRM(Large-scale Routing Model)嵌套,对黄河的河川径流作了模拟。LRM以线性时不变假定为基础,能够计算水的水平传输。RIEMS-LRM在黄河上游河段的应用证实其有能力对大尺度河流的河川径流进行模拟。

苏凤阁等^[49]针对陆面过程模式AVIM(Amosphere Vegetation Interaction Model)对产流描述的不足,改进模式中对径流的参数化方法。原AVIM认为当上层土壤水分饱和时开始产流,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,不考虑汇流过程以及下垫面不均匀性对径流的影响。改进后的模型利用新安江模型中蓄水容量分布曲

线,来考虑蓄水空间分布不均匀性对产流带来的影响。为了检验耦合水文模型后的AVIM对径流的模拟能力,在模式中加入线性水库汇流模型,把计算单元上的径流深汇至流域出口断面,以和实测流量对比。将改进后的模式用于内蒙古的锡林河流域,对径流的模拟有较好的改善。

VIC模型在国内得到了广泛应用,谢正辉^[50]等利用该模型进行大尺度的水文模拟,建立了全国50 km×50 km网格植被参数库和土壤参数库。目前已经对中国的淮河、长江、黄河等流域进行了模拟。综合VIC模型和新安江模型的产汇流思想,曾新民、赵鸣等^[51]建立了一个考虑降水及入渗空间非均匀性的水文模型——VXM(a combination of the VIC and Xinanjiang Models)。它包括了VIC模型和新安江模型的参数,考虑一层土壤,两水源:地表径流和地下径流。将其引入陆面过程方案BATS中,通过与区域气候模式(RegCM2)耦合模拟试验,发现降水过程以及入渗空间非均匀性对陆面水文的模拟非常敏感。考虑入渗非均匀性后,提高了径流系数,这与湿润地区水分平衡的观测结果更一致;入渗非均匀参数化方案的引入比降水非均匀参数化方案的引入对区域水文及气候模拟的影响要大。

3 水文模型同陆面模式耦合关键问题

首先,径流的形成机制是复杂的。蓄满产流和超渗产流是两种典型的产流机制,前者发生于湿润地区,后者发生于干旱地区。半湿润、半干旱区,两者皆可发生。即使在湿润区,久旱后遇到强大的暴雨,也会有超渗产流。同样,干旱区遇上长期连绵的降雨,也会存在蓄满产流。产流机制受地形、土壤、地质、植被和气候条件的影响。由于陆表覆盖(植被、土壤)具有高度的非均匀性,目前对土壤水、蒸散发等水文过程的描述还缺乏一种行之有效的方法。

其次,尺度问题仍然是关注的热点。根据Dooge^[52]的观点,水文学在空间上跨度15个序列尺度,从水分子尺度(10^{-6} m)到全球水文循环的尺度(10^7 m)。实际上,水文研究习惯于流域尺度,即Dooge^[52]定义的中尺度及大尺度中低阶部分($10^2 \sim 10^5$ m)。按照Hostetler^[53]的观察结果,无论是GCM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。以尺度为突破口,寻找水文模型同陆面模式耦合的尺度界面将是研究关键。

目前气候变化对陆地水循环影响的主流研究方法是水文-气候模型单向连接方法,即由气候模型输出的产品来驱动流域水文模型,水文模型给出水文要素变化。在不同的产流机制条件下,采用不同的水文模型。这种单向连接方法存在很多不确定性:在气候模型与陆地水文模型分步独立地运算过程中,由于二者对陆面参数的取法不同,对同一网格或流域得到不同的蒸发估算及土壤水估算,使得GCM与水文模型对水量平衡、热量平衡描写的不一致,对水文循环缺乏从整体上、物理上一致的描写。另外,由于二者不能共享对陆面过程模拟的结果,水文模型不能实时地利用大气强迫改进对土壤水和蒸发的计算,气候模型也不能借鉴水文模拟的结果和实测径流资料实时地验证并修改其对陆面过程模拟的精度。在水文模型中,对于蒸发能力的高估或低估导致夸大或缩小气候变化对径流的影响,影响对气候的模拟与预测^[54]。

基于水量平衡的概念性水文模型,能够以离线(off-line)方式使用气候模型的输出作为水文模型的输入,模拟计算大流域的径流过程。然而传统水文模型有以下不足^[55]:①一种被动式接受,反响型的模型,它以降水为驱动因子,发展自身流域内产流汇流过程,这种过程描述方式没有与其上大气相互作用互为反馈的功能,无法表达对大气的反馈影响作用;②多数参数需通过资料率定,和地理特征的关系不直接;③未显式的考虑植被的作用;④计算中未考虑能量平衡,缺乏与气候模型的耦合能力;⑤空间尺度较小:中、小尺度(1~10 km,以流域为单元);时间尺度较短:小时-日。

观测资料依然缺乏。用于验证GCM网格内描述水文循环的蒸发、土壤含水量、径流深等数据很难直接获取。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,但是目前对降雨的观测还存在很大误差。

4 陆面水文模式发展方向

(1)立足于产汇流机理研究,运用新的技术方法,不断改进水文模型结构。加强蓄满和超渗两种产流机制兼容的混合产流模型及融雪径流模型的研究。需要改进地表水文参数化方案中对地表蒸发量的计算,引入对蒸发和降水有更加真实响应的水文过程,引入比较符合实际的土层渗透过程。这就需

要对次网格的水文过程尤其是对降水过程进行更加真实的参数化。新一代的水文模式应努力实现植被与土壤耦合,水量与能量耦合。尽量从物理基础上去描述蒸散发、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。

(2)改进传统水文模型,发展基于传统水文模型的大尺度陆面过程水文模型^[54]。大尺度陆面水文模型的空间尺度达到 10^5 km。时间尺度从日、月到年。它应该是主动式的模型,描述物理过程的参数化方案应是大气过程相互作用的,又能在全球变化模型体系中具有预测性的功能。作为二维的模型,应充分考虑地形地貌和下垫面及降水非均匀对二维水文特性的重要作用,对流域内产流汇流二维特点能有较真实的描述。模型中所包含的参数应尽可能以明确的物理规律为基础,使结合后的模型能较真实地预报径流过程、未来气候极端事件及由此产生的水文极端事件^[54,56]。

(3)陆气耦合中,水文模式与气候模式在时间和空间尺度上存在差异。在空间上,水文模型的应用突破了原有的流域界限而扩大到与GCM相应的大尺度区域上。在时间上,气候模式的积分步长从几分钟到1 h不等,而水文模型的时间步长从小时到月不等。当取共同积分时段,如何在大尺度范围内率定水文模型中的产汇流参数,是一个难题。主要原因是在气候模式大范围区域上难以获取率定模型参数所需的长时间序列和短时段间隔的降雨径流资料。研究资料的解集方法,如将月资料解集到日,日资料解集到小时,不失为解决大范围内资料缺乏问题的一种途径,也是解决水文模型与气候模式在时间和空间尺度上不相匹配的一种有效方法。

(4)迅速发展的航测及遥感技术为大尺度陆面水文模型研究提供了良好时机。降雨作为水文模拟的主要输入,随着遥感技术对降雨更准确的估计,必将提高水文模拟和预报的精度,并可以将模型用于无资料地区。水文模型需要精细的地形、地貌、植被、气候及水文资料。目前利用航测及遥感技术已有可能提供1 km分辨率的植被分布、地形地貌(高程、坡度、坡向、分水岭、河道及集水面积)的数据集,美国正在收集整理具有几百米(200 m)分辨率的土壤数据。GIS及DEM技术迅速发展,可叠加各种地理特征,作各种聚集、分类及插值计算,获取更高精度水文信息。高性能计算机不断发展及性能良好

的可视化软件出现,必然会促进陆面水文过程研究。

参考文献

- 1 Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1975, 101(428):193 - 202
- 2 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. Atmos. Sci.*, 1977, 34(9):1366 - 1385
- 3 Walker J, Rowntree P R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1977, 103: 29 - 46
- 4 Shukla J, Mintz Y. Influence of land surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science*, 1982, (215):1498 - 1501
- 5 Sud Y C, Shukla J, Mintz Y. Influence of Land Surface Roughness on Atmospheric Circulation and Rainfall: A Sensitivity Experiment with a GCM. *NASA Tech. Memo*, 1985. 86 - 291
- 6 苏凤阁,郝振纯.陆面水文过程研究综述. *地球科学进展*, 2001, 16(6): 795 - 801
- 7 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 - 805
- 8 Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere Atmosphere Transfer scheme (BATs) for NCAR Community Climate Model. *NCAR/TN-275+STR*, 1986
- 9 Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, 1986, 43(6):505 - 531
- 10 Colello G D, Grivet C, Sellers P J, et al. Modeling of energy, water and CO₂ flux in a temperate grassland ecosystem with SiB2: May-October 1987. *J. Atmos. Sci.*, 1998, 55:1141 - 1169
- 11 Bonan G B. A Land Surface Model (LSM Version 1.0) for Ecological, Hydrological, and Atmospheric Studies: Technical Description and User's Guide. *NCAR Technical Note/TN-417+STR*, 1996
- 12 季劲钧,余莉.地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究. *大气科学*, 1999, 23(4):339 - 448
- 13 Jolly T J, Weather H S. The introduction of runoff routing into large-scale river basins. *Hydrol. Proc.*, 1997, 11:1917 - 1926
- 14 Henderson S A, Yang Z L, Dickinson R E. The project for intercomparison of land surface parameterization schemes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, 74:1335 - 1349
- 15 Koster R D, Milly P C D. The interplay between transpiration and runoff formulations in land surface schemes used with atmospheric models. *J. of Climate*, 1997, 10:1578 - 1591
- 16 袁作新. *流域水文模型*. 北京:水利电力出版社, 1990
- 17 Freeze R A, Harlan R L. Blue print of a physically-based digitally-simulated hydrological response model. *Journal of Hydrology*, 1969, 9:237 - 258
- 18 Storm B, Jensen K H. Experiences with field testing of SHE on re-search catchments. *Nordic Hydrology*, 1984, 15:283 - 294
- 19 Charbonneau R, Fortin J P, Morin G. The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management. *Hydrological Science Bulletin*, 1977, 22 (1/3): 193 - 202
- 20 Refsgard J C, Hansen E. A distributed groundwater/ surface water model for the Susa catchment, Part I—model description. *Nordic Hydrology*, 1982, 13:299 - 310
- 21 李兰,郭生练.流域水文数学物理耦合模型.见:朱尔明编.中国水利学会优秀论文集.北京:中国三峡出版社, 2000. 322 - 329
- 22 李兰,郭生练.流域水文分布动态参数反问题模型.见:朱尔明编.中国水利学会优秀论文集.北京:中国三峡出版社, 2000. 48 - 54
- 23 郭生练,熊立华,杨井,等.基于DEM的分布式流域水文物理模型. *武汉水利电力大学学报*, 2000, 33(6): 1 - 5
- 24 郭方,刘新仁,任立良.以地形为基础的流域水文模型-TOP-MODEL及其拓宽应用. *水科学进展*, 2000, (9):296 - 301
- 25 任立良,刘新仁.数字高程模型在流域水系拓扑结构计算中的应用. *水科学进展*, 1999, (6):129 - 134
- 26 任立良.流域数字水文模型研究. *河海大学学报*, 2000, (7):1 - 7
- 27 Martz W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 1992, 18(6): 747 - 761
- 28 徐雨清,王会之.遥感和地理信息系统在半干旱地区降雨-径流关系模拟中的应用. *遥感技术与应用*, 2000, 15(1):28 - 31
- 29 王腊春,熊江波.用遥感资料建立分块产流模型. *地理科学*, 1997, (2):76 - 80
- 30 Franchini M, Pacciani M. Competitive analysis of several conceptual rainfall runoff models. *J Hydrol.*, 1991, 122:161 - 219
- 31 Todini E. The ARNO rainfall-runoff model. *J Hydrol.*, 1996, 175: 339 - 382
- 32 Dumenil L, Todini E. A rainfall-runoff scheme for use in the Hamburg climate model. In: Kane J P, ed. *Advance in Theoretical Hydrology*. New York: Elsevier Science Publishers, 1992. 129 - 157
- 33 Shao Y, Henderson-Sellers A. Validation of soil moisture simulation in land surface parameterization schemes with HAPEX data. *Global Planet Change*, 1995, 13:11 - 46
- 34 Chen T C, Henderson-Sellers A, Milly P C D, et al. Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land surface parameterization scheme. *J. Climate*, 1997, 10:1194 - 1215
- 35 Wood E F. The Project for Intercomparison of Land surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase 2(c) Red Arkansas River basin experiment: 1. Experiment description and summary inter-comparisons. *Global and Planetary Change*, 1998, 19:115 - 135
- 36 Liang X. The Project for Intercomparison of Land surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase 2(c) Red Arkansas River basin experiment: 2. Spatial and temporal analysis of energy fluxes. *Global and Planetary Change*, 1998, 19:137 - 159

- 37 Lohmann D. The Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase 2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 3. Spatial and temporal analysis of water fluxes. *Global and Planetary Change*, 1998, 19:161 - 179
- 38 Wood E F, Lettenmaier D P, Zaitarian V G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *J Geophys Res*, 1992, 97(D3): 2717 - 2728
- 39 Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(D3): 14 415 - 14 428
- 40 Xu Liang, Zhenghui Xie. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models. *Advances in Water Resources*, 2001, 24: 1173 - 1193
- 41 Liang Xu, Xie Zhenghui. Important factors in land-atmosphere interactions: surface runoff generations and interactions between surface and groundwater. *Global Planetary Change*, 2003, 38: 101 - 114
- 42 Liang Xu, Xie Zhenghui. A new parameterization for surface and groundwater interactions and its impact on water budgets with the variable infiltration capacity (VIC) land surface model. *Journal of Geophysics Research*, 2003, 108(D16): GCP 8 - GCP 8 - 17
- 43 Noilhan J, Mahfouf J F. The ISBA land surface parameterization scheme. *Global and Planetary Change*, 1996, 13:145 - 159
- 44 Mengelkamp H T, Warrack K, Raschke E. SEWAB—a parameterization of the surface and water balance for atmospheric and hydrologic model. *Advances in Water Resources*, 1999, 23: 165 - 175
- 45 Habets F, Noilhan J, Gola Z C, et al. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobility area. Part II: Simulation of streamflow and annual water budget. *J. Hydrol.*, 1999, 217: 75 - 96
- 46 Liston G E, Sud Y C, Wood E F. Evaluation GCM land surface hydrology parameterizations by computing river discharges using a runoff model: application to the Mississippi basin. *J. Appl. Meteor.*, 1994, 33: 394 - 405
- 47 Miller J R, Russell G L, Caliri G. Continental-scale river flow in climate models. *J. Climate*, 1994, 7:914 - 928
- 48 Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. Streamflow simulation for the Yellow River basin using RIEMS and LRM. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(3): 415 - 424
- 49 苏凤阁,郝振纯. 一种陆面过程模式对径流的模拟研究. *气候与环境研究*, 2002, 7(4):423 - 432
- 50 Xie Zhenghui, Su Fengge, Liang Xu, et al. Applications of a surface runoff model with Horton and Dunne runoff for VIC. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(2): 165 - 172
- 51 曾新民,赵鸣,苏炳凯,等. 一个水文模型与区域气候模式耦合的数值模拟研究. *大气科学进展(英文版)*, 2003, 20(2): 227 - 236
- 52 Dooge J C I. Hydrology in perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 1995, 33:61 - 85
- 53 Hostetler S W. Hydrologic and atmospheric models: the problem of discordant scales. *Climate Change*, 1994, 27: 345 - 350
- 54 刘春蓁. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题. 香山科学会议 187——全球变化与中国水循环前沿科学问题, 2002. 23 - 26
- 55 孙菽芬. 陆面过程和模型发展研究. 香山科学会议 187——全球变化与中国水循环前沿科学问题, 2002. 30 - 36
- 56 刘春蓁. 气候变异与气候变化对水循环影响的研究方法和主要成果. *水文*, 2003, 23(4):1 - 7

Review of Land Surface Hydrological Process Studies

Cao Lijuan Liu Jingmiao

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The hydrological models used in Land-surface models are briefly introduced. The physical processes of land-surface hydrological processes and the developing status of land-surface hydrological model studies in China and abroad are briefly summarized. Land-surface hydrological models which are coupled with climate models are reviewed. The weakness and possible solutions in land-surface hydrological process modeling and coupling process studies are pointed out. The developing directions of land-surface hydrological processes are discussed. It is pointed out that more attention should be paid to both infiltration excess, saturation excess and snow models, and the large-scale land surface hydrological model should be developed based on tradition hydrological models.

Key words: land-surface hydrological process, runoff, land-surface model, hydrological model