



气候变化与区域水分收支 实测、遥感与模拟

Climate Change and Regional Water Budget:
Measurement, Remote Sensing, and Simulation

邱国玉 李瑞利 等/编著



科学出版社

气候变化与区域水分收支： 实测、遥感与模拟

**Climate Change and Regional Water Budget:
Measurement, Remote Sensing, and Simulation**

邱国玉 李瑞利 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

前 言

老子曰：“上善若水，水善利万物而不争。”由此可见，早在几千年前我们的先哲就深刻地认识到“善水”可以应对人类面临的各种挑战。光阴荏苒，进入 21 世纪，气候变化成为当今人类面临的最重要的课题。几十年来，随着人类对气候变化认识的逐步深入，应对气候变化的态度和行动也随之不同。最初的态度是如何“阻止气候变化”，后来发现阻止气候变化可能是一个长期过程，仅靠阻止气候变化还不够，还需要“应对气候变化”。最近 10 年来，对气候变化的认识空前深入，取得了很多重大成果。在这些研究的基础上，人类认识到气候变化已经成为一种不可逆转的趋势，我们可以做到的只有如何减缓气候变化的幅度和如何适应气候变化。“适应气候变化”已成为现在人类社会的主题。

虽然适应气候变化的方式多种多样，“善水”是适应气候变化的关键，也是人类的共识。要“善水”，必须先要“知水”。“知水”的内容很多，水分收支是“知水”的重要内容。

近几十年来，我国在经历快速气候变化的同时还经历着剧烈的土地利用变化。在气候变化和人类活动的双重影响下，原本脆弱的生态环境进一步恶化，由此产生了更为严峻的水资源短缺，适应气候变化的任务尤为艰巨，迫切需要研究气候变化和土地利用/覆盖变化对流域水循环和水资源的影响。由于气候变化和人类活动引起的土地利用/覆盖变化对陆地生态水文过程的影响日益深刻，这要求我们及时把握变化环境下的水资源形成与演化规律，保障水资源安全，实现水资源的可持续利用。

水分收支主要包括降水、蒸散发、径流和入渗等过程。其中蒸散发是地球水文循环中不可或缺的关键环节之一，它的发生伴随着能量和水分在土壤—植被—大气之间相互转移，调节局部或区域气候。因此，蒸散发不仅是水量平衡中的关键部分，而且还是地表能量平衡中的重要组成部分。鉴于地表能量交换与水分循环这两个重要的过程能在很大程度上决定环境的特征，蒸散发的定量研究受到了广泛关注，尤其是在水量平衡与水资源管理方面。

土壤水作为陆面水资源形成、转化和消耗过程研究中的基本媒介，是联系地表水和地下水的纽带，也是研究地表能量交换的基本要素，直接控制着地表与大气间的水热输送和平衡，对全球气候环境变化有着重要影响。

本书针对适应气候变化的核心内容——水分收支，以 10 年的研究成果为基础，系统阐述了气候变化与水分收支的理论及水分收支的实测、遥感及模拟。运用水文学、地理学、生态学、气象学、地理信息与遥感科学基本原理，采用水文模型耦合方法，结合野外实验和调查，以关键区域和关键时段水分收支变化为突破口，找出影响水分收支变化的关键因素，阐明缺水问题背后复杂的气候变化与人类活动对水资源系统脆弱性的影响机制，并提出区域水资源有序适应模式，形成的理论、方法与技术体系将可为其他类似研究提供借鉴，也可以为水资源管理和适应气候变化工作提供指导。

本书是师生合作研究的成果。邱国玉教授主要负责本书的研究思路、理论构建和研究方法等方面的设计,并组织撰写工作;师生密切合作并频繁交流,共同完成了书稿审定工作。由于水分收支与气候变化研究的复杂性,加之作者水平有限,书中可能会存在一些不足之处,诚请各位读者批评指正。

邱国玉 李瑞利

2011年1月于北京大学

目 录

前言

第一部分 气候变化与区域水分收支研究进展

第一章 气候变化、土地利用变化与生态水文过程	3
第一节 土地利用变化对生态水文过程的影响	3
第二节 气候变化对生态水文过程的影响	4
第三节 气候变化和土地利用变化对生态水文过程的影响	6
第四节 区域水分收支研究的手段——分布式水文模型	6
参考文献	9
第二章 农田的水分收支与作物水分利用效率	12
第一节 水分在土壤—植物—大气系统中的运动	12
第二节 作物的水分利用效率	13
第三节 水分收支的研究方法	16
参考文献	20
第三章 土壤湿度及其遥感监测	24
第一节 可见光—反射红外波段的应用	24
第二节 热红外波段的应用	26
第三节 高光谱遥感的应用	32
第四节 微波波段的应用	33
参考文献	40
第四章 区域水分蒸散发与蒸散发模型	47
第一节 传统蒸散发模型	47
第二节 区域蒸散发模型	49
参考文献	55

第二部分 气候变化背景下的区域 水分收支的外场观测与机制研究

第五章 农作物生长发育对气候变化的响应	63
第一节 数据来源与分析	63
第二节 冬小麦和玉米对区域气候变化的响应	65
第三节 本章主要结果	86
参考文献	87

第六章 冬小麦的水分收支特征和水分利用效率	88
第一节 研究区的立地条件及研究方法	88
第二节 不同灌水量下冬小麦的水分生理特征和水分利用效率	97
第三节 不同播种量和秸秆覆盖量下冬小麦水分特征和水分利用效率	114
第四节 冬小麦水分动态和水分利用效率综合模拟	121
第五节 本章主要结果	127
参考文献	129
第七章 抑制农田土壤蒸发的节水措施及机理研究	133
第一节 田间试验设计及数据采集	133
第二节 行距对冬小麦土壤蒸发和水分利用效率的影响	135
第三节 秸秆覆盖和播种量对冬小麦土壤蒸发和水分利用效率的影响	142
参考文献	155
第八章 基于红外热成像技术的小流域蒸散发观测	156
第一节 研究方法	156
第二节 小流域不同尺度条件下的蒸散特征	166
参考文献	174
第九章 半干旱区退耕草地水分收支的实验研究	176
第一节 研究区概况与研究方法	176
第二节 蒸散发特征及其分析	183
第三节 水分收支特征	190
参考文献	192

第三部分 气候变化背景下的区域水分收支的遥感研究

第十章 密云水库上游汤河流域水资源的遥感评价	197
第一节 基于三温模型的蒸散发计算及验证	197
第二节 北京水源涵养区植被恢复对蒸散发的影响	206
第三节 本章主要结果	211
参考文献	211
第十一章 河北平原东部土壤湿度的遥感观测	213
第一节 试验区域选择与研究方法	213
第二节 应用 MODIS 监测河北平原的土壤湿度	217
第三节 应用 ASAR 监测河北平原的土壤湿度	236
第四节 本章主要结果	258
参考文献	259
第十二章 基于地面温度的区域蒸散发遥感模型及其应用	263
第一节 基于温度差的区域蒸散发模型及其参数反演	263
第二节 模型反演的日蒸散发量及其验证	281
第三节 区域蒸散发模型的敏感性分析及模型简化	305

第四节 简化模型在泾河流域水资源管理中的应用·····	312
第五节 本章主要结果·····	325
参考文献·····	326
 第四部分 气候变化背景下区域水分收支的模拟研究	
第十三章 气候变化对泾河流域器皿蒸发量和流域干旱化的影响·····	333
第一节 研究方法·····	333
第二节 流域水分蒸发与地表湿润指数变化特征及原因分析·····	339
第三节 未来流域蒸发能力和干旱化程度的变化预测·····	348
第四节 流域干旱化适应对策探讨·····	352
第五节 本章主要结果·····	355
参考文献·····	356
第十四章 气候变化和土地利用变化对泾河流域生态水文过程的影响·····	358
第一节 研究区概况及研究方法·····	358
第二节 SWAT 模型及其构建 ·····	365
第三节 泾河流域 SWAT 模型数据库的构建 ·····	377
第四节 气候和土地利用/覆被变化对泾河流域径流、蒸散发的影响·····	391
第五节 本章主要结果·····	406
参考文献·····	407
第十五章 泾河流域“退耕还林”工程对气候变化的适应效益分析·····	408
第一节 子流域的选取·····	408
第二节 不同子流域蒸散、径流对比研究 ·····	409
第三节 不同子流域内土壤含水量、地表径流对比研究 ·····	412
第四节 本章主要结果·····	413
参考文献·····	413
 致谢·····	 414

第一部分 气候变化与区域 水分收支研究进展

第一章 气候变化、土地利用变化与生态水文过程^①

第一节 土地利用变化对生态水文过程的影响

目前,人类面临的许多环境与发展问题都与土地利用/覆被变化(LUCC)有关,尤其是20世纪以来,全球洪涝灾害的频率远远高于以往任何时期,由人类活动引起的LUCC变化是重要的原因之一(史培军等,2002)。未来50~100a,人类的土地利用活动将对LUCC起最主要的作用(张世文和唐南奇,2006)。LUCC研究已成为地理学综合研究的国际性前沿课题(何春阳和史培军,2004;冷疏影,2000)。自1995年“国际地圈—生物圈计划”(IGBP)和“全球环境变化人文计划”(IHDP)编辑出版了LUCC项目的“科学研究计划”以来,相关研究在国际上普遍展开(Desanker,1997;Lambin et al.,1999;Skole and Tucker,1993;Turner et al.,1994;Meng et al.,1995;Ramankutty and Foley.,1999;Lambin et al.,1999)。国内的LUCC研究也取得了丰硕的成绩(李秀斌,1996;傅伯杰等,1999;史培军等,2000;张懿铨等,2000;龙花楼等,2002;摆万奇和柏书琴,1999;蔡运龙,2001;何春阳等,2005;黄明斌等,1999;陈军锋等,2001;石培礼和李文华,2001;王清华和李华恩,2004)。

随着计算机科学、地理信息系统与遥感技术的发展,LUCC与水文循环的关系研究由传统的统计分析方法转向水文模型方法。通过水文模型来模拟不同下垫面条件下的径流量时,不仅可以考虑流域的综合因素对水文过程的影响,而且还能通过控制某些参数,找出控制和影响水文循环的土地覆被变化因素。有大量的研究分析了土地利用对流域径流的影响(Eles and Blackie,1993;Arnold and Allen,1996;Goodrich et al.,1996),形成大量的降水—径流模型。水文模型在我国流域LUCC水文效应研究方面得到了广泛的应用,取得了一定的研究成果(邓慧平和李秀彬,2003;谢平等,2007;王根绪等,2005;郑璟等,2005;朱新军等,2006)。例如,中国科学院南京地理与湖泊研究所的李恒鹏、杨桂山等,以太湖地区蠡河流域为研究区,通过解译1984年、1995年和2000年3个时段TM/ETM获得土地利用分布地图,分析其土地利用变化的模式,并基于研究区30年的降水序列,应用长周期水文分析模型(long-term hydrologic impact assessment,L-THIA),计算3个时段土地利用特征对暴雨地表径流的影响,分析了不同土地利用类型水文效应的敏感性,在此基础上总结了减少流域水文效应的土地利用管理策略(李恒鹏等,2005)。中国科学院地理科学与资源研究所的莫兴国、刘苏峡等利用黄土高原无定河流域1982~1991年的水文气象、土地利用、土壤质地、数字高程和NOAA-AVHRR遥感信息,建立基于土壤—植被—大气传输机理的分布式生态水文模型——VIP,模拟流域水量平衡的时空分布。研

^① 本章作者:邱国玉、尹婧、李瑞利。

究发现:该流域年累计平均植被指数(NDVI)与降水年总量关系不明显,说明该流域植被的生长并不完全受控于降水总量;整个流域模拟时段的平均降水量、蒸腾量有明显的年际波动,而地表径流的年际变化相对较小,降水量和实际蒸散量呈现显著的空间分异性,从而得出在西北干旱半干旱区,LUCC 对水量平衡的影响非常复杂的结论(莫兴国和刘苏峡,2004)。

北京师范大学的史培军和袁艺应用美国农业部水土保持局研制的 SCS(soil conservation service)模型探讨了深圳市不同下垫面条件对流域径流的影响:随着人类活动的加剧,土地利用的变化使径流量趋于增大;降雨径流的空间格局随土地利用方式、土壤类型、前期土壤湿润程度而发生变化(史培军和袁艺,2001)。也有不少的学者分别应用 SCS 模型 MUSLE 进行产流和产沙的研究。例如,徐秋宁等用 SCS 降水—径流模型对陕北、渭北多个小型集水区降雨径流量进行了分析与计算(徐秋宁和马孝义,2002)。贺宝根和周乃晟(2001)利用 SCS 模型对上海郊区农田非点源污染进行研究。北京师范大学的何春阳和史培军(2004)利用系统动力学(SD)的原理和方法,发展了区域土地利用情景变化 SD 模型。在不同系统状态下,模拟了中国北方 13 省未来 50a 不同社会经济情景下的区域土地利用结构变化,并初步评价了这些变化的可能生态影响。河海大学的袁飞、任立良和中国科学院大气物理所的谢正辉应用大尺度陆面水文模型——可变下渗能力(variable information capacity, VIC)模型与区域气候变化影响(providing regional climate for impacts studies, PRCIS)模型耦合,对气候变化情景下海河流域水资源的变化趋势进行预测。结果表明:未来气候情景下,即使海河流域降水量增加,年平均径流量仍将可能减少,预示海河流域的水资源将十分短缺(袁飞和谢正辉,2005)。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的蓝永超和沈永平(2006)利用大气环流模型(GCMs)与统计模式对未来流域气温、降水和径流的可能变化进行了预测,得出未来 30a 里黄河源区的温度将进一步上升,并且降水量也有显著增加。

第二节 气候变化对生态水文过程的影响

气候变化将改变全球水文循环的现状,从而引起水资源在时空上的重新分配,并对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接影响。气候系统内部的任何变化都将在水文循环的关键水文要素中得到反映。气温升高时,蒸发加剧,土壤水分及下渗强度也将随之改变。反之,水文要素的变化同样对气候系统直接或间接地产生影响,陆面土壤湿度、反射率及植被的变化反过来也将影响土壤蒸发、植被蒸腾、云的形成、陆面净辐射及降水等(袁飞,2006)。大气中不断增加的温室气体引起了全球性的气候变化,加剧某些地区的洪涝、干旱灾害,对水文循环等方面产生了重要影响,气候变暖越来越引起了人们的关注。20 世纪 70 年代末期,由世界气象组织(WMO)、联合国环境规划署(UNEP)、国际水文科学协会(IAHS)等国际组织先后开展并实施了世界气候影响研究计划(WCIP)、全球能量水循环试验(GEWEX)等项目的研究。

自 20 世纪 80 年代起,国内外学者围绕气候变化对水文水资源系统的影响,从不同学科角度、不同时空尺度展开了研究。Nash(1990)采用美国国家气象局开发的概念性水文

模型,研究科罗拉多河流域对气候变化的响应,结果显示:气温增加 2°C 将使年径流减少 $9\%\sim 21\%$;降水量增加或减少 $10\%\sim 20\%$ 将使年径流量相应产生 $10\%\sim 20\%$ 的变化。Kalzmark(1991)运用 GFDL 气候模式生成两倍的 CO_2 浓度下的气候情境作为月水量平衡的输入,对波兰 Varty 流域的径流变化进行模拟,结果表明:随着全球气候变暖,年径流量变化较小,冬季径流量上升 21% ,夏季径流量上升 24% 。Wetherald 和 Manabe(2002)采用海洋—大气—陆地耦合模式预测 IS92a 情景下全球水文循环变化。该模式预测 21 世纪中叶全球平均温度较工业化前水平上升 2.3°C ,降水量和蒸发量均增加 5.2% ,径流平均增长 7.3% 。

一般来说,径流与降水变化趋势一致,与气温变化趋势相反,但是在局部地区由于温度升高,增加的降水超过蒸发的影响,径流随着气温升高反而增加;干旱地区气温对径流的影响比降水对径流的影响更加显著,而在湿润地区,降水对径流的影响比气温对径流的影响更加显著(陈玲飞和王红亚,2004)。国家气象中心的王守荣等(2003)研究了气候变化对西北水循环和水资源的影响,得出气温升高使得我国西北地区天然径流量减少,水资源供需矛盾更加突出。中国气象局兰州干旱气象研究所的邓振镛等(2006),分析了 1951~2000 年气候变化对渭河上游径流量和输沙量的影响,研究表明:渭河上游径流量变化总体呈下降趋势,跃变点发生在 1967 年,20 世纪 60 年代径流量最大,90 年代以后径流量最小;径流量的变化主要取决于流域降水量的变化;输沙量的多少主要取决于上游降水量的多少和大雨的次数,其次是风速大小和大风次数的多少。陕西师范大学的延军平等(1999)分析了陕西、甘肃境内 3 条河流:无定河、汉江、渭河具体信息如下:渭河 32a(1965~1996)无定河 43a(1954~1996)汉江 44a(1953~1996)气象、水文实测资料,假定自然状态下,地表径流与降水、气温之间存在相对稳定的比例关系这个前提条件,分析气候对地表径流的影响。研究发现:中国内陆的中纬度地区气候暖干化使年地表径流量减少趋势显著。中国科学院的叶柏生与中国水利水电科学研究院的李舫应用全国范围内的 678 个气象站 1951~1998 年长系列逐月降水资料以及主要控制水文站同期径流资料,分析了径流变化对气候变化的响应以及由此带来水资源问题(叶柏生和李舫,2004,2005)。中国科学院的郭宗锋等(2006)分析了西双版纳境内的流沙河流域 40a 降水与径流的变化以及它们之间的关系。研究发现:1959~2000 年,降水量没有发生明显的变化,尤其是在干季;径流量从 20 世纪 60 年代开始减小,但在 90 年代后期又有所增加。同时还得出除降水量的增减和季节变化外,径流量还受到其他因素(如人类活动)的影响,而且这种影响的趋势越来越大。黄河水利科学研究院的王国庆和王云璋(2002)利用月水文模型,采取假定气候方案,分析了黄河上中游径流对气候变化的敏感性。结果表明,径流对降水变化的响应敏感,对气温变化的响应相对较弱。中国科学院寒旱区环境与工程研究所的韩添丁等(2004)也分析了黄河上游 20 世纪后期近 40a 来径流变化特征及其与气候变化的关系。发现黄河上游普遍存在温度升高、降水减少的变化趋势以及黄河上游自然来水径流量呈显著减少的趋势,1990 年以后减小的趋势更加明显。中国科学院寒旱区环境与工程研究所的蓝永超和林舒(2006)分析了黄河上游有实测资料的几十年来降水、温度、径流等水循环要素的变化过程与特征。研究发现,近几十年来黄河流域各个地方温度有着不同程度的上升,与全球变暖有着明显的对应关系;而随着气温的上升,蒸发和下渗呈增加

的趋势。降水变化的区域性特征十分明显,降水量的增减随地理位置不同而差异较大。

第三节 气候变化和土地利用变化对生态水文过程的影响

目前,全球变暖、植被破坏、土地退化以及洪涝灾害频繁发生,给水文科学研究提出了新的挑战,即变化环境下的水资源形成与演化规律问题,它是国际国内地学领域积极鼓励的创新研究课题。气候与 LUCC 对流域水量平衡与水循环以及洪水干旱的影响是全球变化研究中的一个重要方面。国内外已广泛开展了气候变化水文水资源影响研究及 LUCC 的水文效应研究。近年来,已经重新综合分析了气候与 LUCC 的水文效应。气候变化和 LUCC 对水循环的影响是研究的热点问题。

例如,湖南师范大学的邓惠平和中国科学院地理科学与资源研究所的李秀彬分析了梭磨河流域 1960~1990 年近 30a 的气温、降水以及森林、草地土地覆被类型变化对流域径流、蒸散发、径流系数的影响,得出了在气候和土地利用/地表覆被共同作用下,流域水文发生了较明显变化的结论(邓惠平和李秀彬,2001)。他们还应用具有物理基础的半分布式地形指数模型(TOPMODEL),对位于长江源头,流域面积 2536 km² 的梭磨河流域 1960~1999 年逐日流量过程进行了模拟,取得了较好的模拟结果。同时,还模拟了 40a 来,流域气候波动和地表覆被变化对流域水文的影响,分析了土地覆被变化对流域水量平衡各分量的影响:在不考虑降水变化的前提下,随着流域有林地面积和冠层最大截流量的增加,流域总蒸发和冠层截留增加,植被蒸腾和土壤表面蒸发减少,根系层水分亏缺减少,流域平均水分亏缺增加,地表径流、地下径流、总径流均减少(邓惠平和李秀彬,2003)。北京大学遥感与地理信息系统研究所的陈军锋和张明(2003)利用一个集总式水文模型(CHARM),也以梭磨河流域为研究对象,模拟了不同的气候与土地覆被条件下流域的水量平衡,定量区分气候波动和土地覆被变化对水文影响的“贡献率”。模型模拟的初步结果表明,20 世纪 60~80 年代,径流深增加了 45.7mm,其中,由气候波动所引起的年平均径流深的增加占 63.9%,由土地覆被变化所引起的径流深的增加占 20.8%,其他条件的变化所引起的径流深的增加占 15.3%。中国科学院地理科学与资源研究所的王纲胜等(2006)建立了一个简单的分布式月水量平衡模型(DTVGM),通过设置人类活动影响背景参数集,表述人类活动对水文过程的影响。将 DTVGM 月模型应用于华北地区密云水库以上潮白河流域,识别出白河流域气候变化对径流减少的贡献为 44%,人类活动导致下垫面变化对径流减少的影响达 54%;潮河流域气候变化对径流减少的贡献率为 24%,而人类活动对径流减少的贡献率高达 74%,是导致径流减少的主要原因。

第四节 区域水分收支研究的手段——分布式水文模型

一、分布式水文模型发展历程

水文模型是对自然界中复杂水文现象的一种简化,为研究气候、人类活动和水资源之间的关系提供了一个框架(Jothityangkoon et al., 2001; Leavesley, 1994),水文模型一直

都是水文科学研究的重要手段与方法之一(赵人俊,1984)。水文模型是水文学发展到一定阶段的产物,并伴随着水文学的发展而发展。现代水文模型出现于应用水文学的兴起阶段,特别是1932年Sherman提出水文单位过程线的概念以及Horton提出经典的地表径流入渗理论后。Sherman和Horton的模型在流域径流模拟方面吻合得很好,这两个模型共同控制了水文学长达十几年之久。

20世纪50年代以来,在计算机大量引入水文研究领域后,开始采用数学、物理方法来模拟径流形成过程,建成数学模型,进行流域产汇流计算,在水文计算和水文预报等方面发挥了很好的作用,先后提出了许多流域产汇流模型。20世纪60~80年代中期,是水文模型蓬勃发展的时期。在此期间,一些比较著名的水文模型相继提出并得到了相应的应用。例如,SSARR(Bergström and Forsman,1973)模型、Standford模型、Sacramento模型、TANK模型(Sugawara et al.,1974)、SHE(Abbott et al.,1986;Bathurst,1986)、HSPF(Hydrologic Simulation Program-Fortran)模型(Johanson et al.,1980)和SCS模型(SCS,1956)等。我国也在对流域水文研究的基础上自行研制了多种模型,被联合国教育、科学和文化组织推举为世界十大水文模型之一的著名的新安江模型(赵人俊,1984),就是其中之一。

20世纪90年代以来,随着计算机科学和数字化信息技术的发展,水文科学正经历着一场前所未有的革新,水文研究的技术手段发生了根本性的质的变化,水文学与计算机及信息科学的交叉形成了数字水文学。在当今数字时代,描述流域下垫面空间分布信息的技术日渐完善,这就为水文模拟技术的变革和革新提供了坚实的基础。数字地形模型(digital terrain model, DTM)是指地面诸特性空间分布的数字描述,其本质属性是二维地理空间定位和数字表达,流域地形、植被、土壤、分水线、河网、子流域的表达及集水面积的计算完全能用数字化技术实现,从而改变传统的手工方式。通常DTM所描述的地面特性是高程 Z ,它的空间分布由 X, Y 水平坐标系统来描述,也可用经纬度来描述,将这种高程空间分布的数字地形模型称为数字高程模型(digital elevation model, DEM)。DTM与DEM的出现为数字水文学的发展和数字水文模型的诞生提供了坚实的技术基础。数字水文模型就是构建在DTM/DEM基础之上的一种分布式水文模型,先由DTM建立数字高程流域水系模型,再与数字产流模型和数字汇流模型有机结合形成数字水文模型。“基于DEM的分布式水文模型”,已成为当今水文学界研究的热点(Michael,1996;左其亭和王中根,2002),也代表了水文模型的最新发展方向(王中根等,2003)。

二、分布式水文模型分类

分布式水文模型的研究最早始于国外,标志性的文章是1969年Freeze和Harlan发表的《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》(Dann et al.,1998)。在我国,分布式水文模型的研究起步较晚,开发的模型也较少,且发展比较缓慢。目前,国内所应用的水文模型大都来自国外开发的模型,且很少进行较深入的改进和修正。

按单元模型结构可以将分布式水分模型分为以下两种类型,①全分布式水文模型:又称分布式水文物理模型(胡春歧和张登杰,2004;刘金清和陆建华,1996)。这类模型的主

要特点是应用连续方程和运动方程来建立相邻网格单元或子流域之间的时间和空间联系,采用数值方法进行求解。②半分布式水文模型:又称分布式概念模型。这类模型的主要特点是认为其中任一单元面积的降雨输入和下垫面条件都呈空间均匀分布,在每个单元网格或子流域上应用现有的概念性集总式模型来分析每个面积的产汇流过程,然后再由各单元面积的分析结果确定整个流域的产汇流过程。最后进行汇流演算,推求出口断面流量(陈仁升等,2003;王书功等,2004)。

若按子流域或子区域所采用的分析降雨径流形成的理论和方法可以将分布式水文模型分为概念性和具有物理基础两类。常见的可用于构建概念性分布式水文模型的有美国的 SAC 模型、日本的 TANK 模型和中国的新安江模型等。具有物理基础的分布式水文模型又可分为以水动力学原理为主要基础(如 SHE 模型)和以水文学原理(如 DBSIN 模型)为主要基础两种(芮孝芳和黄国如,2004)。

若按各子流域或子区域形成的径流过程转变成全流域径流过程的方法可以将分布式水文模型分为松散型和耦合型两类(任立良,2000)。松散型分布式水文模型的特点是:假设流域中每个子流域或子区域对整个流域的总响应的贡献是相互独立的,因此,可在分别求得各子流域或子区域对整个流域的贡献后,通过叠加计算来求得整个流域的总响应。耦合型分布式水文模型,由于是通过一组微分方程及其定解条件构成的定解问题来描述流域降雨径流形成的规律,因此它能考虑各子流域或子区域对全流域贡献之间的相互作用,即只有通过联立求解,才能给出这类定解问题的解(吴险峰和刘昌明,2004;刘凤莲和陈植华,2005;陈仁升等,2003)。

三、分布式水文模型研究概况

分布式水文模型是近 20 年来水文建模领域的热点,20 世纪 80 年代以来,遥感技术和地理信息系统技术、计算机的普遍应用和计算能力大幅度提高,为分布式水文模型的发展铺平了技术道路(李纪人,1997;何延波和杨琨,1999)。流域对自然和人为因素的响应研究以及流域管理决策人员的需求,又极大地推动了分布式水文模型的发展。

分布式水文模型又称为数字水文模型,它是构建在 DEM 基础之上的一种水文模型,是依据下垫面资料寻求水文模拟物理基础(如产流单元、水系、汇流路径和集水面积等流域特征)的一种现代技术途径。分布式水文模型能够考虑各种水文要素(天气、植被、土壤和水力学因素等)的空间不均匀性(曾涛和郝振纯,2004)。分布式水文模型用严格的数学物理方程表述水文循环的各子过程,在参数和变量中充分考虑流域空间的变异性,着重考虑不同子单元间的水平联系,对水量和能量过程均采用偏微分方程模拟。尤其以不同空间尺度的网格形式耦合土地覆被和气候变化数据研究径流要素变化过程具有明显的优势(李道峰和刘昌明,2004;刘昌明和李道峰,2003)。

分布式水文模型(physically-based distributed models),清楚地考虑了水文地质过程的空间变化、模型的输入输出以及模型的边界控制条件等。显然,这需要足够信息量的较高精度的数据来用于模型的建立,这就是说,缺乏足够的野外数据(或试验数据)是不能建立分布式水文模型的。实际上,在大多数情况下,分布式水文模型对流域空间属性特征的

描述是集总的,对于许多水文地质过程的处理方式也是集总的,模型的输入也可能是集总的,就是对一些边界条件的处理也是集总的。但是,模型对一些直接影响着流域的产汇流过程的处理方式是分布的,如降雨-径流过程。因此,这些模型并非完全为分布式,恰当地说,这些模型也只能称为准分布式的或半分布式的模型。分布式的水文模型的例子有 ANSWERS、SHE、IHM、SWMM 和 NWSRFS 等。分布式模型考虑了空间异质性,但是没有对空间异质性本身的内在规律进行探讨。因此,在实际操作中存在着主观性。单元的大小是每个研究都必须首先解决的问题。目前,研究者多根据研究区域的大小和资料的空间分辨率(翔实程度)来确定该研究的基本单元的大小。

参考文献

- 摆万奇,柏书琴. 1999. 土地利用和覆盖变化在全球变化研究中的地位与作用. 地域研究与开发, 18(4):13-16.
- 蔡运龙. 2001. 土地利用/土地覆被变化研究:寻求新的综合途径. 地理研究, 20(6):645-652.
- 陈军锋,李秀彬. 2001. 森林植被变化对流域水文影响的争论. 自然资源学报, 16(5):474-480.
- 陈军锋,张明. 2003. 梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响的模拟研究. 地理研究, 22(1):73-78.
- 陈玲飞,王红亚. 2004. 中国小流域径流对气候变化的敏感性分析. 资源科学, 26(6):62-68.
- 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 2003. 水文模型研究综述. 中国沙漠, 23(3):221-228.
- 程国栋,王根绪. 2006. 中国西北地区的干旱与旱灾——变化趋势与对策. 地学前沿, 13(1):3-14.
- 邓慧平,李秀彬. 2001. 气候与地表覆被变化对梭磨河流域水文影响的分析. 地理科学, 21(6):493-497.
- 邓慧平,李秀彬. 2003. 流域土地覆被变化水文效应的模拟. 地理学报, 58(1):53-62.
- 邓振镛,张强,李栋梁,等. 2006. 气候变化对渭河上游径流量和输沙量的影响. 中国沙漠, 26(6):982-985.
- 傅伯杰,陈利顶,马克明. 1999. 黄土高原小流域土地利用变化对生态环境的影响. 地理学报, 54(3):241-246.
- 郭宗锋,马友鑫,李红梅,等. 2006. 流域土地利用变化对径流的影响. 水土保持研究, 13(5):139-142.
- 韩添丁,叶柏生,丁永建,等. 2004. 近 40a 来黄河上游径流变化特征研究. 干旱区地理, 27(4):553-557.
- 何春阳,史培军,陈晋,等. 2005. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. 中国科学 D 辑, 地球科学, 35(5):464-473.
- 何春阳,史培军. 2004. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. 地理学报, 59(4):599-607.
- 何延波,杨琨. 1999. 遥感和地理信息系统在水文模型中的应用. 地质地球化学, 27(2):99-103.
- 贺宝根,周乃晟,高效江,等. 2001. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系——SCS 法的修正. 环境科学研究, 14(3):49-51.
- 胡春歧,张登杰. 2004. 水文模型进展及展望. 南水北调与水利科技, 2(6):29-30.
- 黄明斌,康绍忠,李玉山. 1999. 黄土高原沟壑区森林和草地小流域水文行为的比较研究. 自然资源学报, 14(3):226-231.
- 蓝永超,林舒. 2006. 近 50 年来黄河上游水循环要素变化分析. 中国沙漠, 26(5):849-854.
- 冷疏影,宋长春,赵楚年,等. 2000. 关于地理学科“十五”重点项目的思考. 地理学报, 15(6):745-746.
- 李道峰,刘昌明. 2004. 基于 RS 与 GIS 技术的分布式水文模型模拟径流变化邹议. 水土保持学报, 18(4):12-15.
- 李恒鹏,杨桂山,刘晓玫,等. 2005. 流域土地利用变化的长周期水文效应及管理策略——以太湖上游地区蠡河流域为例. 长江流域资源与环境, 14(4):450-455.
- 李纪人. 1997. 遥感和地理信息系统在分布式流域水文模型研制中的应用. 水文, (3):9-12.
- 李秀彬. 1996. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. 地理学报, 51(6):553-558.
- 刘昌明,李道峰. 2003. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究. 地理科学进展, 22(5):437-445.
- 刘凤莲,陈植华. 2005. 流域水文模型发展展望. 地质灾害与环境保护, 16(1):71-74.

- 刘金清, 陆建华. 1996. 国内外水文模型概论. 水文, (4): 4-8.
- 龙花楼, 王文杰, 翟刚, 等. 2002. 安徽省土地利用变化及其驱动力分析. 长江流域资源与环境, 11 (6): 526-530.
- 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 2004. 无定河流域水量平衡变化的模拟. 地理学报, 59(3): 341-348.
- 莫兴国, 刘苏峡. 2004. 无定河流域水量平衡变化的模拟. 地理学报, 59(3): 342-348.
- 任立良. 2000. 流域数字水文模型研究. 河海大学学报, 28(4): 1-7.
- 芮孝芳, 黄国如. 2004. 分布式水文模型现状与未来. 水利水电科技进展, 24(2): 55-58.
- 石培礼, 李文华. 2001. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应. 自然资源学报, 16(5): 481-487.
- 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 2000. 土地利用/覆被变化研究的方法与实践. 北京: 科学出版社.
- 史培军, 宋长春, 景贵飞. 2002. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境影响的研究. 地球科学进展, 17(2): 161-168.
- 史培军, 袁艺. 2001. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 21(7): 1041-1049.
- 王纲胜, 夏军, 万东晖, 等. 2006. 气候变化及人类活动影响下的潮白河月水量平衡模拟. 自然资源学报, 21(1): 87-91.
- 王根绪, 张钰, 刘桂民, 等. 2005. 马营河流域 1967~2000 年土地利用变化对河流径流的影响. 中国科学 D 辑, 35(7): 671-681.
- 王国庆, 王云璋. 2002. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析. 应用气象学, 13(1): 117-121.
- 王清华, 李怀恩. 2004. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析. 水资源与水工程学, 15(2): 21-24.
- 王守荣, 郑水红, 程磊, 等. 2003. 气候变化对西北水循环和水资源的影响的研究. 气候与环境研究, 8(1): 43-51.
- 王书功, 康而泗, 李新. 2004. 分布式水文模型的进展及展望. 冰川冻土, 26(1): 61-65.
- 王中根, 刘昌明, 黄友波. 2003. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 22(1): 79-86.
- 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 2007. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨. 自然资源学报, 22(4): 649-654.
- 吴险峰, 刘昌明. 2004. 流域水文模型研究的若干进展. 地理科学进展, 21(4): 341-348.
- 谢平, 朱勇, 陈广才, 等. 2007. 考虑土地利用/覆被变化的集总式流域水文模型及应用. 山地学报, 25(3): 257-264.
- 徐秋宁, 马孝义, 安梦雄, 等. 2002. SCS 模型在小型集水区降雨径流计算中的应用. 西南农业大学学报, 24 (2): 97-107.
- 延军平, 汪西莉, 孙虎等. 1999. 陕甘干旱地区不同时段地表径流递减率的分析. 地理科学, 19(6): 532-535.
- 叶柏生, 王琳, 杨大庆, 等. 2004. 我国过去 50a 来降水变化趋势及其对水资源的影响(1): 年系列. 冰川冻土, 26(5): 587-594.
- 袁飞, 谢正辉. 2005. 气候变化对海河流域水文特性的影响. 水利学报, 36(3): 275-279.
- 袁飞. 2006. 考虑植被影响的水文过程模拟研究. 南京: 河海大学博士学位论文.
- 曾涛, 郝振纯. 2004. 气候变化对径流影响的模拟. 冰川冻土, 26(3): 324-332.
- 张楠, 秦大庸, 张占彪. 2007. SWAT 模型土壤粒径转换的探讨. 水利科技与经济, 13(3): 168-170.
- 张楠. 2005. 径河流域土壤侵蚀分布式模拟. 北京: 北京师范大学硕士学位论文.
- 张世文, 唐南奇. 2006. 土地利用/覆被变化(LUCC)研究现状与展望. 亚热带农业研究, 3: 221-225.
- 张晓丽, 王生林, 李树明. 2007. 甘肃省退耕还林的现状及对策分析. 安徽农业科学, 35(35): 11 538-11 559.
- 张德铨, 李秀彬, 傅小锋, 等. 2000. 拉萨城市用地变化分析. 地理学报, 55 (4): 395-406.
- 赵人俊. 1984. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型. 北京: 水利电力出版社.
- 郑璟, 袁艺, 冯文利, 等. 2005. 土地利用变化对地表径流深度影响的模拟研究——以深圳地区为例. 自然灾害学报, 14 (6): 77-82.
- 朱新军, 王中根, 李建新, 等. 2006. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究. 地理科学进展, 25(5): 105-111.
- 左其亭, 王中根. 2002. 现代水文学. 郑州: 黄河水利出版社.
- Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. 1986. An introduction to the European Hydrological System —Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. Journal of Hydrology, 87(1-2): 45-59.
- Arnold J G, Allen P M. 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. Journal of Hydrology, 176(4): 57-77.
- Bathurst J C. 1986. Physically based distributed modelling of an upland catchment using the Système Hydrologique Européen (SHE). Journal of Hydrology, 87(1-2): 79-102.