

科研院所社会公益研究专项项目 (编号: 2005DIB3J057)

国家“十一五”科技支撑计划重大项目课题 (编号: 2006BAB04A08)

NANSHUI BEIDIAO XIXIAN GONGCHENG SHUIYUANQU
SHUIXUNHUAN MONI YU SHUIZIYUAN
DINGLIANG PINGJIA

南水北调西线工程水源区

水循环模拟与水资源定量评价

王浩 严登华 秦大庸 徐祥德 贾仰文 李泽椿 等著



黄河水利出版社

内 容 提 要

本书较为详细地分析了气象水文模拟、预测、预报及水资源评价与监测的国内外相关研究进展,结合南水北调西线工程规划设计与运行管理对水资源评价与监测的实践需求,分别应用 WRF 模型和 RegCM3 模型对区域中短期和季节降水进行模拟预报;构建了水循环气-陆耦合模型,对区域水循环的大气过程、地表过程、土壤过程和地下过程进行了整体模拟,并以此为关键支撑,构建了基于气-陆耦合模式的水资源评价技术,对南水北调西线工程水源区的水资源及其变化进行了定量评价,提出了区域“天地一体化”水资源立体监测与数据同化方案,并对区域水资源定量评价系统进行了初步设计。

本书可作为高等院校水文水资源、气候气象学、水利规划与管理、环境管理和水资源系统工程等专业的高年级大学生、研究生的教学参考书,也可供从事水利规划与管理、水文气象监测与管理、环境管理及水利、气象行政管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

南水北调西线工程水源区水循环模拟与水资源定量评价/王浩等著. —郑州:黄河水利出版社,2008. 12

ISBN 978-7-80734-416-2

I. 南… II. 王… III. ①南水北调-水利工程-供水水源-水循环-水流模拟 ②南水北调-水利工程-供水水源-水资源-评价 IV. TV68 P339 TV211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 188057 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:10.25

字数:250 千字

版次:2008 年 12 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2008 年 12 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

序 一

水资源评价是进行水利开发与管理的關鍵;在全球变化和人类活动的影响下,水资源的数量、质量及时空特征均发生了深刻变化,其未来发展也存在着较多的不确定性;如何对区域水资源及其未来发展趋势进行科学评价,是水文水资源领域的重大科学问题之一。水循环过程包括大气过程、地表过程、土壤过程和地下过程,然而在传统水文水资源领域中,重点关注水循环的地表过程和地下过程;在传统的气象气候学领域中,重点关注的是水循环的大气过程。这在一定程度上割裂了水循环过程的整体性特征,水资源评价的精度和预见期均尚待进一步提高。

由来自中国水利水电科学研究院、中国气象科学研究院和国家气象研究中心等单位专家组成的研究团队,以南水北调西线工程水源区为研究区,从水循环的整体过程出发,以水循环气-陆耦合模型为关键支撑,创建了基于水循环气-陆耦合模式的水资源定量评价技术。该项水资源评价技术,将传统水资源评价口径延拓到大气水汽通量评价,实现了空中水资源、地表水资源、土壤水资源和地下水资源的整体评价,原创特色明显。此外,该研究团队还提出了基于“天地一体化”的立体水资源监测技术体系,并应用于南水北调西线工程水源区,具有重大实用价值。

本项研究成果在气象、水利两大部门知名专家的通力合作下予以完成,不仅对南水北调西线工程水源区研究具有重要意义,而且对我国乃至世界上各大江大河的水资源研究均具有重要意义,具有较大的推广应用价值。

期待这本具有理论和实践应用价值论著的出版,对水循环模拟、水资源评价、水资源监测等方面的理论与方法发展具有积极推动作用;我也期待有关部门和研究团体在上述研究领域能开展更多的跨部门、跨学科研究。

中国工程院院士 陈玉琨

2008年5月10日

序 二

自 20 世纪 70 年代后期以来,中国夏季降水的格局发生了两次明显的变化,一是东部季风区北方降水明显减少,而江淮流域与华南降水不断增多,出现了气象上称做南涝北旱的异常降水分布。相应南方的暴雨频率也明显增加,北方暴雨频率减少。最近 30 年,几乎未发生类似“58·7”,“63·8”,“75·8”等持续性大暴雨。二是西北地区从 20 世纪 80 年代中期降水虽呈现增加趋势,但这主要表现为西北地区的西部(如新疆),而西北地区的东部降水未呈增加趋势。因而总体上,从西北地区东部到华北地区近二三十年出现明显的降水减少。加之这些地区经济快速发展,城市化进程加快,土地利用变化等一些人类原因,我国北方地区面临严重的缺水形势。据气象与水文专家预测,这种形势在今后相当长一段时间内难以改变。其中黄河、海滦河和东北南部的辽河是受这种影响最严重的流域。

据科学家初步估计,到 2030 年,黄河流域每年缺水在 150 亿 t 左右。如不采取实际有效的办法解决北方水资源问题,不仅限制这些地区的经济社会发展,而且会日益影响人民的生活需求,这对水利部门是一个严峻的挑战。在许多措施之中,南水北调工程是解决北方水资源短缺的重大途径和项目之一。目前,东线调水工程已竣工,中线调水工程正在进行中,西线工程正开展水资源评价和勘察。

由王浩院士和徐祥德研究员领导与组织的南水北调西线工程水源区评价技术研究是一项难度大、科学问题复杂的研究,它不但涉及不同时间尺度的气象预报问题,而且涉及它们如何与水文模式的耦合问题。他们所设计的西部区域水资源总体监测网是一个复杂的系统工程,它不但可对西部水资源进行地基-空基一体化立体监测,而且可将获得的气象和水文资料进行同化分析和定量评价,为调水的总量与变化幅度提供科学资料和预测。他们组织了一批气象与水文专家,通过学科交叉和融合,共同出色地完成了这个项目,得到了评审专家的一致好评。这本专著是他们研究成果的结晶,具有很大的科学与实用价值。

南水北调工程是中国实施的一项重大工程项目,耗时、耗资、耗人力巨大,对于这个百年大计的工程项目,前期的水资源评价是十分关键的。这个项目的完成为这方面作出了重要贡献,也为西线工程水资源的评价在技术和方法上奠定了基础。

中国工程院院士 丁-汇

2008 年 6 月 12 日

前言

水循环过程包括大气过程、地表过程、土壤过程和地下过程等4个基本过程。然而,在传统水文水资源研究中,重点关注水循环的地表过程和地下过程;在气象气候学研究中,重点关注水循环的大气过程;在农学研究中,重点关注水循环的土壤过程;这在一定程度上割裂了水循环的整体性。通过跨部门、跨学科的交叉研究,系统识别全球变化和人类活动影响下水循环的演变机理,服务于人类的水土资源开发与生态环境保护活动,成为广大资源环境研究领域专家的共识。2005年8月,在中国水利水电科学研究院王浩院士和中国气象科学研究院徐祥德研究员的倡导下,由中国水利水电科学研究院、中国气象科学研究院和国家气象中心三大部门专家组成联合研究小组,以具有世界影响的特大型水利工程——南水北调西线工程水源区水循环及水资源评价为研究对象,率先在国内开展气象、水利两大部门的联合研究。

经过近两年的深入交流和通力合作,项目组在完成气象气候预报模式和水循环模式研发的基础上,构建了具有物理机制的水循环气-陆耦合模型,并应用于南水北调西线工程水源区(长江宜宾以上流域)。在气-陆耦合模式的支持下,项目组又进一步突破传统水资源评价理论和技术框架,从大气水汽通量着手,创建了基于气-陆耦合模式的水资源定量评价技术,实现空中水资源、地表水资源、土壤水资源和地下水资源的整体评价;并结合各评价口径水资源实时动态评价的要求,在气-陆耦合模式的支持下,提出了“天地一体化”的立体水资源监测技术和监测方案。

2008年7月19日,水利部国际合作与科技司对上述成果进行了验收和科技成果鉴定。验收和鉴定专家组由刘兴土院士、陈志恺院士、丁一汇院士和来自南水北调西线项目规划设计与管理单位(国务院南水北调办公室、水利部南水北调规划设计管理局和黄河勘测规划设计有限公司)、水利部水资源司、清华大学等单位的专家组成。专家组对本项成果给予了高度评价,认为在气-陆耦合模型、水资源评价和水资源监测等方面取得了3项原创性成果,在理论和方法上均取得了重大突破,总体达到了国际领先水平。

本书就是在上述成果的基础上完成的。全书共分8章。第1章综述了选题的背景、目的和意义,以及国内外相关研究进展和本项研究的技术路线;第2章重点介绍了南水北调西线工程水源区的基本情况;第3章系统剖析了气象预报和气象预测模型的研发;第4章详细介绍了气-陆耦合模型的结构和模型校验过程;第5章分析了基于气-陆耦合模式的水资源评价技术及其在南水北调西线工程水源区的应用;第6章分析了“天地一体化”水资源立体监测技术及南水北调西线工程水源区水资源立体监测方案;第7章介绍了在上述支撑技术基础上所构建的南水北调西线工程水源区水资源定量评价系统;第8章是全书的总结和研究展望。

本书是项目组全体成员集体智慧的结晶,各章撰写的分工如下:

第1章 严登华、杨舒媛、胡东来、施小英

第2章 严登华、张明珠、俞烜、胡东来

第3章 徐祥德、李泽椿、施晓辉、余淑秋

第4章 严登华、王浩、贾仰文、李海红、张明珠

第5章 周祖昊、王建华、杨贵羽、施小英、赵志轩

第6章 秦大庸、徐祥德、严登华、张胜军、王凌河

第7章 王浩、秦大庸、刘家宏、王明娜

第8章 王浩、严登华、杨舒媛、胡东来、翁白莎

全书由王浩、严登华统稿。

在本书的撰写过程中,得到了水利部国际合作与科技司、科技部发展计划司、水利部科技推广中心、水利部四川省水利水电勘测设计研究院、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院、中国科学院成都山地灾害与环境研究所等单位领导和专家的大力支持,在此深表谢忱!

本书由于撰稿仓促以及受作者认识水平的限制,其中难免存在挂一漏万、考虑不周和顾此失彼之处,敬请读者批评指正!

作 者

2008年8月

目 录

序一	陈志恺
序二	丁一汇
前言	
第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景、目的和意义	(1)
1.2 国内外研究状况及发展趋势	(2)
1.3 研究目标与研究内容	(11)
1.4 技术路线	(12)
1.5 拟解决的关键科学问题暨创新点	(13)
第 2 章 南水北调西线工程及水源区概况	(15)
2.1 南水北调西线工程规划及水源区界定	(15)
2.2 区域自然地理概况	(20)
2.3 区域社会经济状况	(30)
第 3 章 区域中短期及季节降水数值模拟	(34)
3.1 中短期降水数值模拟与预测	(34)
3.2 季节降水数值模拟与预报	(40)
第 4 章 区域气候 - 水文耦合模拟	(48)
4.1 总体思路暨建模策略	(48)
4.2 模型结构	(49)
4.3 水循环要素过程模拟	(50)
4.4 能量过程模拟	(59)
4.5 模型输入参数及格式化处理	(61)
4.6 水循环陆面过程模拟参数估计与校验	(73)
4.7 气 - 陆耦合模型整体验证	(81)
第 5 章 区域水资源定量评价及演变趋势	(84)
5.1 水资源定量评价总体方案	(84)
5.2 水资源定量评价及演变趋势分析技术	(84)
5.3 西线工程水源区水资源定量评价及演变趋势	(89)
第 6 章 区域水资源立体监测与数据同化	(100)
6.1 现有站网评价	(100)
6.2 监测站网优化原则、依据与目标	(103)
6.3 地基 - 空基一体化的立体监测站网体系设计	(105)
6.4 多源数据同化技术	(110)

第 7 章 区域有效水资源定量评价系统 (114)

7.1 总体设计 (114)

7.2 信息采集 (115)

7.3 数据传输 (123)

7.4 数据存储层设计 (124)

7.5 应用支撑层设计 (126)

7.6 模型支撑层 (128)

7.7 人一机界面设计 (129)

7.8 系统安全维护方案 (137)

第 8 章 结论与展望 (140)

8.1 技术创新研究成果 (140)

8.2 应用创新研究成果 (141)

8.3 成果应用领域与推广应用途径 (144)

8.4 研究展望 (144)

参考文献 (145)

第1章 绪论

1.1 研究背景、目的和意义

1.1.1 研究背景

南水北调西线工程(简称西线工程),是从长江上游金沙江及支流雅砻江、大渡河调水入黄河上游的跨流域重大调水工程,是补充黄河水资源的不足,解决我国西北地区干旱缺水的重大战略举措,是我国“四纵三横”总体水资源配置格局的重要组成部分(见图1-1)。

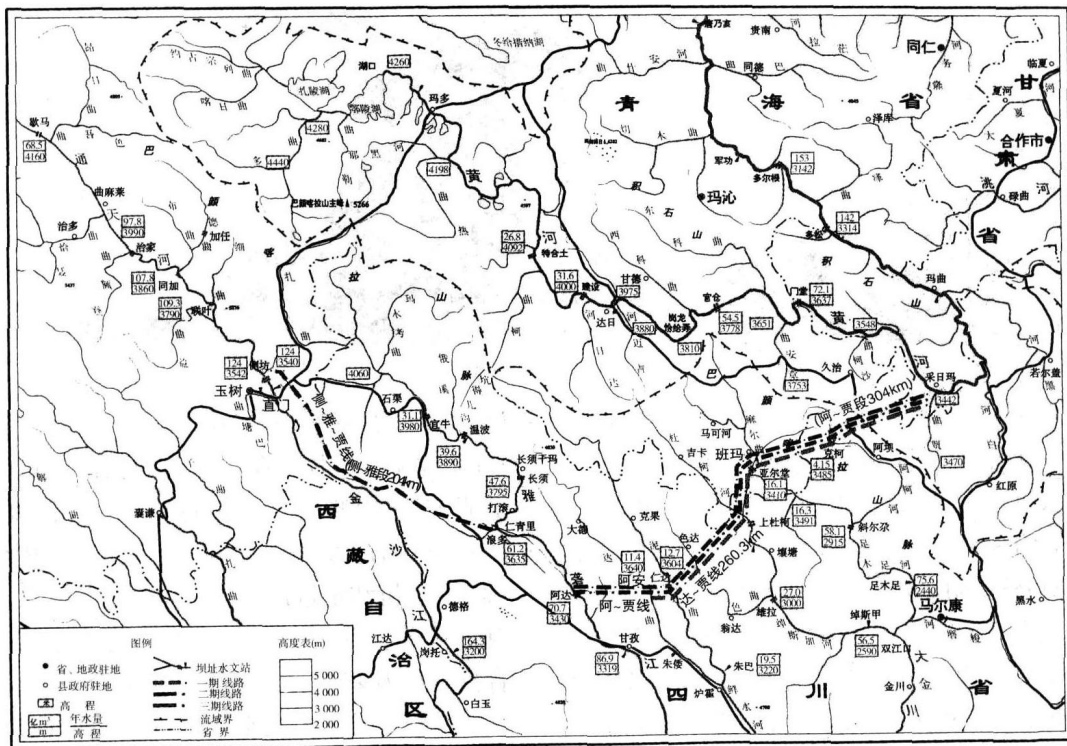


图 1-1 南水北调西线工程位置

当前,西线工程正处在项目建议书的编制阶段,水源区的可调水量及工程调水对调出水源区的综合影响是本阶段亟待回答的核心问题之一;而回答上述问题的关键就是要对水源区水资源进行科学评价。同时,对水源区水资源进行定量评价也是工程运行调度的重大基础。

1.1.2 研究目的和意义

西线工程水源区位于世界第三极——青藏高原的东麓,是全球变化响应敏感区。受到

青藏高原的影响,来自印度洋和南中国海两股暖湿气流在此汇合后,沿着长江流域向东运移,从而使得西线工程水源区成为全球水汽环流场中“大三角”的顶端(见图 1-2)。上述环流场的变化,从根本上影响到西线工程水源区的水资源时空分异。与此同时,随着人口的增长和社会经济的发展,西线工程水源区下垫面条件也发生了显著变化,如湿地萎缩、农业用地和城镇用地的急剧增加以及冰川萎缩等,导致区域水循环的产流机制也发生了深刻变化;与此同时,随着西南水电能源基地的建设,河川径流格局也发生了深刻变化。总之,西线工程水源区的水循环具有显著的“自然-人工”二元特征,传统基于径流过程的水资源评价方法难以适应本区需要。

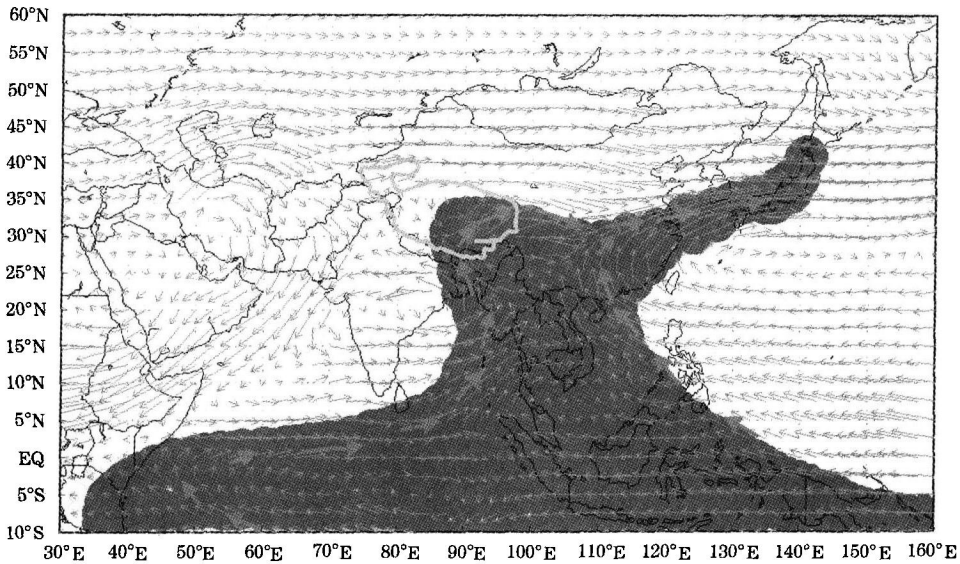


图 1-2 西线工程水源区在全球环流场中的位置(夏季 500 hPa)

结合西线工程的规划设计和四川省的水资源配置策略,本书以宜宾以上的长江流域为总体研究靶区,以工程规划坝址以上集水区为关键研究区,在现代地理信息技术(包括 RS、GIS、GPS、DSS 等)和气象-水文数值模式技术的支撑下,通过大气-水文-陆面过程的耦合模型分析,初步建立西线工程水源区有效水资源的监测、分析和定量评价的一体化技术体系。

本书紧密围绕重大工程建设战略需求,具有重大的实践意义;同时,本书将构建基于水循环过程的水资源监测体系、气-陆水循环耦合模拟以及基于水汽通量解析的全口径、层次化、动态水资源评价理论框架与技术体系,可进一步完善现代水文水资源的学科体系,具有较大的理论意义。

1.2 国内外研究状况及发展趋势

1.2.1 水资源监测与站网优化

1.2.1.1 水资源监测

我国的资源监测与管理体系中,水资源监测体系与国家的水文监测体系基本相同。

对于水文监测,自新中国成立以来,我国已进行了5次水文站网的规划工作,分别为:①1955年在学习苏联经验的基础上,对大、中、小河流分别采用线的原则、面的原则、站群的原则进行规划;②1964年在原有水文站网收集到的水文资料基础上,用概念性水文模型检验站网规划;③1978年编制了近期(1985年以前)水文站网调整充实规划;④1983~1986年编制出近期(1985~1990年)和远期(1991~2000年)水文站网调整发展规划;⑤2000年,水利部水文局组织开展《全国水文事业发展规划》编制工作,对全国水文站网络进行了全面细致的规划。需要指出的是,1992年,水利部颁发了《水文站网规划技术导则》(SL34—92),作为全国水文规划的技术纲领。

需要指出的是,传统水文监测理念是建立在传统水文学理论基础上的,无论站网布局还是监测方法理念都建立在水的自然属性之上,且将大气水、地表水、地下水按照行业部门职能分工进行割裂监测,监测方法简单,手段单一。随着全球气候变化和人类活动影响的加剧,水资源演变的“自然-人工”二元驱动特性凸现,传统的水资源监测难以满足现代水资源开发、管理与保护的需求,需要在现代水文水资源学科理论和方法的支撑下,充分考虑到水循环的整体性以及水资源的自然、社会、经济、环境、生态等属性特征,以“3S”技术、雷达监测技术、核物理技术、现代通信技术、计算机网络技术等一大批现代科学技术为依托,建立基于水循环的水资源监测系统。

当前,国家正在实施对地观测计划和气候观测计划,整合和优化多部门监测资源,联合参与水循环观测网络,以提高对水循环大气过程、地表过程、土壤过程和地下过程等各个要素过程的立体监测能力,为水资源监控与调配、水旱灾害防治(预测、预报和预警)和救助、水生态建设及其他突发水问题提供实时信息。与此同时,通过水循环观测系统网络建设,获得长期、连续和高质量的水循环过程观测数据,为揭示“自然-人工”二元驱动下水循环演变规律、构建适合中国国情的综合水循环模型提供支撑,促进中国水文水资源理论与技术的整体发展。

1.2.1.2 站网优化

水文分区是水文站网优化的基础,是根据区域气候、水文特征和自然地理条件所划分成的水文单元,主要方法有地理景观法、等值线图法、产流特性分区法、暴雨洪水参数法、流域水文模型参数法、统计分析法和模糊聚类法等。就水文站网的优化方法而言,主要有流域水文模型参数法、卡拉谢夫法、模糊数学法、最优内插法、滤波法和克里格法,美国地质调查局于1974年提出的区域性资料站网分析(NARI)法以及加拿大的方格法和Sharp的拓扑学优化法(陆桂华,2001)。其中,卡拉谢夫法是国内外知名的统计分析方法,在水文站网的规划中得到广泛使用;特别是对于一些平原地区,统计规律比较显著的地区,如加拿大、美国和俄罗斯,采用此种方法的使用效果更好;由于我国的地形起伏较大,适用条件不是很好,该方法的单独使用不是很多,而是要与其他方法进行联合使用。模糊数学法是根据我国西部地区现有站网稀少、无法采用目前湿润区使用的筛选法和数理统计法而提出的,此方法已在四川省的西部地区得到应用。但这些方法均是针对各部门单一设站问题展开的,难以满足多部门联合的水资源立体监测的需要。随着水文模型和现代地理信息技术的发展,有明确物理机制的分布式水文模型应运而生,模型结构揭示了水文现象的动态规律,而模型参数则揭示了流域的水文特征,从而新一代的流域水文模型法成为站网优化布设的新趋势。

1.2.2 降水预测预报

1.2.2.1 降水变化

北半球大陆的大部分中高纬度地区 20 世纪降水增加了 5% ~ 10%, 热带(10°N ~ 10°S)增加了 2% ~ 3%, 而副热带(10°N ~ 30°N)减少了 2% ~ 3%。北半球中高纬度地区在 20 世纪后半部, 暴雨的频率增加了 2% ~ 4%。这可以由多种原因造成, 即大气水汽、雷暴活动和大范围风暴活动的变化。在 20 世纪(1900 ~ 1995 年), 全球陆地地区严重旱涝面积有一定增加, 在许多地区, 这种增加是由年代际和数十年尺度的气候变率造成的, 例如 ENSO 事件正向更多的暖事件变化。在某些地区, 如亚洲和非洲部分地区, 在最近几十年, 干旱的频率和强度增加, 这种增加可能与水圈循环的加速有关。在东亚地区, 虽然降水量趋于下降或变化不大, 但仍有些地方大雨和极端降水事件有所增加(丁一汇, 2003)。

在全球气候变化背景下, 近 50 年中国降水变化表明, 中国年平均降水量减少, 平均 10 年减少 2.9 mm, 但在最近 10 年(1991 ~ 2000 年)略有增加。华北大部地区、西北东部和东北地区的降水量明显减少, 平均 10 年减少 20 ~ 40 mm, 而华南与西南地区的降水量明显增加, 平均 10 年增加 20 ~ 60 mm, 西北地区西部的降水量也有所增加(王绍武, 2002)。1951 ~ 1995 年, 年降水日数有减少趋势, 但降水强度呈增加趋势, 总体上中国年降水量略有减少, 主要减少的地区在华北和江南, 江淮流域的降水量则是增加的(王绍武, 2002; 陈隆勋, 1998)。在 1953 ~ 1997 年, 我国东、西部降水频率(降水日数)表现为: 东部除华南外降水频率普遍趋于减少, 西部趋于增多。降水日数增多和减少趋势的分界线大约在 105°E。西北降水频率的增多最为显著, 普遍超过(5% ~ 10%)/10 年, 但东部的长江中下游、江淮地区、华北和东北南部等地降水频率减少趋势为(5% ~ 10%)/10 年(王守荣, 2003)。瞿盘茂等研究了 1951 ~ 1999 年中国不同地区年降水量的线性变化趋势, 指出中国西部降水量增长趋势明显, 其中西北更为显著, 但西南一些地区降水量趋于减少。东部降水变化趋势的区域性差异较大。

王可丽等研究表明, 长江源区的降水在近 50 年的长期变化趋势不明显, 但最近 10 年长江源区的降水有明显增加的趋势(王可丽, 2006)。陈芳等的研究指出, 长江源区冬、春、秋季降水量呈现出增加趋势, 春季增幅最大, 但降水量的增加集中在冬季, 冬季变化趋势明显, 通过 0.02 信度的显著性水平检验; 夏季及年降水量呈微弱减少趋势, 进入 21 世纪后又表现出增加的趋势; 源区年降水量的增幅, 自南向北、从东到西、随海拔高度的降低而增大, 地形作用对年降水量增幅的影响大小依次为纬度、海拔高度和经度(陈芳, 2007)。

相关研究发现, 20 世纪 60 ~ 70 年代中国降水偏少, 80 年代开始, 西北、东北以及长江中下游地区降水增加, 90 年代以后长江以南地区夏季降水增加明显, 而华北、东北地区夏季降水则显著减少(王遵娅, 2004; 陈隆勋, 2004)。赵平等研究指出, 在全球气候变暖的背景下, 近 40 年我国东部年降水量呈现出“南涝北旱”的变化特征(赵平, 2006)。李跃凤等比较了 20 世纪 60 年代与 90 年代我国降水的差异, 指出在 60 年代长江流域异常少雨, 而 90 年代降水明显偏多(李跃凤, 2003)。周连童等的研究也表明, 我国在 1976 年前后发生了一次明显的气候跃变, 1977 ~ 2000 年夏季长江流域降水明显增加, 而华北地区和黄河流域夏季降水明显减少, 出现严重干旱(周连童, 2003)。

1.2.2.2 降水预测

目前,世界上许多科学家使用了 35 年全球气候模式,在 6 种代表性温室气体排放情景下,预测了未来 50~100 年的全球气候变化(IPCC,2001)。预测结果表明,21 世纪全球平均降水将会增加,尤其是北半球中高纬地区,但大部分年平均降水增加的趋势很可能同时出现大的年际变化。这意味着降水将有更大的变幅,亚洲夏季风降水变率将增加,同时降水的极值也将比平均值增加更大,降水事件的强度也将增加。亚洲季风区降水变化也很明显,在只考虑温室气体增加的影响时,夏季亚洲季风区的降水在未来 50~100 年有增加的趋势,而当温室气体和气溶胶的增长都包括在其中时(使亚洲的气溶胶增加较大),亚洲季风区的降水减少;而冬季亚洲季风区的降水,在只考虑温室气体增加时和既考虑温室气体增加又考虑硫化物气溶胶共同增加时,预测结果表明,呈减少的趋势。

未来 100 年我国年平均降水将呈增加趋势,我国不少地区年平均降水也出现增加趋势,东南沿海增加值最大。华北和东北南部等一些地区出现由降水减少转变为干湿交替现象,变幅加大,但就平均而言,未来有降水增加的趋势。各个分区比较,西北地区降水增加的趋势明显,增加的数值一般在 20% 以上,最大为甘肃省,增加率为 31%;西北地区平均的增加率为 25%。相对于西北地区,西南地区降水的增加率较低,最少的云南省只有 6%,区域平均的增加率为 16%。总体说来,温室气体增加会使西部地区气候向暖湿方向发展,其中以西北尤甚(丁一汇,2003)。

“中国气候变化研究”项目组采用了 DKPZ、NCAR(CCMOA)、GFDL 和 UKMO 4 个气候模式模拟了 2020 年和 2050 年中国气温和降水温室效应气候变化情景,并作了综合预测,用中国区域气候模式作了 CO_2 倍增时中国区域气候变化的情景预测,指出对于降水的变化,西藏地区和西南降水增加较多,东北地区降水增加次之,中南和华东地区降水减少变旱。中国地区,降水增加 0.7 mm/d(20%),用 IPCC 的 IS92a 情景,预测 CO_2 增加,在 2020 年和 2050 年中国降水增加分别为 0.17 mm/d(4.87%)和 0.36 mm/d(10.56%),西南、青藏高原、华南、西北和华北地区既增温又增加降水(王守荣,2003)。

1.2.3 气候水文模拟

1.2.3.1 区域气候模拟

自 20 世纪 50 年代 24 小时的数值天气预报取得成功以后,科学家们继续致力于实现预报时效更长的数值天气预报。随着中期数值天气预报的成功,通过改善中期数值预报模式性能(延长模式,即动力学延伸预报方法)来实现月时间尺度的气候数值预测成为大气模式研究关注的重点之一。自 20 世纪 80 年代末期 Giorgi、Bate、Dickenson 等成功地进行区域气候数值模拟试验以来,区域气候模式(RegCM)得到不断发展,在经历了初期的调试发展后,通过开展 RMIP(亚洲区域模式比较计划)、PIRCS(北美地区区域模式比较计划)、ARCMIP(北极区域气候模式比较)等一系列比较计划的校验,正逐步走上实用阶段。当前,区域气候模式广泛应用于气候模拟(现在和未来)、极端气候事件模拟分析和物理过程模拟研究等方面。在短期气候数值预测领域,我国科学家也取得了突出的成果。如在跨季度的降水预测方面,中国科学院大气物理研究所(IAP)研制的二层大气和四层海洋模式,有一系列独创,并已进行了多年的业务试验;国家气候中心建立了 T219 月动力延伸预报模式并已投入业务试运行。但由于国外在本领域的理论和技术研究开展较早,且有大气探测预测理论和

方法与计算机等综合条件上的优势,在气候数值模式的改进、集合、预报等方面取得了较大的进展,我国在此方面总体上还是落后于发达国家。

随着大气模式分辨率逐步提高,如欧洲中期预报中心的业务用谱模式经历了 T42、T63、T106、T213 直至现在的 T639 的过程,模式物理过程的描述也不不断深化、细化,从间接描写向部分直接描述,并包含越来越多的中小尺度过程。目前,大部分区域气候模式都采用了数字天气预报模式的动力框架,如美国国家大气研究中心(NCAR)的第三代区域气候模式(RegCM3)、意大利国际理论物理中心区域气候模式(RegCM-ICTP)、中国气象局国家气候中心区域气候模式(RegCM-NCC)、西北太平洋国家实验室区域气候模式(PNNL-RCM)、中国科学院大气物理研究所区域环境集成模式(RIEMS)均采用 PSU 和 NCAR 的中尺度数字天气预报模式 MM4/MM5 的动力学框架,使得区域气候模式较之全球环流模式更显其动力连续的特性,物理过程也更为详细。此外,同化技术被应用到模式中,从最初的客观分析、最优插值三维同化,发展到四维同化;集合预报方法的提出和发展,从蒙特卡罗(Monte Carlo)法、时间滞后平均法,到增长模繁育法和奇异向量法,从单模式集合到多模式集合。总的来说,模式分辨率越来越细,模式包含过程越来越广,集合成员也越来越多,模式计算量也越来越大。

经过上述努力,月尺度气候数值预测试验的效果显著提高。然而,最近 10 年的进展却相当缓慢,现有模式进步所取得的预报效果的改善,还主要是 10 年前的贡献;月动力延伸预报的水平仍然达不到业务化要求的水平。

综观国内外气候模式发展,当前主要存在以下缺陷和问题:①模式分辨率的过分细化对气候过程描述帮助不大;②关于数值误差对气候模式影响的研究不够;③对大气外源作用的表示研究不足;④将气候数值预测提为初值问题影响了资料的使用。未来应重点开展以下几个方面的研究工作:①改进短期气候数值预测的思路;②气候系统中稳定分量的确定和模拟;③气候数值模拟和预测的数学理论;④改进气候模式中对海洋环流层、陆地活动层和冰雪圈的描述;⑤充分利用已知的物理规律和实况资料。

1.2.3.2 分布式水循环模拟

水文模型的发展在全球范围内大致经历了三个阶段:

(1)20 世纪 50~60 年代,流域水文模型以“黑箱子”模型(又称系统模型)为主。该类模型不对流域自身及其水文循环的物理过程进行具体描述,而将流域看做一个“黑箱子”,采用系统分析的方法直接建立气象输入和径流的关系,通过模型参数间接反映流域下垫面特性。“黑箱子”模型的通用性和外延性较差,不适用于下垫面变化条件下的水循环模拟。典型的“黑箱子”模型有 Nash 单位线模型、TLR 模型、LRM 模型、约束线性系统模型和 ANN 模型等。

(2)20 世纪 60 年代以来,流域水文模型进入到集总式概念模型即“灰箱”模型的开发阶段。概念性模型以流域实际水文循环和质量守恒方程作为基础,使用一系列相互联系的存储单元来模拟流域上发生的水文过程。概念性模型一般考虑了水循环的基本垂直结构,部分模型考虑了水平方向的非均匀性。这些概念集总式“灰箱”模型尚无法给出水文变量在流域内的分布。代表性的概念性模型有 Stanford 模型、HEC-1 模型、水箱模型、TANK 模型、新安江模型/陕北模型、萨克拉门托模型和 ARNO 模型等。

(3)随着下垫面和气候变化条件下及缺乏资料地区的水文模拟和预测这一实践需求的

提出,人类亟待开发具有物理机制的水循环模拟模型。1969年,Freeze和Harlan提出了一个具有严格物理基础的流域水文模型的“蓝图”(简称FH69蓝图)。进入20世纪80年代中期,随着计算机技术、地理信息系统和遥感技术的发展,世界各地的水文学家开发了许多分布式或半分布式流域水文模型。在美国及加拿大常用的模型有HSPF模型、HEC-HMS模型等,欧洲国家比较知名的模型有SHE/MIKESHE模型和TOPMODEL模型等,日本有广泛影响的模型有如小尻模型、OHYMOS模型、IISDHM模型、WEP模型等。这类模型从水循环过程的物理机制入手,将产汇流、土壤水运动、地下水运动及蒸发过程等联系起来一起研究并考虑水文变量的空间变异性问题,通常称“白箱”模型。

当前,国内外的分布式水循环模拟正广泛融合现代地理信息技术(GIS、RS、GPS等)、数据快速存取与挖掘技术、计算机算法优化技术、组件式编程技术等的新进展。随着这些新技术的引入,一方面克服了长期以来制约分布式水文模拟发展的众多障碍,如流域划分与编码、汇流路径的精确刻画、基础数据的空间化处理、基础数据实时获取与动态更新等;另一方面,这些新技术的引入,不但革新了传统分布式水文模拟技术的数据获取方式,提高了基础数据对模型的满足程度,促进了模拟策略的完善,从而全面提升了分布式水文模拟的模拟精度和模拟效率;此外,这些新技术的引入,还进一步丰富了分布式水文模拟的内容和实践应用价值,如当前的一些分布式水文模型,不但可以模拟经典天然水循环要素过程,还可以同时模拟水沙过程、水质变化过程以及水生态演变过程,大大提升了分布式水文模拟的应用领域。

综观国内外分布式水循环模拟技术的研究进展,在研究和推广中尚存在以下问题:①大尺度流域水循环过程的物理概化及整体模拟。当前,国内外的绝大多数分布式水循环模拟都是基于中小尺度流域开发的;然而,随着流域统一管理进程的快速发展,迫切需要对大尺度流域的水循环及其伴生过程进行统一模拟。由于水循环机理/机制具有时空分异的特性,给大尺度流域水循环过程的物理概化和整体模拟提出严峻的挑战。②天然水循环过程与人工侧支水循环过程的耦合模拟。随着人类对流域水循环过程影响程度的加深,人工侧支水循环对整个水循环过程的影响十分显著,传统基于天然水循环过程的分布式水文模拟已不能系统揭示流域水循环的演变规律及特性,迫切需要进行天然水循环过程与人工侧支水循环过程的耦合模拟;然而,就人工侧支水循环的各要素过程而言,其具有比天然水循环更大的不确定性,客观、精细描述人工侧支水循环各要素过程的空间分异特征十分困难。③不同尺度水文参数及过程的时空分异的有效描述。在不同的时空尺度上水文参数及过程均具有时空分异特征,在现实模拟中,不可能对所有的这些特征进行精细描述,如何在模拟结果误差的要求范围进行有效、客观描述,是当前分布式水循环模拟中亟待解决的重大问题之一。④极端水文事件的快速响应与精确预测、分析。随着人类活动影响的加剧,极端水文事件发生频率在逐渐增加,且这些事件给人类造成了极大的危害。为减少极端水文事件所带来的灾害与损失,需要在水循环模拟中做出快速反应。在当前国内外水循环模拟中,针对时间步长大于或等于一日的水循环模拟精度较高,对于小于该时间尺度的水循环模拟,精度往往难以达到实践需求。由于要进行小尺度的精细模拟,一方面需要对水文过程做更为细致的物理概化,另一方面需要更为翔实的基础资料,这就形成了当前在分布式水循环模拟中悬而未决的重大实践需求问题之一。⑤尺度转换问题。由于不同生产实践活动对水循环模拟的要求不同,在现实中往往要进行水循环模拟的尺度转换,这就需要在水循环模拟分析中,不但

要求采用“变时间步长”和“变空间步长”相结合的模拟技术,还应该保证不同步长模拟结果的一致性。⑥水文过程及其伴生过程的综合/耦合模拟。水文过程、水生态过程与水环境过程往往是交织在一起的,在进行综合水管理中,需要对这些过程进行统一模拟;然而,这些过程在时空表征上均存在巨大的差异,这就使得水文过程及其伴生过程的综合模拟存在较大的困难。⑦参数获取及实时更新问题。分布式水循环模拟是以海量水文及相关下垫面表征信息为基础的,然而在实践中,受到管理体制和机制的限制,要获得实时的相关表征参数十分困难。尽管随着现代地理信息技术的发展,使得这一问题得到缓解,但仍存在大量不通过上述技术获取的参数,因此这一问题还将在一定的时间内长期存在。除此之外,还存在诸如尺度匹配、模型校验、在推广中对管理人员的专业技能要求较高等方面的实际问题。

当前,国际上分布式流域水循环模拟技术存在如下发展趋势:①气象-水文过程的耦合模拟。将现代气象和水文观测技术相结合,将气候模式与水文模型相耦合,对突发水文事件进行高精度的模拟与预报。②无观测资料或观测资料缺乏的流域水文预测(PUBs)。充分利用遥测技术,对上述地区进行水文预报。③水文及其伴生过程的耦合模拟,与水资源评价、水污染和水生态等专业模型的耦合及集成。④水循环模拟模型的公众化、标准化与产品化,固化水循环模拟的前处理和后处理过程,最大限度地降低水循环模拟模型对用户的专业需求,促进水循环模拟模型的公众化、标准化与产品化,充分发挥水循环模拟模型的效益。

1.2.3.3 气候-水文耦合模拟

根据水循环过程发生及演变的载体和动力学机制,可将其划分为大气过程、地表过程、土壤过程和地下过程。由于学科研究对象和分工的不同,传统气象和气候学重点关注水循环的大气过程,水文学重点关注水循环的地表过程,农学和水文地质学则分别关注水循环的土壤过程和地下过程。在没有进行多学科交叉研究的情况下,上述研究范式在一定程度上割裂了水循环的整体性特征;难以系统识别自然和日趋增强人类活动影响下的水循环演变机理,对其未来发展情势的预测预报精度和预见期也难以满足实践需求。为此,需要在统一物理机制下,进行多学科的交叉研究,将水循环的四个基本过程进行整体分析模拟。气候-水文耦合模拟是满足上述实践需求的集中体现,也是当前国内外在资源和环境研究领域的热点和前沿研究问题之一。世界气候研究计划(WCRP)及其下属的气候变率和可预报研究(CLIVAR)、全球能量与水循环试验计划(GEW2EX)、国际地圈生物圈计划(IGBP)下的水循环生物圈方面(BAHC)等大型国际研究计划,都对本命题的相关研究进行较为详细的部署。综观国内外气候-水文耦合模拟,可划分为离线耦合模式(Off-line Coupling)和在线耦合模式(On-line Coupling)两类。

离线耦合模式,又称单向耦合模式;即分别构建研究区的气候模型和水文模型,并进行独立校验;将气候模型输出的气温、降水、风速、日照、水气压等气象信息作为水文模型的输入,驱动水文模型。离线耦合模式不需要对已有气候模型和水文模型的主体模块进行改造,开发任务较轻,对开发人员就气候、水文原理掌握和灵活运用要求也相对较低,是气候-水文耦合模拟研究早期的主要开发范式,但离线耦合模式含有多套水循环的物理机制,未能从根本上整合水循环的四个基本过程,也未能从根本上突破传统单学科的研究范式;与此同时,对同一要素过程(如蒸发)含有多套模拟结果,且不能进行相互校验。需要特别指出的是,由于在离线耦合模式中,区域下垫面条件和陆面产流信息不能及时反馈到大气过程的模拟之中,难以评判下垫面条件改变、水资源开发利用等人类活动对区域气候影响的动力学机

制,不能满足面向全球气候变化适应性对策制定和人类水土开发资源综合调控的实践需求。

在线耦合模式,又称双向耦合模式;即在统一的物理机制下,将水循环的四个基本过程进行整体模拟,过程与过程进行参数的相互传递与反馈。气候学和水文水资源学均具有较为完备的模型体系,且绝大多数模型均采用了模块化的开发模式;为此,在进行气候-水文模式的耦合的开发中,结合模型开发需求,充分发挥不同模型在要素过程模拟方面的优势,共享气候、水文水资源模拟成果。Pietroniro 曾提出气候-水文在线耦合模拟的概念性框架:利用一个共同的陆面模式耦合大气模式和水文模式,加强大气模式对陆面过程的描述,改善水文模式预报能力,为大气模式提供更精确的水分能量输入;并利用不同层次多级嵌套,实现大气模式和水文模式的双向耦合,然后对两个模式分别进行率定。MÉlders 等较早地开展了大气水文模式的双向耦合。他们开发了一个陆面模块用于耦合气候模式 GESIMA 和水文模式 NASMO,模拟闭合水文循环过程。通过在大气模式 5 km × 5 km 网格内考虑 1 km 分辨率的水文模式单元,解决大气模式和水文模式的空间尺度不一致问题。对于径流和土壤湿度等参数的尺度采用网格平均算法来实现。研究考虑了次网格尺度陆面过程对云和降水等气候要素的影响。Seuffert 等在中尺度气候模式(Lokal Model, LM)和陆面-水文模式 TOPLATS (“TOPMODEL”-Based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme)双向耦合研究中,利用 TOPLATS 取代了 LM 中的 TERRA 土壤模块,后者未考虑土壤侧向水流及汇流过程,在同一个交互界面上实现两个模式的在线(on-line)耦合。Yu 等利用 GENESIS GCM 中陆面模块 LSX 输出的产流量、蒸散发、下渗量驱动建立在细网格上的大尺度分布式水文模式 HMS,显示模拟地表水、土壤水和地下水相互作用过程,并采用基于土壤含水量的方法解决尺度转换问题,实现粗网格大气(陆面)模式与细网格水文模式的耦合,其中的大气模块可以是 GCM、RCM 或者实测和再分析气候数据库,耦合系统在多个流域取得了成功的应用。上述研究针对不同模式的结构特点,围绕尺度问题和陆面-水文模式间水量平衡机制的耦合方法,有效地开展了大气水文模式双向耦合研究。

气-陆耦合模式发展中存在以下问题:

(1)时空尺度匹配问题。由于气候模式中的时间步长一般都在几十秒到几分钟不等,而水文模型的时间步长通常在几小时到日甚至月尺度;在空间上,气候模式属于大尺度范畴,通常都采用几千米到几十千米的网格,而水文模型属于流域尺度,网格过大,会导致土壤植被以及地形等参数的空间异质性消失,从而影响对水循环过程物理机制描述的准确性。如何解决气候模式和水文模型的时空尺度不匹配,是实现耦合模式的一个关键性问题。对时间尺度的处理相对较容易,可以用数学统计的方法分别将大气和水文模型的模拟结果解集到相同的尺度,而实现大气过程和水文过程模拟结果之间的传送过程。对于空间步长的转换,可以通过粗分辨率嵌套细分辨率网格来实现,从而解决大气模式与水文模型空间尺度不统一的问题,但对模式分辨率的降低涉及到目前计算机的运算能力问题,由于气候模式的结构复杂,即便是对流域尺度进行的模拟计算也要花费较长时间,所以还需要进一步的研究,以真正解决大气和水文耦合中的尺度转换问题。

(2)次网格非均匀性问题。由于大气过程的高度非线性特征,使得气候模式的空间尺度不能达到足够的精度,从而不能充分反映陆面次网格空间异质性的特征。地形、土壤、植被等要素直接影响地表水文过程的模拟精度和效果,因而在进行气-陆耦合时有必要考虑次网格的非均匀性问题。目前,处理次网格非均匀性问题常用方法是马赛克法和统计-动