

国家自然科学基金资助项目 (50839005、50979075、50579052)

国家重点基础研究发展计划资助项目 (2010CB428400)

中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程项目 (CX10G-E01-08)

水资源与水电工程科学国家重点实验室 (武汉大学) 研究团队项目 (WH2009C002)

流域水文模型

——气候变化和土地利用/
覆被变化的水文水资源效应

■ 谢平 窦明 朱勇 著
■ 李晶 陈丽 孙志



科学出版社

www.sciencepress.com

资助项目(50839005、50979075、50579052)

国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB428400)

中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程项目(CX10G-E01-08)

水资源与水电工程科学国家重点实验室(武汉大学)研究团队项目(WH2009C002)

-37

流域水文模型

——气候变化和土地利用/覆被变化的
水文水资源效应

谢平 窦明 朱勇 著
李晶 陈丽 孙志

P33
X452



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对由于区域气候变化和土地利用/覆被变化所引起的水文水资源效应问题,建立了考虑土地利用/覆被变化的流域水文模型(WHMLUCC),提出一套水文水资源效应评估理论方法体系,并将其应用于无定河流域。全书由十五章构成,主要部分有三篇:第一篇“建模机理”介绍了流域产汇流计算原理以及代表性流域水文模型,在此基础上阐明考虑土地利用/覆被变化的流域水文模型的建模机理;第二篇“变化预测”介绍了水文变异诊断系统的构成和检验原理,并对无定河流域过去和现状水文要素进行了时空变异分析、对无定河流域未来气候变化和土地利用/覆被变化进行了预测;第三篇“模型应用”介绍了 WHMLUCC 模型在无定河流域水循环模拟、水文水资源效应分析、生态需水量计算和绿水-蓝水定量评估方面的实际应用情况。

本书可供水文水资源学科、资源科学、地理科学、环境科学的科研人员,大学教师和相关专业的高年级本科生和研究生,以及从事水利工程、水土保持工程和环境工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流域水文模型——气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应. 谢平等著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-026987-4

I. 流… II. ①谢… III. 水文-流域模型-研究 IV. P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 042490 号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年3月第一次印刷 印张:21

印数:1—2 000 字数:410 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着人类社会的快速发展,地球上的水文过程和水循环规律也在不断地加速变化,突出表现为淡水资源减少、洪旱灾害频繁、生态环境恶化,许多地区出现了严重的水问题与水危机。人类活动引起的土地利用/覆被变化(LUCC)是其重要原因之一。土地利用/覆被变化的水文水资源效应越来越受到重视,如国际地球-生物圈计划(IGBP)的核心项目(GAIM、BAHC、GCTE、LUCC)就是把土地利用/覆被变化的水文水资源效应作为全球变化的重要研究内容之一;《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》把“人类活动对地球系统的影响机制”作为第三个国家重大战略需求的基础研究,其中重点流域大规模人类活动的生态影响、适应性和区域生态安全等是其重要研究内容。另一方面,气候变化引发的一系列全球性环境问题已严重困扰着人类社会,2007年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)强调了气候变暖导致的干旱、洪涝、冻害、冰雹、沙尘暴等自然灾害频发将严重威胁到生态系统和社会经济发展的安全。2001年以来,国际上实施了全球水系统计划(GWSP),其中全球气候变化和剧烈人类活动(包括土地利用变化)对区域水循环与水安全的影响,是GWSP重点研究的问题之一,气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应逐渐成为全球环境变化研究的重要组成部分。因此,以水问题为纽带,研究气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应及其对水循环、水环境和水灾害的影响,既是全球水系统研究的核心科学问题和发展前沿,又是区域水安全评价和风险管理重大需求的应用基础问题。

但是,水文过程的变化和水文影响机制的复杂性,以及由土地利用/覆被变化引起的水文水资源效应具有双向性和诸多不确定性,使得该研究相对比较复杂和发展滞缓。过去对这方面的研究主要停留在一些定性的描述分析和统计分析上;而在实地观测的基础上进行定量研究,以及利用遥感技术和地理信息系统建立分布式水文模型直接动态模拟气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应研究相对比较薄弱。特别是目前研究土地利用/覆被变化的流域水文模型未与我国的土地资源分类系统有机结合,不便于从模型结构和参数方面直接揭示土地利用/覆被变化对水文和水资源影响的过程与机理,也不便于在水文模型中充分利用土地利用/覆被变化的信息进行水文水资源效应分析。为此,作者研制了一个考虑土地利用/覆被变化的流域水文模型(WHMLUCC),并根据应用的实际需要,将其扩展为LWHM-LUCC集总式模型、ZWHM-LUCC分块式模型和DWHM-LUCC分布式模型三种形式。至于气候变化,主要通过WHMLUCC模型的输入因子降

雨和蒸发来考虑。

无定河是黄河中游较大的一级支流,地处毛乌素沙漠与黄土高原的交接地带,3万多平方公里的流域内沟壑纵横,土壤沙化,气候干旱,植被稀少,是黄河中游水土流失最为严重的地区之一,也是我国四大沙尘暴发源地之一,1982年被列为全国水土保持八个重点治理的区域之一。本书重点以无定河流域为研究区域,借助于 WHMLUCC 模型开展应用研究,主要内容包括水文要素的变异诊断分析;土地利用资料的解译、反演和预测;降雨和蒸发过程的联合随机模拟;WHMLUCC 模型的水循环模拟;气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应分析;生态需水量计算;绿水-蓝光定量评估等。上述研究不仅对变化环境下的水循环和水安全研究具有重要的理论意义,而且对于流域水资源规划、水土保持规划、防洪抗旱规划以及洪旱灾害风险评估和流域管理具有重要的实际应用价值。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金重点资助项目“珠江三角洲区域水文要素变异及其水资源响应量化研究”(50839005)、国家自然科学基金资助项目“西江洪水归槽影响下非一致性洪水频率计算方法研究”(50979075)、国家自然科学基金资助项目“变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算方法研究”(50579052)、国家重点基础研究发展计划资助项目“气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策”(2010CB428400)、中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程项目“变化环境水循环模拟与时空分析研究”(CX10G-E01-08)以及水资源与水电工程科学国家重点实验室(武汉大学)研究团队项目“变化环境下水资源时空分布模拟及预测”(WH2009C002)的资助,特向支持和关心作者研究工作的单位和个人表示衷心的感谢。书中有部分内容参考了有关单位或个人的研究成果,均已在参考文献中列出,在此一并致谢。本书由水资源与水电工程科学国家重点实验室(武汉大学)资助出版,深表谢忱。

由于气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应涉及气候学、水文学、地理学等多个学科,研究难度较大,再加上时间仓促,作者水平所限,书中难免有不足之处,恳请广大读者和专家不吝赐教。

作者

2010年2月于武汉东湖之滨、珞珈山下

目 录

前言

绪 论

第一章 绪论	3
§ 1.1 研究背景和意义	3
§ 1.2 气候变化的水文水资源效应研究综述	5
§ 1.3 土地利用/覆被变化的水文水资源效应研究综述.....	8
§ 1.4 主要研究内容.....	13
参考文献	16

第一篇 建模机理

第二章 概念性产流模式	21
§ 2.1 产流原理介绍.....	21
§ 2.2 蓄满产流模式的产流计算.....	28
§ 2.3 超渗产流模式的产流计算.....	30
§ 2.4 混合产流模式的产流计算.....	33
参考文献	37
第三章 概念性汇流元素	38
§ 3.1 汇流原理.....	38
§ 3.2 概念性元素的定义.....	44
§ 3.3 概念性元素与地貌、水流动力特征值之间的关系	47
§ 3.4 概念性元素的推移和坦化作用.....	51
§ 3.5 概念性元素的性质.....	53
§ 3.6 概念性元素的比较.....	62
参考文献	67
第四章 流域水文模型介绍	68
§ 4.1 流域水文模型研究概述.....	68
§ 4.2 代表性集总式流域水文模型.....	71

§ 4.3	代表性分布式流域水文模型	83
§ 4.4	模型比较	96
	参考文献	99
第五章	WHMLUCC 模型的研制	101
§ 5.1	基于 Shreve 河链概念的单元划分	101
§ 5.2	土地资源分类系统	102
§ 5.3	单元水文结构	105
§ 5.4	WHMLUCC 单元水文模型的扩展	112
	参考文献	112
第六章	GIS/RS 在 WHMLUCC 模型中的应用	114
§ 6.1	无定河流域概况	114
§ 6.2	GIS/DEM 在 WHMLUCC 中的应用	121
§ 6.3	RS 在 WHMLUCC 中的应用	126
§ 6.4	无定河流域 DEM 及地貌信息提取	127
§ 6.5	降雨空间插值应用实例	130
	参考文献	135

第二篇 变化预测

第七章	水文变异诊断系统	139
§ 7.1	水文变异的定义	139
§ 7.2	变异诊断系统	140
§ 7.3	初步诊断	141
§ 7.4	详细诊断	145
§ 7.5	综合诊断	158
§ 7.6	权重计算原理	159
§ 7.7	诊断结论输出	165
	参考文献	165
第八章	无定河流域水文时空变异分析	167
§ 8.1	无定河流域水文要素概况	167
§ 8.2	无定河流域水文要素变异分析	169
§ 8.3	无定河流域水文变异关系与水文水资源效应分析	180
§ 8.4	无定河流域降雨时空变异分析	182
	参考文献	184

第九章 无定河流域降雨蒸发的联合随机模拟	185
§ 9.1 概述	185
§ 9.2 基本资料和数据	186
§ 9.3 基于统计分布法的降雨蒸发联合随机模拟	187
§ 9.4 基于季节模型法的降雨蒸发联合随机模拟	197
§ 9.5 方法评述	201
参考文献	202
第十章 无定河流域土地利用/覆被变化预测	203
§ 10.1 概述	203
§ 10.2 基本资料和数据	204
§ 10.3 基于一阶马尔科夫链模型的未来土地利用信息预测	206
§ 10.4 基于一阶马尔科夫链优化模型的未来土地利用信息预测	212
§ 10.5 基于灰色理论的未来土地利用信息预测	215
§ 10.6 方法评述	218
参考文献	219

第三篇 模型应用

第十一章 WHMLUCC 模型在无定河流域的应用	223
§ 11.1 LWHM-LUCC 在无定河流域的应用	223
§ 11.2 ZWHM-LUCC 在无定河流域的应用	229
§ 11.3 DWHM-LUCC 在大理河流域的应用	241
§ 11.4 三种模型的比较分析	251
参考文献	253
第十二章 无定河流域气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应	254
§ 12.1 过去气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应分析	255
§ 12.2 不同水文水资源效应分析方法的比较研究	265
§ 12.3 未来变化情景下的水文水资源效应分析	280
参考文献	285
第十三章 无定河流域生态需水量的计算	286
§ 13.1 研究综述	286
§ 13.2 生态需水量计算方法介绍	289
§ 13.3 无定河流域生态需水量计算	295
参考文献	301

第十四章 无定河流域绿水和蓝水的定量评估..... 303

§ 14.1 绿水和蓝水的界定..... 303

§ 14.2 绿水和蓝水计算方法简介..... 309

§ 14.3 无定河流域绿水和蓝水的定量评估..... 310

参考文献..... 315

结论与展望

第十五章 结论与展望..... 319

§ 15.1 研究成果和主要结论..... 319

§ 15.2 存在的不足..... 323

§ 15.3 展望..... 324

参考文献..... 325

附录

第一篇 变化预测

第十一章 无定河流域水文要素变化预测..... 329

§ 11.1 无定河流域水文要素变化的成因..... 329

§ 11.2 无定河流域水文要素变化的定义..... 341

§ 11.3 无定河流域水文要素变化的预测..... 341

§ 11.4 无定河流域水文要素变化的预测模型..... 345

§ 11.5 无定河流域水文要素变化的预测结果..... 345

第十二章 无定河流域水文要素变化预测模型..... 345

§ 12.1 无定河流域水文要素变化预测模型的建立..... 345

§ 12.2 无定河流域水文要素变化预测模型的验证..... 345

§ 12.3 无定河流域水文要素变化预测模型的应用..... 345

第十三章 无定河流域水文要素变化预测模型..... 345

§ 13.1 无定河流域水文要素变化预测模型的建立..... 345

§ 13.2 无定河流域水文要素变化预测模型的验证..... 345

§ 13.3 无定河流域水文要素变化预测模型的应用..... 345

第十四章 无定河流域水文要素变化预测模型..... 345

§ 14.1 无定河流域水文要素变化预测模型的建立..... 345

§ 14.2 无定河流域水文要素变化预测模型的验证..... 345

§ 14.3 无定河流域水文要素变化预测模型的应用..... 345

参考文献..... 345

第一章 绪 论

§ 1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

自19世纪末以来,随着科技的发展和生产力的提高,人类创造了前所未有的财富,推进了整个社会文明的发展。然而,人类在改造自然的同时,也使其赖以生存的环境受到严重干扰,造成全球环境变化过程发生了巨大改变。水资源是人类赖以生存和发展不可缺少的一种宝贵资源,确保水资源可持续利用,是实现社会经济可持续发展的必要前提条件^[1]。但是由于人类活动的负面影响,地球上的水文过程正在加速发生变化,突出表现在淡水资源减少、水旱灾害频繁、生态环境恶化等多个方面。目前,许多国家和地区已发生了严重的水危机^[2],水问题作为制约区域经济发展的关键性问题之一,引起了全人类社会的广泛关注。

人类对土地利用/覆被变化(Land Use/Land Cover Change, LUCC)是导致全球环境变化的重要原因之一^[3]。人类对土地的使用(如农业化、城市化等),必然会在不同方面改变土地的面貌状态(如水旱农作物、林草种植等),进而对依赖于土地的生态系统及环境产生作用^[4]。土地利用/覆被变化是全球环境变化在地球上留下的最直观、最明显的痕迹。国际地圈-生物圈计划(IGBP)和全球环境变化中的人文领域计划(HDP)于1985年联合提出土地利用/覆被变化研究计划以后,迅速引起许多科学家的兴趣与关注,特别是土地利用/覆被变化所带来的环境效应近年来更受到重视^[5]。

土地利用与水的关系,两者密不可分。水多成洪,作物受淹;地下水位过高,造成咸灾;地下水位过低,影响灌溉。在生产生活用水增加,原始生态的水资源减少,上游用水增加,留给下游的水资源减少^[6]。例如,在中国南方的长江流域^[7],新中国成立以来洞庭湖面积 1700km² 以上,鄱阳湖面积 1400km² 以上,湖北所有通往湖泊的渠道,中游干流河道内的江湖洲滩几乎全部被垦殖,减少湖滩长江洪水面积的 5700km² 以上,使得长江流域在 1996 年夏季 1997 年冬季水旱的情况下,却出现了更为严重的水旱灾害。又如在中国北方的黄河流域^[8],从 20 世纪 70 年代以来,黄河下游频繁出现断流,且愈演愈烈。在 1971~1998 年的 27 年中的断流 21 年,平均年断流 10 个月开流。究其原因,主要是黄河流域中游为了农业、城市用水量大增,使下游断流;中游水土保持工程水利工程治理下,土地利用及覆被类型等综合造成的。上

第一章 绪 论

§ 1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

自 19 世纪末以来,随着科技的进步和社会生产力的提高,人类创造了前所未有的财富,推进了整个社会文明的进步。然而,人类在改造自然的同时,也使其赖以生存的环境受到严重干扰,进而使自然环境的演化过程发生了巨大改变。水资源是人类赖以生存和发展不可缺少的一种宝贵资源,确保水资源可持续利用,是实现社会经济可持续发展的重要前提条件^[1]。但是由于人类活动的负面影响,地球上的水文过程正在加速发生变化,突出表现在淡水资源减少、水旱灾害频繁、生态环境恶化等多个方面。目前,许多国家和地区已发生了严重的水危机^[2],水问题作为制约区域经济发展的关键性问题之一,引起了全人类社会的广泛关注。

人类活动引起的土地利用/覆被变化(land use-land cover change, LUCC)是导致水问题日益严重的原因之一^[3]。人类对土地的使用(如农业化、城市化等),必然会在不同方面改变土地的覆被状态(如水旱农作物、林草种植等),进而对依附于土地的生态系统及环境产生作用^[4]。土地利用/覆被变化是全球环境变化在地球上留下的最直接、最明显的痕迹。国际地圈-生物圈计划(IGBP)和全球环境变化中的人文领域计划(HDP)于 1995 年联合提出土地利用/覆被变化研究计划以后,迅速引起许多研究学者的兴趣与关注,特别是土地利用/覆被变化所带来的环境效应越来越受到重视^[5]。

土地利用与水的关系,始终密不可分。水多成洪,作物受淹;地下水位过高,盐碱成灾;地下水位过低,干旱加重。生产生活用水增加,留给生态的水资源减少;上游用水增加,留给下游的水资源减少^[6]。例如,在中国南方的长江流域^[2],新中国成立后洞庭湖围垦 1700km² 以上;鄱阳湖围垦 1400km² 以上;荆北所有通江湖泊被堵塞;中游干流河道内的江洲河滩几乎全部被围垦,减少调蓄长江洪水面积约 5700km² 以上,使得长江流域在 1998 年低于 1954 年降水量的情况下,却出现了更为严重的洪涝灾害。又如在中国北方的黄河流域^[7],从 20 世纪 70 年代以来,黄河下游频繁出现断流,且愈演愈烈,在 1972~1998 年的 27 年中断流 21 年,平均 10 年有 8 年断流。究其原因,主要是黄河流域近年来工农业、城市用水量大增,再加上该流域水土保持工程和水利工程改变了土地利用及覆被类型等综合造成的。上

述第一个问题涉及如何评估土地覆被变化的洪旱灾害效应或称水文效应;第二个问题涉及如何评估土地覆被变化的水资源效应^[6]。此外,土地利用方式和利用程度的改变(如化学肥料、农药及杀虫剂的大量使用)以及土地覆被的变化(如城市化、工业化等),会增加水体中的营养元素,造成水体的富营养化,因此还应该评估其水环境效应^[5]。

除了土地利用/覆被变化会带来一系列的水文水资源效应外,气候条件(如降雨、蒸发等)的变化,也会直接导致流域水循环过程发生改变,进而影响到流域的水资源形成条件。随着工业的发展和人口的增加,CO₂排放量也不断增加,进而导致温室效应出现,全球气温不断升高。联合国环境规划署(UNEP)和世界气象组织共同组建的政府间气候变化委员会(IPCC)组织全世界几百名著名科学家的科学评估报告^[8]指出:过去100年中全球气候总的趋势是变暖的,全球地面气温上升了0.3~0.6℃,如果人类不能有效控制温室气体的排放,全球气候将持续变暖;在未来40~50年内全球平均温度如每10年上升0.2℃,则到21世纪末全球气温将累计上升1~4℃;而20世纪气候变化的频率和幅度大大超过过去5000年中的变化。科学研究表明,近百年来中国平均气温升高了0.5~0.8℃,比全球平均增温幅度略高。中国年均降水量变化趋势不明显,但区域降水变化波动较大,如华北大部分地区逐年减少,而华南与西南地区逐年增加。近30年来,中国沿海海平面总体上升90mm,略高于全球平均水平,中国极端天气与气候事件的频率和强度发生了明显变化^[9]。

当前,气候变化引发的一系列全球性环境问题已严重困扰着人类社会,并威胁到生态系统和社会经济发展的安全^[10]。气候变化对水文水资源的影响逐渐成为全球环境变化研究的重要组成部分^[2],受到国内外专家学者的高度重视。了解气候变化的规律及其对水资源的影响,对于合理利用及保护水资源,为国民经济的可持续发展提供水资源保障具有积极意义^[11]。

综上所述,以水问题为纽带,研究气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应及其对水循环、水环境和水灾害的影响,已成为当前水文水资源学科领域的重要研究课题^[12]。

1.1.2 研究意义

人类活动对水文过程的影响,集中表现在对下垫面条件的改变上。流域下垫面的地形、地貌、土壤、植被等条件的变化,可概括为土地利用形式或土地覆被类型的变化^[13]。但是水文过程的变化和水文影响机制的复杂性,以及由气候变化和土地利用/覆被变化引起的水文水资源效应具有双向性和诸多不确定性,使得该研究相对比较复杂和发展严重滞缓^[14]。过去对这方面的研究主要停留在一些定性的描述分析和统计分析上,而在实地观测的基础上进行定量研究,并利用遥感技术和

地理信息系统建立分布式水文模型,直接动态模拟气候变化和土地利用/覆被变化带来的水文水资源效应的研究相对较少^[12]。而且现有的水文模型并没有与我国的土地资源分类系统有机结合,不利于充分揭示我国现有土地资源分类系统下的土地利用/覆被变化对流域水文水资源系统的影响作用与机理。因此,无论从分布式水文模型的理论发展上,还是分布式模型在我国土地利用/覆被变化研究的实际应用上,均需要研制一个考虑气候变化和土地利用/覆被变化的分布式流域水文模型。

研究区域无定河流域属于干旱半干旱地区,由于黄土质地疏松,具有垂直节理性,容易崩塌,因而极易受到水流侵蚀造成水土流失。同时,该地区气候干旱、风力强劲、暴雨集中、植被稀少,加之长期以来,滥垦、滥伐、滥牧使当地的生态环境遭到严重的破坏,水土流失极为严重。全流域水土流失面积 23137km²,占流域面积的 76.5%,被列为国家水土保持重点治理地区之一。如何分析在不同地理分区上的水土保持措施,定量评估不同的气候变化和土地利用/覆被变化趋势对年径流过程和产沙过程的影响,进而分析实施水土保持措施的减水减沙效益,显得极为迫切和重要。

为此,作者将建立一个考虑土地利用/覆被变化的流域水文模型(WHM-LUCC),并通过该模型的输入因子降雨和蒸发来考虑气候变化的影响,直接模拟不同气候类型(过去气候、现在气候)和土地利用/覆被类型(如林地、草地、耕地、水域、未利用地等变化)对无定河流域年径流量的影响,定量评估气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应,为该流域的水资源规划和水土保持规划提供科学依据。

§ 1.2 气候变化的水文水资源效应研究综述

1.2.1 气候变化的内涵

气候变化是指气候平均状态在统计学意义上的巨大改变或者持续较长一段时间(典型的为 10 年或更长)的气候变动^[11],包括气候的自然波动与人类活动引起的变化。气候变化包括:温度的变化、降水的变化、蒸发量及风速等气象要素的变化。

自 20 世纪 80 年代以来,气候变化及其带来的水文水资源效应已成为各国政府部门、科学家和广大公众关注的热点问题;尤其是在全球气候日趋异常的情况下,极端气候事件导致洪涝、干旱等气象灾害频繁发生。气候变异给日常生活带来的各种影响,随着经济社会活动的日益活跃,也将越来越明显^[15]。

1.2.2 气候变化对水文水资源的影响

温度的升高会导致冰川融化和消退,直接影响到以冰川为源头的河流径流量,

进而影响整个流域的水文水资源过程。此外,温度的变化还会间接地影响到其他水文要素发生变化,如温度升高必然导致蒸发增加,使区域植被退化、水源涵养能力降低,从而导致河流径流量锐减、土地荒漠化加剧、水土流失严重,影响到整个流域的水资源量。相关研究显示,按照当前的气候变暖趋势,预计今后几十年现有的山地冰川中有三分之一或一半以上将可能消失^[8]。冰川缩小会影响河流流量的季节性分配,并会对区域性水资源产生重大影响。按气候变化规律,全球气温平均升高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,降水量将会减少 10% ^[8]。

降雨是径流形成的基础,是流域水资源量最直接的来源和最关键的影响因素。降雨的变化直接影响到流域的水文生态过程和水资源量。一般来讲,降雨的变化主要包括降雨的年际变化和年内分配变化,降雨的年际变化直接导致流域的水资源总量发生变化,降雨的年内变化则主要影响水资源利用的年内调节。从流域地表水、地下水的补给情况来看,气候变化特别是降水变化,对水资源量的变化起着决定性的作用^[16]。此外,降雨变化还影响着流域的水沙平衡和水盐平衡等。

气候变化,在一定程度上还会影响到区域土地利用/覆被变化。据相关资料分析预测,按照目前气候变化的趋势到21世纪中期,全球森林的覆盖面积将由 58% 减少到 49% ,沙漠将由 21% 扩大到 24% ,苔原将由 3% 减少到 0 ,自然生态系统将发生显著改变^[8]。气候变化速率和变化幅度直接影响全球生物的多样性和土地利用/覆被状况,从而间接地影响到水资源量^[8]。

气候变化的影响是多方位、多层次和多尺度的,不仅影响整个自然生态系统,而且也影响着我国的社会经济系统^[17]。一方面气候变化必然引起水循环过程的改变,导致水资源在时空上的重新分配以及水资源数量的改变;另一方面气候条件是生态系统最基本的生存要素之一,例如温度、湿度和降水对生态类型有直接影响,气候变化间接或直接地影响着区域生态系统和自然环境,这些都对人类的生存和社会发展有非常显著的影响。由于气候发生变化,农业干旱频繁发生,水资源供需矛盾十分突出,给国民经济的持续发展造成了严重的障碍^[11]。虽然气候变化的影响有时也有正面效应,但更多的是由于它给人类带来了诸多负面影响,因此引起世界各方面的关注,如联合国环境署(UNEP)、世界气象组织(WMO)、联合国粮农组织(FAO)、世界自然基金会(WWF)等国际机构和组织,以及许多国家的科研机构、大学以及民间团体、非政府组织(NGOs),等等^[17]。近20年来,在政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的领导和推动下,气候变化及其影响评估研究取得了重大进展:IPCC先后于1990年、1995年、2001年和2007年发表了四次全球气候变化的综合评估报告,对全球的气候变化及其影响研究做了科学评估,并预测了全球未来 $50\sim 100$ 年可能出现的气候变化范围及对各类生态系统的可能影响^[17,18]。

1.2.3 气候变化的水文水资源效应研究进展

国外关于气候变化对水文水资源影响的研究起步于 20 世纪 70 年代后期^[19]。美国国家研究协会于 1977 年开始组织讨论气候变化与供水之间的相互关系和影响^[19,20]；世界气象组织于 1985 年出版了气候变化对水文水资源影响的综述报告，并推荐了一些检验和评价方法，随后又给出了水文水资源系统对气候变化的敏感度分析报告^[19,21]；国际水文科协(IAHS)在 1987 年召开的第 19 届国际 IUGG 大会中举办了“气候变化和气候波动对水文水资源影响”专题学术讨论会；1988 年，由联合国环境规划署及世界气象组织共同组建了政府间气候变化委员会(IPCC)，IPCC 的成立加快了气候变化对水文水资源影响研究的步伐。进入 20 世纪 90 年代，有关气候变化的水文水资源效应研究工作迅速增加。1990 年出版的《气候变化与美国水资源》一书系统地总结了在这一时期气候变化对水文水资源影响研究的方法、内容和成果；1991 年召开的第 20 届 IUGG 大会水文科学组的主题就是探讨“土壤-大气之间相互作用的水文过程”；1993 年，以“气候变化、大气圈和水圈的相互作用和影响、大尺度气候和水文模拟技术”为主题，在日本召开了第 6 届国际气象和大气物理学协会与第 4 届国际水文科学协会(IAMAP-IAHS)联合大会。进入 21 世纪，气候变化成为 IAHS-PUB、FLOOD DEFENCE 2002 等多个国际会议的主要议题，对气候变化的研究不仅实现了水文、气象、生物、物理等多学科的交叉研究，而且更注重气候、陆面、人类活动等各方面的相互影响及反馈作用^[19]。此外，许多国外学者也积极开展相关研究工作，如 Krasorskia 评估了北大西洋及挪威几个地区的洪水频率及洪水流量对气候波动的响应^[12,22]；Smith 和 Changnon 分析了伊利诺斯州洪涝频率与气候条件的关系^[12,23,24]；Stanley 等运用统计分析方法，综合分析了美国伊利诺斯州若干流域在 1940~1990 年 50 年期间的气候波动和土地利用变化对河川径流和洪水的影响及各自的贡献大小^[12,25]。

20 世纪 90 年代初以来，我国诸多研究机构和学者也相继开展了气候变化对水文水资源影响研究工作，研究区域涉及全国各大流域和各大区域。1991~1995 年，国家“八五”科技攻关项目中开展了“气候变化对中国水文水资源影响及适应对策研究”专题研究^[26]；1996~2000 年，由水利部水文局和南京水利科学研究院组织并承担了国家“九五”科技攻关项目重中之重专题“气候异常对我国水资源及水分循环影响评估模型研究”^[27]；2001~2005 年，国家“十五”科技攻关项目开展了“气候变化对我国淡水资源的影响阈值及综合评价”专题研究^[28]。许多国内学者在这一领域取得了相关研究成果，如王顺德等研究了塔里木河流域近 40 年来气候、水文变化及其影响^[29]；叶佰生等通过水量平衡模型研究气候变化对降雪比较丰富的伊犁河上游天山山区河川径流的影响^[30]；邓慧平等系统综述了气候变化对水文和水资源的影响^[31]；沈大军、刘昌明从降水、蒸发、径流和土壤水分、供水、需

水及水资源管理等方面论述了水资源系统对气候变化的响应^[32];栗晓玲等应用秩次相关法检验分析了渭河流域气候要素的变化趋势,应用回归分析法定量研究了气候变化和人类活动对渭河入黄径流的影响^[33];等等。2006年年底,我国编制的第一部有关全球气候变化及其影响的国家评估报告《气候变化国家评估报告》在京发布。

总之,有关气候变化带来的水文水资源效应方面的研究成果,多是采用气候情景设计与水文模型模拟相结合的研究思路,来分析气候变化对河川径流、流域水量平衡和水资源量的影响^[12]。对于这方面的研究工作,政府间气候变化委员会曾作了系统总结。

1.2.4 存在问题

就目前有关气候变化的水文水资源效应方面的研究进展来看,尚存在以下不足和难点:

① 由于目前的研究手段多采用情景模拟法,即根据实际气象数据产生不同的情景,输入到流域水文模型中进行模拟,这样只能进行某些特定情景模式的分析研究,而不能进行气候变化的连续性分析。

② 目前的研究工作多是对短期或近期气候变化所带来的影响进行分析。由于气候变化是一个长期的过程,在短期范围内对气候变化进行分析,可能存在一定的局限性和偏差,不能很好地揭示整个长期气候变化过程的规律。

③ 对于各种情景的气候条件,只能通过现在的气候条件进行模拟分析和预测得到。其精度随着模拟预测方法的精度和模拟年限的增加而增加,即模拟的年数越多,越能体现出各种情景的气候状况。而在通常情况下,由于受到计算工具的局限性,只能模拟预测一定的年限范围,从而导致气候模拟预测误差较大。

④ 某些气候要素的变化过程不容易量化表达,只能从定性方面来进行分析研究,因此不能很精确地描述气候变化的水文水资源效应。

§ 1.3 土地利用/覆被变化的水文水资源效应研究综述

1.3.1 土地利用/覆被变化的内涵

土地利用是指人类为获取所需的产品或服务而进行的对土地的利用活动^[34],“是人类根据土地的特点,按一定的经济与社会目的,并采取一系列生物和技术手段,对土地进行的长期性或周期性的经营活动;它是一个把土地的自然生态系统变为人工生态系统的过程”(联合国粮农组织 FAO)。土地覆被是指“地球陆地表面和近地面层的自然状态,包括生物群落、土壤、地形、地表水、地下水及人文结构”,