

水 科 学 前 沿 丛 书

气候变化影响下的 流域水循环

徐宗学 刘 浏 刘兆飞 著



科学出版社

水科学前沿丛书

气候变化影响下的流域水循环

徐宗学 刘 浏 刘兆飞 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书旨在揭示气候变化对我国典型流域水循环过程的影响,预估未来气候变化情景下典型流域水循环过程的可能变化。内容共分为9章,第1章为绪论,主要介绍全球气候变化背景与国内外研究现状;第2章分析了全国降水及不同典型流域气象水文要素时空变化特征;第3章针对我国不同典型流域特点,对国际上多种全球气候模式进行了适应性评估;第4章至第7章着重介绍了基于陆-气耦合模拟的我国典型流域水循环对气候变化的响应;第8章以黄河上游流域、渭河流域和黑河流域为例,定量评估了气候变异和人类活动对径流的影响;第9章针对气候变化影响评估中水文模型和降尺度方法的不确定性问题进行了初步探讨。

本专著既可以作为了解气候变化影响研究的入门材料,也是一本很好的工具书和参考书,可以作为气候变化科学、水文学及水资源、资源科学、环境科学、生态科学等相关领域的专家、学者和研究生,以及高年级本科生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化影响下的流域水循环/徐宗学,刘浏,刘兆飞著. —北京:科学出版社, 2015. 6

(水科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-043674-0

I. ①气… II. ①徐…②刘…③刘… III. ①气候变化-气候影响-流域-水循环-研究 IV. ①P339

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 048527 号

责任编辑:朱海燕 万 峰 李 静/责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴/封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:29 1/4 插页:6

字数:694 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

顾 问 曹文宣 陈志恺 程国栋 傅伯杰
韩其为 康绍忠 雷志栋 林学钰
茆 智 孟 伟 王 超 王 浩
王光谦 薛禹群 张建云 张勇传

主 编 刘昌明

常务副主编 徐宗学

编 委 蔡崇法 常剑波 陈求稳 陈晓宏
陈永灿 程春田 方红卫 胡春宏
黄国和 黄介生 纪昌明 康跃虎
雷廷武 李怀恩 李义天 林 鹏
刘宝元 梅亚东 倪晋仁 牛翠娟
彭世彰 任立良 沈 冰 王忠静
吴吉春 吴建华 徐宗学 许唯临
杨金忠 郑春苗 周建中

《水科学前沿丛书》出版说明

随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化，实现人与自然和谐相处的压力与日俱增，水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响，与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国，水科学研究一直是基础研究计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力，我国在水科学研究方面取得了重大进展，并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展，迫切需要对过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此，科学出版社与北京师范大学共同发起，联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队，策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题，对相关研究成果加以凝练与集成，力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说，工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果，对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平，经得起同行和时间检验，组织了国内多位知名专家组成丛书编委会，他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物，对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信，通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作，会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世，为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用，为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。



2012年9月

• i •

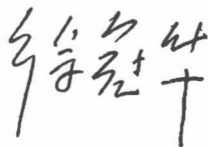
序 一

水循环作为地球表层系统“大气圈—水圈—岩石圈—生物圈”的纽带，对全球生态系统的格局和演变具有十分重要的影响，与人类生产生活息息相关。同时，水循环又是气候系统的重要组成部分，既受气候系统制约，又对气候系统产生反馈作用，是气候变化研究的重要环节和组成部分。当前，气候变化已成为全人类共同关注的焦点问题，它在改变人类赖以生存的生态环境的同时，也对经济社会发展产生了深刻的影响，如何应对气候变化，实现经济社会可持续发展，是当前人类社会面临的重大挑战。观测事实表明，气候变化已显著改变了流域水循环过程，并将深刻影响人类社会对水资源的开发、利用、规划和管理等诸多环节。因此，探讨气候变化影响下的流域水循环及其相关科学问题已成为全球共同关注和各国政府的重要议题。

我国水资源时空分布不均，洪涝、干旱以及与水相关的生态、环境等问题日益凸现，水问题已经成为制约我国经济社会可持续发展的重要因素。气候变化条件下，流域水循环系统将不可避免受到影响。未来全球气候变化可能改变降水的时空分布特征，造成极端气候事件，加强降水和干旱事件的发生频率产生变化，导致水资源短缺和洪涝灾害频发的局面更加严峻，对流域水资源可持续利用和管理产生重要影响。面对国家重大需求，应当树立面向全球的思维和视野，大力加强全球气候变化对水循环影响的研究工作。徐宗学教授等编著的《气候变化影响下的流域水循环》从科学角度出发，并落脚于实例分析，选取的典型流域体现了我国北方、南方、西北及青藏高原等流域的特点，较全面地分析了气候变化对我国流域水循环的影响，也反映了我国气候变化对流域水循环影响研究的前沿问题，启迪人们对气候变化影响下中国水循环与水资源问题进行更深入的思考和探索。

气候变化影响问题十分复杂，涉及多个学科。开展气候变化研究，除了需要加强地球科学内部各个学科之间的合作，更需要加强地球科学和其他自然科学、技术科学、社会科学的交流与合作，加强与国内外学术界的交流与合作。希望本专著的出版发行，能够为水科学工作者提供一种思路，广泛交流，加强合作。也希望水科学工作者放宽视野，加强与其他各国和国际组织间的合作与对话，分享气候变化影响及适应性对策研究的经验，提高我国在该研究领域的国际影响力，增强我国在全球气候变化特别是全球变暖减缓、适应措施等方面的话语权。

科技部原部长
中国科学院院士



2014年10月

序 二

全球气候变化已是不争的事实，政府间气候变化委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第五次评估报告指出，全球平均地表温度在过去近 130 多年（1880~2012 年）升高了 0.85°C ，过去的三个十年连续比之前自 1850 年以来的任何一个十年都偏暖，观测到的 1951~2010 年全球平均地表温度升高的一半以上极有可能是由人为温室气体浓度增加和其他人为强迫共同造成的。气候变化已被认为是威胁世界环境、人类健康和全球经济可持续性发展的最危险的因素之一。气候变化对自然系统和社会的影响巨大，其中一个重要的方面就是引起区域水循环和水资源的变化，这将会影响到人类生活的方方面面，包括防洪抗旱减灾、农业和工业生产、市政和居民生活用水等。

早在 20 世纪 70 年代，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）等国际组织发起并实施了全球大气研究计划（GARP）、世界气候研究计划（WCRP）、国际地圈生物圈计划（IGBP）和全球环境变化人文因素计划（IHDP）等一系列科学计划，从不同方面开始了对以气候变化为核心内容的全球变化的系统研究。80 年代，关于气候变化影响的研究受到世界各国的高度重视，为此成立了 IPCC，专门开展气候变化的科学评估和适应对策研究，并定期总结最新的科学成果，提供具有权威性的气候变化评估报告。随着气候变化对水循环影响的不断加剧，伴随着 IPCC 第五次评估报告的发布，全球气候变化影响下的水循环及其时空演化规律研究已成为 21 世纪水科学研究的热点领域。

对于正处于经济社会快速发展的中国而言，与水问题密切相关的人口急速增长、资源短缺和环境恶化带来的严重挑战，使得在我国开展气候变化对水循环影响的评估研究迫在眉睫。此外，一方面随着经济的快速增长，使得中国已成为世界温室气体的排放大国，温室气体的增加将在全球范围产生长远的深刻影响。中国人均可用水量仅为世界平均水平的 28% 左右，水资源短缺问题制约经济社会的发展。另一方面我国季风气候特征显著，加上特殊的地理条件和地形影响，我国降雨的时空分布极不均匀，洪涝干旱灾害频繁发生，损失严重。在全球变化的影响下，我国发生极端暴雨洪水和大范围干旱的极端事件呈现增加的趋势，北方河流的江河实测径流量总体上呈现减少的趋势，水资源约束进一步趋紧，生态环境进一步恶化。因此，开展气候变化对水循环的影响研究，具有重要理论价值和重大的实际意义。

20 世纪 70 年代，竺可桢、施雅风、叶笃正等老一辈科学家开创了我国的气候变化研究，根据国际上的发展趋势，再加上我国水资源问题的日益突出，我国自 80 年代起迅速开展了气候变化对我国水循环影响的专门研究。“七五”期间，启动“中国气候与海平面变化及其趋势和影响研究”重大项目；“八五”期间，组织科技攻关项目“气候变化对水文水资源的影响及适应对策研究”；“九五”作为重中之重国家科技攻关项目“我国短期气候预测系统”中，设立“气候异常对我国水资源及水分循环影响的评估模

型研究”专题；“十五”科技攻关重点项目“中国可持续发展信息共享系统的开发研究”中设立了“全球环境变化与可持续发展信息共享”专题，以及另一科技攻关专题“气候变化对我国淡水资源的阈值影响及综合评价”；“十一五”到“十二五”期间，国家更是启动多项气候变化重大、重点项目，尤其是科技部启动了“全球变化重大研究计划”。《中国气候与环境演变》《气候变化国家评估报告》《气候变化第二次国家评估报告》《气候变化对水文水资源影响研究》和《气候变化与中国水资源》等研究和评估报告对上述部分研究成果进行了系统总结。过去的研究增进了对我国水循环要素变化趋势及其对全球气候变暖响应机理的理解，揭示了当前和未来气候变化影响下我国陆地水循环响应和气候变化对水资源的影响，为国家有关部门应对气候变化影响提供了决策依据。但是，就气候变化对水循环影响研究来说，在许多方面还需要深入研究。针对在气候变化对水循环影响方面存在的薄弱环节开展研究，将使我国气候变化影响评估领域的研究迈上一个新的台阶。

徐宗学教授长期从事气候变化对水循环与水资源的影响研究，在水循环对气候变化的响应方面进行了一系列探索性的工作，并取得了丰富的研究成果。该书系统总结和凝练了近年来徐宗学教授及其团队在气候变化对流域水循环影响方面的研究成果，内容丰富，研究区域覆盖全国，相信该专著的出版将进一步推动我国气候变化影响的研究，也必将对我国水文水资源、环境、生态等相关领域的研究工作起到巨大的推动作用。



中国工程院院士

南京水利科学学院院长

水利部应对气候变化研究中心主任

2014年8月

前 言

观测资料表明,全球温度普遍升高是毋庸置疑的客观现实,海平面的逐渐上升与热膨胀,以及冰川、冰帽和极地冰盖的融化等也与气温上升的趋势完全一致。进入 21 世纪,全球气候变化已成为国内外广泛关注的重大问题。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指出,全球气候变暖已经是一个不争的事实,未来全球气候将持续变暖,这必将对自然生态系统和社会经济系统产生巨大影响。由于我国特殊的自然地理环境,水旱灾害历来是我国经济社会发展面临的重大制约性因素之一,气候变化带来的各种负面影响尤其是自然灾害的严峻挑战是 21 世纪我国经济社会发展必须面对的重大挑战。作为基础性的自然资源和战略性的经济资源,我国水资源可持续利用中存在的洪涝干旱灾害、水资源不足和水环境恶化三大问题,究其产生的自然原因,无一不与气候变化密切相关。气候变化对水循环的影响研究有两方面意义:从科学上认识大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈及生物圈间的相互作用机理,以提高气候变化的预测精度,从实践上回答它们对洪水、干旱的频次及强度的影响,以及对水量和水质的可能影响,为水资源管理和决策提供科学依据。

评估气候变化对流域水循环的影响,主要包括三方面内容:一是未来气候变化情景构建;二是水文模型率定与验证;三是在此基础上将气候变化情景输入水文模型,模拟流域水循环过程,评价气候变化对流域水循环的影响。生成未来气候变化情景的方法包括假设情景、时间类比法、空间类比法和基于 GCM 输出等四种基本方法。当前,随着计算机技术和数值模拟技术的飞速发展,基于三维数值模拟的大气环流模式(GCMs)已经成为研究气候变化及构建未来气候变化情景最主要的工具。然而,构建未来气候变化情景过程中存在诸多的不确定性,尤其是在流域尺度气候变化情景的构建过程中,不同 GCMs 输出的不确定性在气候变化预估中占主导地位,为减小气候变化情景的不确定性,需要通过客观评价不同 GCMs 在流域尺度的模拟效果,以便选择更为合适的 GCM。本书在内容安排上,首先利用非参数检验方法分析我国典型流域水文气候要素长期变化趋势,即在回答未来“怎么变”之前,首先回答“过去怎么变”的问题。然后系统评估常用气候模式在不同流域的适用性,并选择表现较好的若干个气候模式应用于统计降尺度模型,生成相关流域未来多种组合情景下的气温和降水序列,将生成的时间序列驱动水文模型,模拟不同典型流域未来主要水循环要素,分析气候变化对我国不同流域主要水循环过程的影响。除了上述气候变化情景构建中的不确定性,水文模型的不确定性和降尺度技术的不确定性也不容忽视,因此,第 9 章主要针对水文模型的不确定性和降尺度技术的不确定性问题进行了比较深入的分析。

本书主要作者徐宗学从事气候变化对水循环影响的有关研究工作,始于 2000 年年初到日本山梨大学任教不久。有一天,在与时任联合国教科文组织(UNESCO)国际水文计划(IHP)主席竹内邦良教授讨论降水量、气温的长期变化趋势时,竹内邦良教

授建议从理论上探讨一下趋势检测所需要的最小水文序列长度。于是,作者基于非参数统计方法,并结合理论推导和数值计算,得到了初步结果,相关成果发表于 *Journal of Hydrology* 杂志。此后,作者进一步结合 IHP 相关工作,先后分析了日本、中国与整个东南亚降水量的长期变化趋势及其与 ENSO 的相互关系,在 *Hydrological Processes* 等杂志上发表了一系列学术论文。2003 年回国到北京师范大学任教以后,结合科研和教学工作,关于气候变化对水循环的影响相关研究工作,内容不断深化,范围不断拓宽,先后获得相关科研项目十余项,培养博士后、博士和硕士研究生十余名。从教育部留学回国人员科研启动基金、北京市自然科学基金、国家自然科学基金、中国科学院创新工程重要方向项目和中国气象局气候变化专项,到国家“十五”科技攻关课题、“十一五”科技支撑课题、中央高校基本科研业务费专项基金重大项目,尤其是与中国水利水电科学研究院程晓陶副总工程师等共同申报的科技部国际合作重大项目“流域洪水风险情景分析技术研究”、与北京师范大学段青云教授共同承担的国家重点基础研究发展计划“973”课题“气候变化背景下未来水文情景预估及不确定性研究”,与北京大学杨小柳教授共同申请的欧盟-中国流域综合管理计划研究项目“Yellow River Climate Change Scenario Development-Phase 2: Detailed Analysis, Adaptation Strategies and Integration Phase”等相关科研项目,有力地支撑了本人所在的科研团队近十年的相关研究工作。依托这些科研项目,培养的博士研究生包括黄俊雄、刘兆飞、刘浏、李发鹏、刘品等,硕士研究生包括赵芳芳、张玲、孟翠玲、蔡锡填、吴宇丹、王洁、甄婷婷、李林涛、蒋昕昊、刘文丰、于群伟,以及博士后李秀萍等,本专著即是在上述科研项目的研究报告和众多博士、硕士论文与博士后出站报告的基础上凝练而成的。尤其是依托太湖流域相关科研项目完成其博士论文的刘浏博士和依托塔里木河流域相关科研项目完成其博士论文的刘兆飞博士,皆先后发表十几篇高水平的学术论文,也是本人所培养的优秀博士研究生的杰出代表,现分别就职于中国农业大学与中国科学院地理科学与资源研究所,两位刘博士协助作者完成了本专著的编写工作。本专著试图从大气环流与大气水循环之间相互关系的角度揭示气候变化影响流域水循环关键过程的机理,辨识影响水循环关键过程的指标性因子,对流域水循环关键过程及要素的时空分布及其变化过程进行定量分析和诊断,预估未来气候变化情景下流域水循环关键过程的可能变化及其不确定性,为进一步开展气候变化背景下流域水资源变化情势和水资源安全评估提供科学依据。全书共分 9 章,第 1 章绪论,主要对全球气候变化相关的基本问题进行介绍,并简要分析国内外气候变化研究的动态和现状;第 2 章分析了全国降水及各典型流域气候、水文要素时空变化特征;第 3 章针对我国不同典型流域特点,对目前世界上不同全球气候模式进行了适应性评估;第 4 章至第 7 章着重介绍了基于气候模式和水文模型耦合的我国典型流域水循环对气候变化的响应;第 8 章以黄河上游流域、渭河流域和黑河流域为例,定量评价了气候变异和人类活动对流域径流量变化的影响;第 9 章重点分析了气候变化影响评估中水文模型和降尺度模型的不确定性。

本专著由北京师范大学徐宗学教授设计并定稿,中国农业大学刘浏博士和中国科学院地理科学与资源研究所刘兆飞副研究员协助编写,刘浏博士协助全书的统稿。在本专著的编写过程中,徐宗学教授的博士和硕士研究生包括李发鹏、刘品、刘文丰、于松延等先后帮助搜集素材和整理文稿,尤其是刘文丰同学为本书的统稿做了大量的基础性工

作。此外，借此机会向为本书的编辑出版付出辛勤劳动的各位编辑和同学表示衷心的感谢！特别需要感谢的是徐冠华院士和张建云院士，一位是德高望重的前辈，一位是当前水利界气候变化研究的学术带头人，两位专家欣然为本专著作序。尤其是科技部原部长徐冠华院士，为我国气候变化研究做出了重大贡献。作者在北京师范大学、北京大学、清华大学等共同主办的“全球变化研究协同创新中心”学术研讨会上见到徐院士，向徐院士当面汇报本专著相关事宜，并恳请徐院士为本书作序，徐院士欣然应允，对作者是极大的鼓舞，对研究气候变化的中青年科研人员也无疑是极大地鼓舞和鞭策。作者希望将此专著作为成立不久的“全球变化研究协同创新中心”的成果之一，为该中心的成长和发展贡献自己力所能及的力量。

气候变化是目前和未来人类社会发展面临的共同问题，是跨学科的极其复杂的科学问题，既包含气候的自然变异，又包括人类活动造成的环境变化，了解自然变化和人类活动的影响是国际地球科学发展最为关键的问题，需要进一步深入研究。限于作者水平，书中不妥之处难免，敬请广大读者和同行专家给予批评指正，以利于本书今后进一步修改与完善。

作 者

2014 年 8 月于北京

目 录

《水科学前沿丛书》出版说明

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 全球气候变化	1
1.2 气候变化的定义	2
1.2.1 天气、气候	2
1.2.2 气候变化	3
1.3 气候变化影响研究方法	3
1.3.1 社会经济情景的构建及应用	4
1.3.2 气候变化情景的构建及应用	4
1.3.3 气候变化影响评估中的不确定性	5
1.4 国内外气候变化研究成果综述	7
1.5 本章小结	10
参考文献	10
第 2 章 气候变化趋势分析与检验	14
2.1 趋势检验方法	14
2.1.1 Mann-Kendall 非参数统计检验方法	14
2.1.2 非参数 Sen's 方法	15
2.2 Hurst 指数法	15
2.3 非参数突变检验	16
2.3.1 Mann-Kendall 法	16
2.3.2 Pettitt 法	17
2.4 中国降水特征分析	18
2.4.1 中国降水趋势分析	18
2.4.2 中国降水受 ENSO 的影响分析	20
2.5 塔里木河流域气候要素趋势分析	24
2.5.1 数据	24
2.5.2 水文气象要素变化趋势分析	24
2.5.3 降水量变化趋势分析	27
2.5.4 流量变化趋势分析	30
2.6 雅鲁藏布江流域气候要素趋势分析	32

2.6.1 数据 32

2.6.2 历史降水与气温变化趋势..... 33

2.6.3 未来降水与气温变化趋势..... 43

2.6.4 径流变化趋势 43

2.7 黄河流域气候要素趋势分析..... 46

2.7.1 数据 46

2.7.2 气温结果分析 46

2.7.3 降水分析..... 50

2.7.4 蒸发皿蒸发量分析 55

2.8 太湖流域气候要素分析..... 61

2.8.1 数据 61

2.8.2 研究区气候变化趋势分析..... 62

2.8.3 气候要素未来变化趋势分析 70

2.8.4 研究区气候突变分析 71

2.9 本章小结..... 74

2.9.1 中国降水变化 74

2.9.2 塔里木河流域水文气候要素变化 75

2.9.3 雅鲁藏布江流域水文气候要素变化 75

2.9.4 黄河流域水文气候要素变化 76

参考文献 76

第3章 大气环流模式 (GCM) 评估 80

3.1 评估方法与数据来源..... 80

3.1.1 评估方法..... 80

3.1.2 数据 81

3.2 中国东部季风区..... 82

3.2.1 综合评估结果 82

3.2.2 平均气温变化模拟 85

3.2.3 最高气温变化模拟 86

3.2.4 最低气温变化模拟 87

3.2.5 降水量变化模拟 88

3.2.6 环流场评估 89

3.3 松花江流域..... 92

3.3.1 高空气象变量评估结果 92

3.3.2 地面气候要素评估结果 96

3.3.3 综合评估结果 97

3.4 海河流域..... 98

3.4.1 高空气象变量评估结果 98

3.4.2 地面气候要素评估结果 99

3.4.3 综合评估结果 103

3.5	黄河流域	104
3.5.1	高空气象变量评估结果	104
3.5.2	地面气候要素评估结果	111
3.5.3	综合评估结果	114
3.6	淮河流域	115
3.6.1	高空气象变量评估结果	115
3.6.2	地面气候要素评估结果	116
3.6.3	综合评估结果	124
3.7	长江流域	124
3.7.1	月平均相对湿度	124
3.7.2	月平均气温	126
3.7.3	纬向风速及经向风速	127
3.7.4	位势高度	128
3.7.5	综合评价结果	129
3.8	珠江流域	130
3.8.1	高空气象变量评估结果	130
3.8.2	地面气候要素评估结果	133
3.8.3	综合评估结果	134
3.9	雅鲁藏布江流域	135
3.9.1	地面要素评估结果	135
3.9.2	高空要素评估结果	138
3.9.3	综合评估结果	139
3.10	本章小结	140
	参考文献	141
第4章	气候变化对塔里木河流域干旱的影响	143
4.1	塔里木河流域概况	143
4.1.1	塔里木河流域简介	143
4.1.2	塔里木河流域自然环境特征	143
4.2	VIC 模型构建	145
4.2.1	模型设置	145
4.2.2	模型输入	147
4.2.3	参数敏感性分析	150
4.2.4	模型率定与验证	154
4.3	未来气候情景构建	161
4.3.1	统计降尺度模型的应用	161
4.3.2	源区未来气候变化情景分析	166
4.4	流域蒸散发对气候变化的响应	174
4.5	气候变化对塔里木河流域源区干旱的影响	178
4.5.1	气候变化对源流区气象干旱的影响	178

4.5.2 未来气候变化对源流区水文干旱的影响	185
4.6 本章小结	190
参考文献	192
第5章 气候变化对雅鲁藏布江流域水循环的影响	193
5.1 研究区概况	193
5.1.1 雅鲁藏布江流域概况	193
5.1.2 拉萨河流域概况	195
5.2 水文模型	195
5.2.1 SIMHYD 模型	195
5.2.2 GR4J 模型	197
5.2.3 模型参数优化方法	200
5.3 模型构建	201
5.3.1 子流域及驱动数据	201
5.3.2 模型设定及区域化方法	203
5.3.3 模型率定与验证结果	205
5.3.4 区域化结果及讨论	208
5.4 气候变化对雅鲁藏布江流域水循环的影响	216
5.4.1 未来气候情景构建	216
5.4.2 水文模型参数的设定	218
5.4.3 结果分析与讨论	219
5.4.4 未来降水变化	224
5.5 气候变化对拉萨河流域水循环的影响	232
5.5.1 VIC 模型构建	232
5.5.2 GCMs 降尺度数据适用性验证	238
5.5.3 未来气候变化情景	239
5.5.4 主要水文要素对气候变化的响应	242
5.6 本章小结	247
参考文献	249
第6章 气候变化对黄河流域水循环的影响	253
6.1 研究区概况	253
6.2 黄河典型流域模型构建	254
6.2.1 SWAT 模型简介	254
6.2.2 SWAT 模型在黄河上游流域的应用	255
6.2.3 SWAT 模型在渭河流域的应用	260
6.2.4 SWAT 模型在伊洛河流域的应用	269
6.3 未来情景构建	274
6.3.1 SDSM 模型简介	274
6.3.2 SDSM 模型设置	275
6.3.3 数据	277

6.3.4 统计降尺度结果及分析	278
6.4 气候变化对黄河典型流域水循环的影响	302
6.4.1 径流量对未来气候变化的响应	302
6.4.2 未来气候变化条件下径流量的空间分布	309
6.5 本章小结	328
参考文献	330
第7章 气候变化对太湖流域径流及洪水的影响	331
7.1 太湖流域简介	331
7.2 未来气候变化情景构建	332
7.2.1 区域气候模式 PRECIS	334
7.2.2 统计降尺度模型 SDSM	334
7.2.3 PRECIS 模拟验证	334
7.2.4 PRECIS 生成的气候变化情景	336
7.2.5 SDSM 模型率定及验证	338
7.2.6 SDSM 生成的气候变化情景	339
7.2.7 PRECIS 和 SDSM 比较分析	340
7.3 流域径流对气候变化的响应	342
7.3.1 VIC 模型参数库构建	342
7.3.2 模型参数率定及验证	342
7.3.3 PRECIS 情景下的径流响应	346
7.3.4 SDSM 情景下的径流响应	349
7.4 水文-水力学耦合模型构建	351
7.4.1 上游山区产汇流模拟	351
7.4.2 平原区水动力学模拟	354
7.4.3 未来太湖洪水位变化	357
7.5 洪水风险计算方案	359
7.5.1 洪水淹没深度分布模拟方案	360
7.5.2 经济分类和计算	361
7.5.3 场次洪灾损失估计	362
7.5.4 基于事件的洪水风险计算	362
7.5.5 情景方案设计	363
7.6 气候变化及人类活动影响下的流域洪水风险	364
7.6.1 社会经济与降水变化组合情景	364
7.6.2 社会经济、降水变化与海平面上升组合情景	364
7.6.3 降水增加 5%与海平面上升组合情景	365
7.6.4 多因子组合影响	366
7.7 本章小结	367
参考文献	367
第8章 气候变化和人类活动影响甄别	369

8.1 方法介绍 369

8.1.1 敏感性系数法 369

8.1.2 动力水量平衡模型 369

8.2 气候变化和人类活动对黄河流域径流影响 372

8.2.1 黄河上游流域 372

8.2.2 渭河流域气候变化和人类活动影响的甄别 381

8.2.3 气候变化和人类活动对黑河流域径流的影响 387

8.3 本章小结 390

参考文献..... 391

第9章 气候变化影响评估中的不确定性..... 393

9.1 水文模型的不确定性分析 393

9.1.1 WASMOD模型和SWAT模型简介 393

9.1.2 WASMOD模型径流模拟 395

9.1.3 WASMOD模型不确定性分析 396

9.1.4 SWAT模型径流模拟 398

9.1.5 SWAT模型不确定性分析 399

9.2 降尺度模型应用及其不确定性分析 402

9.2.1 常用的统计降尺度方法 402

9.2.2 东江流域概况 404

9.2.3 基于人工神经网络的统计降尺度方法 405

9.2.4 SDSM模型 409

9.2.5 ASD模型 411

9.2.6 NCC/GU-WG天气发生器 414

9.3 本章小结 418

参考文献..... 419

附图..... 424

附表..... 443

彩图