



气候变化对水文过程的影响评估及其不确定性

许月萍 田 烨 张徐杰 高希超 马 冲 著



科学出版社

气候变化对水文过程的影响评估 及其不确定性

许月萍 田 烨 张徐杰 高希超 马 冲 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以中国东部钱塘江流域为研究区域,全面系统地介绍气候变化对水文过程的影响评估及不确定性分析方法,运用统计学、水文学和气象学等多学科知识,揭示钱塘江流域过去几十年的气候变化和水资源变化规律,并结合未来气候变化情景,分析评估气候变化对钱塘江流域水文过程的可能影响,深入探讨气候变化下流域极端水文事件发生的概率和强度变化。本书形成的基本理论、方法和技术可为水文与水资源领域内其他类似研究提供一定的参考,也可为区域应对气候变化、水资源有效管理和防灾减灾提供技术支持。

本书可供水利工程、气象、农业和生态等相关领域的研究人员、高等院校教师、研究生以及相关的工程技术人员和政府机构参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对水文过程的影响评估及其不确定性/许月萍等著. —北京:科学出版社,2015.1

ISBN 978-7-03-043093-9

I. ①气… II. ①许… III. ①气候变化-影响-陆面过程-研究 IV. ①P333

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016039 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:李 影

责任印制:张 倩 / 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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:220 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

气候变化是当今国际社会普遍关注的全球性问题之一。全球气候变化导致的气温升高、海平面上升以及极端事件频发等,不仅影响自然生态系统和人类生存环境,同时也影响世界的经济发展和社会进步。中国气候变化的趋势和全球气候变化的总体趋势基本一致,气候变化已经对中国产生了巨大的影响,造成了沿海海平面上升、春季物候期提前、冰川面积减少、主要江河径流量下降和极端气象事件的频发。开展气候变化下流域水文循环尤其是极端水文事件的演变机理和规律研究,解决目前气候变化影响评估中存在的一些基础性问题,可为区域和流域应对气候变化提供重要的技术支持,对变化环境下水资源的高效利用和管理、区域防灾减灾和风险管理等有着十分重要的意义。

在科技部国际合作项目“中荷李生流域气候变化对极限径流影响评估的不确定性研究”(项目编号:2010DFA24320)、国家自然科学基金青年项目“水文极限分析不确定性及对洪水风险评估的影响”(项目编号:50809058)和国家自然科学基金面上项目“基于 NUSAP 的区域频率计算不确定性评价研究”(项目编号:51379183)等项目的支持下,本书系统阐述了气候变化对水文过程的影响评估及不确定性分析方法,运用统计学、水文学、气象学等多学科知识,阐明钱塘江流域过去和未来气候变化对水文过程的影响,探讨气候变化下极端水文事件发生的概率和强度变化,本书形成的理论和方法可为其他类似研究提供一定的参考,也可作为区域水资源管理提供技术支持。

全书共 9 章,第 1 章为引言,主要介绍研究背景和意义、国内外研究现状以及研究目标和内容;第 2 章主要介绍气候变化对水文过程进行影响评估的主要方法,包括气候变化情景、全球气候模式、降尺度方法等,以及不确定性分析的主要方法包括马尔可夫链蒙特卡罗法、广义似然不确定性估计方法等;第 3 章简要介绍钱塘江流域过去几十年的气候变化和水资源变化情况;第 4 章主要介绍基于 DHSVM 评估钱塘江支流金华江流域未来水资源的变化规律;第 5、6 章主要以集总式水文模型为分析工具,探讨了水文模型结构、水文模型参数以及气候变化情景等不确定性对钱塘江流域极限径流模拟和预测的影响;第 7 章介绍基于分布式水文模型 SWAT 的钱塘江支流兰江流域的极限径流模拟,以及 SWAT 模型参数、气候变化情景和极值模型等不确定性对极限径流预测的影响;第 8 章侧重介绍应用 IPCC 第五次气候变化预估报告中的气候变化情景和全球气候模式对金华江流域进行未来水资源的评估情况;第 9 章总结了本书的主要研究结论,并对未

来的研究工作提出了展望。

本书的主体内容来源于课题组师生多年合作研究的主要成果(包括研究报告和毕业论文),部分研究成果已经在国内外期刊上发表,书稿的撰写和审核工作也由师生共同完成,在此一并表示衷心的感谢。

由于水文过程本身的复杂性以及气候变化预测的诸多不确定性,同时作者的水平有限,书中若有不足之处,敬请读者批评指正。

许月萍

2014年9月于杭州

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 气候变化影响评估的研究现状	2
1.2.2 气候变化对水文过程的影响评估研究现状	3
1.2.3 气候变化对水文过程影响评估中的不确定性研究现状	4
1.2.4 气候变化对水文极端事件的影响评估研究现状	5
1.3 研究目标和内容	6
1.3.1 研究目标	6
1.3.2 研究内容	6
第 2 章 气候变化对水文过程的影响评估及其不确定性分析方法	7
2.1 气候变化对水文过程的影响评估方法	7
2.1.1 气候变化情景	7
2.1.2 全球气候模式	10
2.1.3 降尺度方法	11
2.1.4 气候变化影响评估模型	13
2.2 气候变化影响评估中的不确定性	14
2.2.1 不确定性来源和分类	14
2.2.2 不确定性分析方法	16
2.2.3 气候变化影响评估中的不确定性研究	19
2.3 本章小结	21
第 3 章 钱塘江流域降雨径流历史趋势分析	23
3.1 流域概况和数据	23
3.1.1 钱塘江流域概况	23
3.1.2 水文气象数据概况	24
3.2 研究方法	24
3.2.1 趋势检测方法	24
3.2.2 变异点检测方法	25
3.2.3 气候变化及人类活动对水资源影响的定量区分方法	26

3.3	研究结果	28
3.3.1	年均降雨径流趋势分析	28
3.3.2	年最大日径流量及年连续七天最小径流量趋势分析	31
3.3.3	年均径流量变异点分析	34
3.3.4	定量区分气候变化和人类活动对径流量的影响	35
3.4	本章小结	37
第4章	基于 DHSVM 的金华江流域未来水资源评估	39
4.1	流域概况和数据	39
4.1.1	流域概况	39
4.1.2	研究数据	39
4.2	主要研究方法	41
4.2.1	区域气候模式	41
4.2.2	偏差纠正方法	42
4.2.3	DHSVM	44
4.3	研究结果	52
4.3.1	偏差纠正结果	52
4.3.2	水文模型建立及率定验证	58
4.3.3	气候变化对金华江流域水资源的可能影响	61
4.4	本章小结	66
第5章	水文模型结构和参数对极限径流模拟的不确定性	68
5.1	流域概况和数据	68
5.2	主要研究方法	68
5.2.1	水文模型结构	68
5.2.2	水文模型参数优化	75
5.3	研究结果	77
5.3.1	水文模型参数率定和验证结果	77
5.3.2	模型参数不确定性对极限径流的影响	79
5.3.3	模型结构不确定性对极限径流的影响	83
5.4	本章小结	84
第6章	气候变化对极限径流模拟的影响及其不确定性	86
6.1	研究数据	86
6.2	研究方法	87
6.2.1	气候变化情景模式的不确定性	87
6.2.2	区域气候模式 PRECIS	88
6.2.3	偏差纠正方法	89

6.3 研究结果	90
6.3.1 偏差纠正结果	90
6.3.2 气候变化下的极限径流模拟	93
6.4 本章小结	102
第7章 气候变化下基于 SWAT 模型的极限径流模拟及其不确定性分析 ...	104
7.1 研究区域和数据	104
7.2 研究方法	106
7.2.1 排放情景和降尺度方法	107
7.2.2 SWAT 模型率定和验证	108
7.2.3 不确定性分析方法	112
7.3 研究结果	114
7.3.1 SWAT 模型率定和验证结果	114
7.3.2 PRECIS 模式评估	118
7.3.3 兰江流域未来径流量分析	121
7.3.4 未来极限径流分析	123
7.3.5 SWAT 模型参数不确定性分析	129
7.3.6 未来极限径流综合不确定性分析	135
7.4 本章小结	138
第8章 IPCC 第五次气候变化预估报告下金华江流域的未来水资源预估	140
8.1 研究方法	140
8.1.1 IPCC 第五次气候变化预估报告中的气候变化情景和大气环流模式	140
8.1.2 天气发生器	141
8.2 研究结果	143
8.2.1 金华江流域未来期温度的变化	143
8.2.2 金华江流域未来期降雨量的变化	144
8.2.3 金华江流域未来期蒸发量的变化	144
8.2.4 金华江流域未来期径流量的变化	146
8.3 本章小结	147
第9章 结论与展望	149
9.1 结论	149
9.2 问题和展望	150
参考文献	152

第 1 章 引 言

1.1 研究背景和意义

气候变化是当今国际社会普遍关注的全球性问题之一。全球气候变化导致的气温升高、海平面上升以及极端天气事件频发等,不仅影响自然生态系统和人类生存环境,同时也影响世界经济发展和社会进步。联合国政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的第四次气候变化预估报告中指出,近百年来地球表面气温上升了 $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$, 全球呈现出以变暖为主要特征的变化。

20 世纪中国气候变化趋势和全球变化的总体趋势基本一致。气候变化已经对中国产生了一定的影响,造成了沿海海平面上升、西北冰川面积减少、春季物候期提前和极端气象事件的增加等。以中国六大江河的重点控制水文站近 50 年的实测径流量资料对径流量变化趋势的研究结果表明,20 世纪 50 年代以来中国六大主要江河的径流量均呈现下降趋势(张建云等,2007)。受全球变暖影响,水汽蒸发率增加,气候变化导致水资源时空分布变化加剧,以及上游地区水利工程、调水工程日益增多,使得下游的来水量减少,加剧了下游地区的供水矛盾。同时,中国的极端水文事件如洪涝和干旱灾害频繁发生,特别是 1990 年以后,长江和珠江等河流连续发生多次大洪水,如 1998 年和 2010 年长江大洪水。据估计,北方地区在未来 50~100 年部分省份平均径流量将减少 2%~10%,南方地区平均增幅却达到 20%(水利部水文局,2003)。气候变化并没有缓解人口和社会经济造成的水资源短缺形势,相反,还将可能进一步加剧我国南涝北旱的状况。

目前,由于气候变化对降雨量、蒸发量、径流量和区域/流域水文过程影响的复杂性和不确定性,使得气候变化下区域/流域的水文循环演变机理和演变规律及其不确定性量化,成为地球科学系统科学中的重大科学问题,同时也是水文水资源学科的重点关注领域(王浩等,2010),是区域/流域水资源安全评估、水资源可持续管理和风险管理、水利工程运行管理等重大需求的应用基础问题。

因此,开展气候变化下流域水文循环尤其是极端水文事件的演变机理和规律研究,解决目前气候变化影响评估中存在的一些基础性问题,能为国家、地区乃至流域应对气候变化提供重要的技术支持,对变化环境下水资源的高效利用和管理、区域防灾救灾和风险管理等有着十分重要的意义。这部分内容属于《国家中

长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》面向国家重大战略需求的基础研究,以及《国家“十二五”科学和技术发展规划》的重要内容之一。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 气候变化影响评估的研究现状

全球气候变暖已经造成了海平面的上升、冰川面积的减少、水资源的短缺和极端气象事件的增加,为更好地应对气候变化,需要评估气候变化对全球以及区域工业、农业、林业以及水资源的可能影响。

气候变化的影响评估目前主要通过全球气候模式(global circulation model, GCMs)来进行。尽管 GCMs 的不确定性较大,GCMs 依旧是评估大气驱动功能变化对气候系统响应的最可靠和稳健的手段(Murphy et al., 2004)。联合国政府间气候变化委员会 2007 年的第四次科学评估报告和 1990 年以来的前三次科学评估报告先后评估了世界各国几十个 GCMs。对全球和区域气候模拟的可靠性研究表明,20 世纪 90 年代的 GCMs 模式对全球气候的模拟具有较好的可靠性,对区域气候的模拟虽在有些区域有些季节具有较好的模拟效果,但仍存在较大的不确定性。许崇海等(2007)利用 CRU(climate research unit)地面温度和降雨量的陆地月平均观测资料以及参与 IPCC 第四次气候变化预估报告的 22 个 GCMs 的模拟结果,分析了不同模式对东亚地区当前气候的模拟能力,结果表明,虽然所有模式对东亚地区的气候都有一定的模拟能力,但各模式模拟效果差异较大,多数模式的温度模拟值偏低,降雨量模拟值偏高。由此可见,目前的 GCMs 在模拟区域气候上虽然具有一定的模拟能力,但尚存在较大的不确定性。

由于 GCMs 的尺度通常比较大,一般为几百公里,而气候变化影响评估通常在区域/流域尺度上进行,因此双方存在着尺度不匹配问题。为解决此问题,通常应用降尺度方法来把 GCMs 的结果降解到区域/流域尺度上来,以准确地模拟出区域/流域气候的具体特点,并较为准确地模拟逐日和小时的变化。降尺度方法主要包括动力降尺度和统计降尺度方法(Christensen et al., 2007),其中动力降尺度方法建立在不同尺度气候的物理联系上,包括通过区域气候模式 RCMs(regional climate models)来进行动力降解。国内外有不少 RCMs,比较成熟且在国内应用较多的两大区域气候模式为 RegCM3(regional climate models version 3)和 PRECIS(providing regional climate impacts studies)。RegCM3 是意大利国际理论物理中心在 RegCM2(regional climate models version 2)基础上于 2004 年发布的区域气候模式,对模式的部分物理参数化过程进行了改进和完善,有较不错的模拟效果(石英等,2010)。除了 RegCM3,英国哈德利气候预测与研究中心的

PRECIS 也是一个比较成熟的模式(熊伟等,2005;Xu et al.,2014a,2014b)。

除了动力降尺度方法,统计降尺度方法是解决尺度不匹配的另外一种手段。统计降尺度方法通过在大尺度气象变量和小尺度观测天气数据之间建立经验关系来对 GCMs 的模拟结果进行降解。统计降尺度方法种类繁多,包括神经网络、支持向量机、多元线性回归和天气发生器等,可以把大空间尺度的气候模式结果降解到区域/流域尺度(Xu,1999;丛振涛等,2010;Xu et al.,2012;2013)。黄俊雄等(2008)应用 SDSM,一种以天气发生器和多元回归为基础的降尺度方法,分析了太湖流域的未来气温变化情况,发现在 A2、B2 情景下,太湖流域未来日最高和最低气温变化情景表现出明显的上升趋势。降尺度方法众多,如何选择合适的方法是减小气候变化预测不确定性的重要步骤之一。

1.2.2 气候变化对水文过程的影响评估研究现状

气候变化对水循环各因素包括降雨、气温、蒸发、土壤含水量、径流和地下水都会产生一定的影响。诸多研究考察了气候变化对水循环的影响,如刘吉峰等(2008)考察了借助于 ECHAM5(fifth-generation atmospheric general circulation model)输出信息和流域最近 40 年的气象观测资料,建立了青海湖流域统计降尺度模型,从而得到流域尺度未来 20 年(2010~2030)气候变化情景,并由此驱动分布式水文模型 SWAT(soil and water assessment tool)模型和湖泊水量平衡模型模拟了青海湖近几十年水位变化过程,预估了未来 30 年青海湖湖泊水文变化情景。张利平等(2010)根据联合国政府间气候变化专业委员会第四次评估报告中大气环流模型多模式输出结果,发现与基准期相比,南水北调中线工程水源区 21 世纪气温将持续增高,年降雨量将增加,径流量较基准期将出现先减少后增大的趋势,21 世纪 40 年代年径流量开始较基准期增加,预示着水源区的水资源在 21 世纪前期将出现减少,21 世纪中后期将增加。张建云等(2009)采用设定情景与水文模拟相结合的途径,评估了黄河中游不同区间河川径流量对气候变化的响应。上述研究结果表明,气候变化对水循环的各个因素有着较大的影响,从而影响全球乃至区域的水资源、水环境和水生态。

在气候变化对水资源的影响评估中,降尺度方法的作用不可忽视。在动力降尺度应用方面,袁飞等(2005)耦合了可变下渗能力模型 VIC(variable infiltration capacity)模型与区域气候模式 PRECIS,对气候变化情景下海河流域水资源的变化趋势进行了预测。刘浏等(2010)耦合了 VIC 与 PRECIS 对气候变化下的太湖流域径流量变化趋势进行了预测,结果表明,2021~2050 年太湖流域径流量对气候变化的响应较明显,A2 和 B2 情景下径流量较基准期都增加,尤其是在汛期径流量增加显著,并且径流量的时空变化特征与降雨量的变化特征具有较好的一致性,预示太湖流域未来发生洪水的可能性将增大,将增加未来防洪工作

的难度和强度。在统计降尺度应用方面,郭靖等(2010)应用人工神经网络方法分析了汉江流域未来降雨量的可能变化,发现汉江上游未来降雨量在 2020s 和 2050s 比基准年减少,2080s 则比基准年增加;中游未来降雨量在 2020s 比基准年减少,2050s 和 2080s 比基准年增加;下游未来降雨量变化趋势不明显。许月萍等(Xu et al., 2012)应用 LARS-WG 统计降尺度方法分析了钱塘江流域未来设计暴雨的变化趋势,发现钱塘江流域设计暴雨在不同 GCMs 和排放情景下有不同的变化规律,但绝大部分呈现增加状态。传统的降尺度方法不易提供可靠的极端事件(Xu, 1999),此时,具有非线性特性且自我学习处理能力的类神经网络方法被广泛应用于水文信息系统、降雨径流推估、重金属污染推估等(Chang et al., 2005, 2007, 2010; Chen and Chang, 2009)与 GCMs 降尺度的输出(von Storch et al., 2000; Schoof and Pryor, 2001)。

1.2.3 气候变化对水文过程影响评估中的不确定性研究现状

气候变化对水文过程的影响评估受到多种不确定因素的影响(Deutschbein et al., 2011; Tian et al., 2014),这些不确定性因素包括:①未来的温室气体排放情景;②气候模式的结构及参数化;③降尺度方法;④气候变化影响评估模型如水文模型及其参数化。对气候变化预测本身的重要性及其不确定性,Science 和 Nature 都发表过专文对此进行探讨,如 Forest 等(2005)、Stanforth 等(2005)和 Wentz 等(2007)。Xu 等(2013)研究了在 A1B、A2 和 B1 排放情景下,气候变化对钱塘江流域上游降雨量、潜蒸发量和径流量的影响,指出了钱塘江流域未来水灾害的可能增加和评估分析中存在的确定性。未来的温室气体排放情景和不同 GCMs 的输出结果不确定性非常大,即便同样的 GCMs 在不同温室气体排放情景下的结果也不同。对温室气体排放情景和气候模式不确定性的评估文献众多,评估手段主要是通过多模式集合和可能性理论等,如 Mujumdar 和 Ghosh (2008)应用可能性理论来确定排放情景和 GCMs 的不确定性,并预测了未来印度 Mahanadi 河的径流量变化情况。Maurer(2007)研究了加利福尼亚 2071~2100 年的水文响应变化,指出气候排放情景的不确定性在未来气候变化对水资源影响评估中也很重要。Kay 等(2009)研究了气候排放情景、大气环流模式、大气环流模式初始条件、降尺度方法、水文模型结构、水文模型参数这几个不确定性来源,指出大气环流模式是最大的不确定性来源。Chen 等(2011)也考虑了气候变化影响评估中的这六个不确定性来源,指出 GCMs 是确定性的主要贡献者。同样,降尺度方法也可能引起气候变化评估结果的不确定性,甚至对未来气候变化可能得出相反的预测。目前,大部分研究侧重 GCMs 和排放情景引起的不确定性,只有少量工作研究降尺度方法对气候变化评估结果的不确定性(Böe et al., 2007; Segú et al., 2010)。Khan 等(2006)比较了三种降尺度方法 SDSM

(statistical downscaling method)、LARS-WG(long Ashton research station weather generator)、ANN(artificial neural network)后,指出在对日降雨量、日最高和最低温度进行降尺度过程中存在着很大的不确定性。而降尺度方法引起的不确定性与GCMs和排放情景的不确定性同样重要,并且常被忽略。

气候变化预测的不确定性也决定了气候变化影响评估模型如水文模型输入包括降雨量、气温等因素的不确定性,而水文模型本身的不确定性也是气候变化影响评估的重要来源,包括模型结构、参数和尺度等引起的不确定性。近些年来,水文模型本身的不确定性已引起了广泛的关注,不少工作研究了水文模型本身不确定性对径流的影响(Yang et al., 2008; Xu et al., 2010; Tian et al., 2013; Tian et al., 2014)。Najafi等(2011)应用八个GCMs模拟结果,通过统计降尺度后,结合水文模型来评估GCMs和水文模型的不确定性,指出在干旱季节水文模型的不确定性要比GCMs大,说明水文模型的选择在气候变化影响评估中同样非常重要。因此,研究大气环流模式、降尺度方法、排放情景和水文模型等包含的不确定性是应对气候变化的重要前提和基础。

1.2.4 气候变化对水文极端事件的影响评估研究现状

洪水和干旱是水文极端事件的表现形式,是最为常见的自然灾害之一。全世界约有20 000人口因洪水死亡,并影响了近7500万人民的生活(Smith, 2001)。随着全球气候变暖,水文极端事件包括洪水和干旱发生的频率和强度发生了很大的改变,因此气候变化下区域/流域未来的水文极端事件发生频率和强度如何变化,是科学家和决策人员目前十分关注的问题。

然而,目前气候变化的影响评估工作往往关注气候变化对水循环各个因素的平均特性变化,而忽视了气候变化对越来越频繁出现的水文极端事件的可能影响。近些年来,国内外对气候变化引起的极端事件频率和强度的变化现象开始关注,并做了初步的研究工作,譬如Fowler等(2007)应用多模式集合来评估欧洲未来极限降雨量的变化,发现欧洲绝大部分地区的短历时和长历时极端降雨量将增加。同样,Buonomo等(2007)应用区域气候模式研究了欧洲的极限降雨变化,也发现欧洲未来的降雨强度将增加,尤其是极端(稀有)事件。Xu等(2012)运用大气环流模式的结果,通过天气发生器进行降尺度处理,研究了气候变化对中国钱塘江流域未来三个时期内设计暴雨的影响。Wilby和Harris(2006)研究了气候变化对泰晤士河枯水径流量的影响,指出枯水径流量的累积分布函数对不同大气环流模式和气候排放情景的降尺度过程中的不确定性最为敏感。总体而言,到目前为止,气候变化对水文极端事件的影响评估的研究并不多,评估的理论和方法还很欠缺。

水文极端事件的模拟和预测过程复杂,研究水文极端事件过去和未来的变化

趋势,分析气候变化对水文极端事件的可能影响,同时从不同的不确定性来源探讨气候变化对水文极端事件进行影响评估中的不确定性,是区域应对气候变化、防灾减灾和风险管理的的重要途径之一。

1.3 研究目标和内容

1.3.1 研究目标

本书的总体目标是以浙江省钱塘江流域为主要研究对象,研究评估气候变化对钱塘江流域极限径流模拟和预测影响的关键方法和技术问题,并分析气候变化对钱塘江流域极限径流的可能影响以及其不确定性,为钱塘江流域的防灾减灾、水资源可持续发展和水资源高效利用等提供有效的技术支持,也可为其他流域或者区域的气候变化影响评估工作提供一定的参考。

1.3.2 研究内容

本书的主要研究内容包括:

(1) 气候变化对水文过程的影响评估方法研究。详细介绍气候变化对水文过程的影响评估研究进展和发展动态,总结气候变化对水文过程进行影响评估的关键方法和理论。

(2) 钱塘江流域的降雨量和径流量趋势分析。采用趋势分析方法、变异点分析方法和气候变化和人类活动的定量区分等方法,简要分析钱塘江流域的降雨量和径流量的历史趋势以及气候变化和人类活动对降雨量和径流量变化的不同贡献率。

(3) 气候变化对钱塘江流域支流金华江水资源的影响评估研究。结合分布式水文模型和区域气候模式,分析未来不同气候变化情景下金华江流域的未来水资源情况。

(4) 气候变化对钱塘江流域支流金华江和兰江流域极限径流的影响评估不确定性研究。采用不同的不确定性分析方法,结合多个集总式水文模型和分布式水文模型,以金华江和兰江流域为研究案例,分析气候变化影响评估中的不确定性对极限径流模拟和预测的影响。

第2章 气候变化对水文过程的影响 评估及其不确定性分析方法

目前对未来气候变化对水文过程影响评估的研究主要是通过气候模式与水文模型耦合的方式来进行,这种方式的基本过程是:首先利用历史气象及水文数据对水文模型的参数进行率定和验证,然后保持水文模型的参数不变,利用气候模式预测的未来气象数据驱动水文模型从而得到未来气候变化情况下的流域水资源情况,最后将气候变化下的流域水资源情况与历史水资源情况进行比较得出气候变化对流域水资源的影响。本章主要目的是介绍气候变化对水文过程的影响评估研究进展和发展动态,总结气候变化影响评估的关键方法和理论,为本书后续的章节内容提供一定的理论和方法基础。

2.1 气候变化对水文过程的影响评估方法

2.1.1 气候变化情景

研究气候变化对水文过程的影响要依赖于对全球未来气候变化的预估,目前研究全球未来气候变化广泛使用的情景模式主要沿用自《IPCC 排放情景特别报告》(Pachauri et al., 2007)。《IPCC 排放情景特别报告》在评估了社会经济发展、技术变化及人口变化等对温室气体排放造成影响的基础上,主要构建了涵盖温室气体排放及硫排放的多种主要驱动因素在内的四种系列排放情景(A1、B1、A2、B2)(Kagramanian et al., 2000)。

A1 情景系列描述的是:未来世界经济飞速增长,全球人口于 21 世纪中叶达到峰值,然后下降,新的和更高效的技术被快速引用。主要主题为地区间的趋同共存,增强能力,增加文化和社会的相互作用,各地区的人均收入差别大幅度减小。A1 情景系列分为三个部分,分别描述了能源系统中的工艺技术变化的供选择方向,即化石燃料密集型(A1FI)、非化石燃料(A1T)及各种燃料平衡使用(A1B)。

A2 情景系列描述的是:未来世界依然是一个很混杂的世界,基本主题是自力更生及地方特色的保持。全球人口不断增加,各个地区的人口增长方式不同,社会经济、科技发展十分不均衡。各地区的主要目标是经济发展。人均经济增长及科技革新较其他情景而言比较缓慢及缺乏连续性。

B1 情景系列描述的是:未来世界是一个趋同的世界。全球人口在 21 世纪中叶达到峰值,然后下降,经济结构向服务业与信息经济方向转化,材料供应紧张缓解,清洁能源与高效技术得以应用。发展重点为解决经济、社会 and 环境的可持续发展,提高平等性,并且不增加对气候变化的影响。

B2 情景系列描述的是:未来世界是一个注重于区域性解决经济、社会和环境可持续发展的问题的世界。其情景特点是,人口增长数量低于 A2 情景,经济发展处于中等水平,技术革新较 A1 和 B1 缓慢,但是多样化更加明显。

不同气候情景模式下对未来气候变化的预估情况也不尽相同。IPCC 第四次气候变化预估报告根据不同的气候情景给出了 21 世纪多模式平均温室气体排放及温度地表增温情况(见图 2.1)。由图可知,在 A1F1 情景下,温室气体排放量最多,温度升高也最为显著,在 B1 情景下,温室气体在可预期的将来排放量减少最多,温度升高最少。

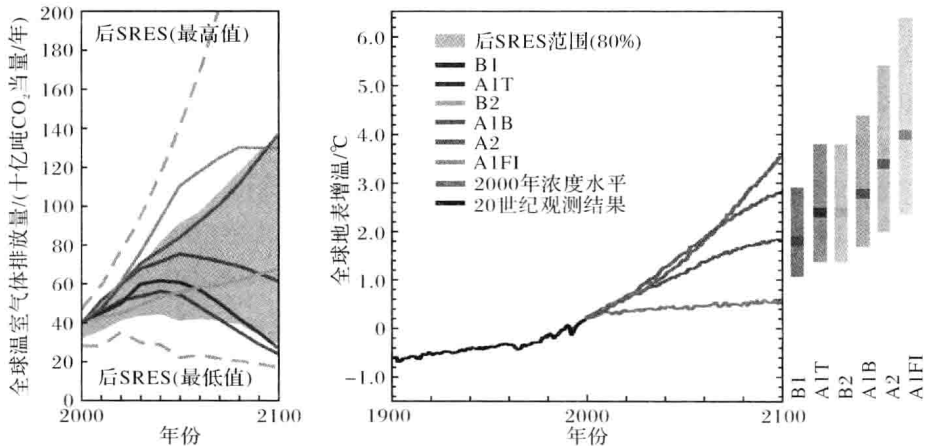


图 2.1 21 世纪温室气体排放情景及地表温度预估

(左图为全球温室气体排放二氧化碳当量(无气候政策出台的情况下),灰色区域为 SRES 以来 80 个百分位的范围,虚线表示 SRES 的全部情景范围;右图实线为气候情景下多模式平均地表升温;最右为 2090~2099 年相对于 1980~1999 年的升温,每个条柱中的深色部分表示最佳估计值)(Solomon, 2007)

《IPCC 排放情景特别报告》考虑了未来人口增长、社会经济发展、科技发展等因素,但是它并没有考虑到人类应对气候变化的政策对未来气候变化所造成的影响。因此,IPCC 在第五次气候变化预估报告(2013)中创建了具有稳定浓度特征的代表性浓度路径情景(representative concentration pathways, RCPs)(陈敏鹏等, 2010)。不同于之前的四次报告,IPCC 第五次气候变化预估报告针对广大群众关心的近期气候变化情况及决策者应对气候变化采取的政策进行了区域气候影响等方面的实验,代表性浓度路径情景 RCPs 不仅指明了导致大气辐射强迫的

可能情景,也对公众及决策者所关心的近期气候变化结果进行了预测。

不同于以往开发气候情景模式所采取的串行方法,RCPs 采用的是并行开发方式。所谓的并行开发方式是指气候模式工作者与综合评估工作者同时进行工作,在对大气及碳循环进行模拟的同时综合考虑了社会发展情景。RCPs 情景下的全球平均气温及二氧化碳浓度如图 2.2 和图 2.3 所示。

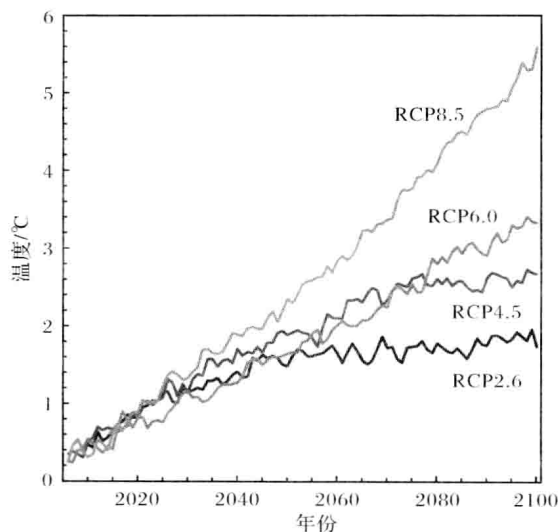


图 2.2 各浓度路径下全球平均温度变化情况(与 1980~1999 年相比)(Stocker et al., 2013)

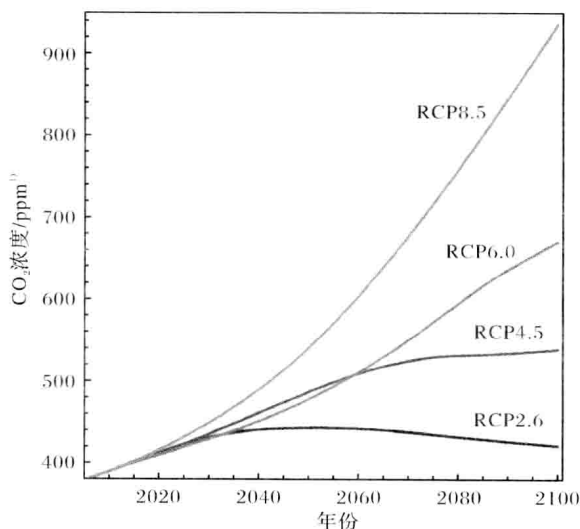


图 2.3 各浓度路径下二氧化碳变化情况(Stocker et al., 2013)

1) 1ppm=10⁻⁶,下同。