

“十三五”国家重点图书出版规划项目

气候变化对中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



气候变化对南方典型 洪涝灾害高风险区防洪安全 影响及适应对策

刘志雨 吴志勇 等 著
陈晓宏 陈芷菁



科学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目

气候变化对中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

气候变化对南方典型洪涝灾害 高风险区防洪安全影响及适应对策

刘志雨 吴志勇 等 著
陈晓宏 陈芷菁

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对过去 60 年 (1951~2010 年) 中国南方极端洪涝事件的时空演变规律和变化过程、气候变化对水文非稳态序列洪水频率变化影响的机理以及未来气候变化对重大水利工程、城市防洪安全影响的后果与风险进行研究和探讨, 主要内容包括区域水循环洪水模型与方法研究、气候变化对极端洪涝水文事件的影响分析、气候变化条件下洪水频率计算方法研究、区域洪水频率分析方法研究、气候变化对重要大型水库设计和区域防洪安全风险的影响评估、气候变化对重要蓄滞洪区运用和区域防洪安全风险的影响评估、气候变化对沿海城市防洪安全的影响评估、气候变化对滨河城市洪涝风险的影响评估等。

本书可供从事气候变化对水文水资源、水利工程、城市防洪等方面研究的科研工作者、专业技术人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对南方典型洪涝灾害高风险区防洪安全影响及适应对策 / 刘志雨等著. —北京: 科学出版社, 2016. 5

(气候变化对中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)

“十三五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-048092-7

I. 气… II. 刘… III. 气候变化-影响-防洪-研究-中国 IV. TV87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 085516 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 杨逢渤 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

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

*

2016 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张: 17 3/4 插页: 2

字数: 420 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



国家重点基础研究发展计划（973计划）2010CB428400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

《气候变化对中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》 丛书编委会

项目咨询专家组

孙鸿烈	徐冠华	秦大河	刘昌明
丁一汇	王 浩	李小文	郑 度
陆大道	傅伯杰	周成虎	崔 鹏

项目工作专家组

崔 鹏	王明星	沈 冰	蔡运龙
刘春蓁	夏 军	葛全胜	任国玉
李原园	戴永久	林朝晖	姜文来

项目首席

夏 军

课题组长

夏 军	罗 勇	段青云	谢正辉
莫兴国	刘志雨		

《气候变化对南方典型洪涝灾害高风险区 防洪安全影响及适应对策》撰写委员会

承担单位 水利部水利信息中心

参加单位 河海大学 中山大学

广东省水文局 武汉大学

华南理工大学 中国气象局国家气候中心

主 笔 刘志雨 吴志勇 陈晓宏 陈芷菁

第 1 章 刘志雨 尹志杰 赵兰兰

第 2 章 吴志勇 肖 恒 李 岩 侯爱中

第 3 章 李 岩 吴志勇 胡健伟 肖 恒

第 4 章 陈晓宏 刘志雨 杨 赤 唐亦汉

第 5 章 陈 华 尹志杰 赵兰兰 王金星

第 6 章 黄国如 刘志雨 武传号 马经广

第 7 章 吴志勇 刘志雨 肖 恒 侯爱中

第 8 章 陈芷菁 武传号 刘志雨 马经广

第 9 章 吴志勇 刘志雨 肖 恒 尹志杰

第 10 章 刘志雨 李 岩

序

洪水灾害是全球发生最频繁、损失最严重的自然灾害之一。随着气候变化和区域可持续发展科学研究的深入,气候变化对极端水文过程的影响以及在这种影响下洪水灾害的变化,受到各国政府、国际组织及气象、水文和防灾减灾领域研究学者的广泛关注。联合国教科文组织国际水文计划(UNESCO-IHP)第二阶段研究将全球变化确定为5个主题之一,并重点关注其对极端气象水文灾害的影响。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)2012年发布了极端事件风险管理特别报告,针对气候变化对洪水等极端灾害事件的影响进行综合评估。与气候系统变化密切相关的洪水灾害演变研究,已成为气候变化影响与适应研究的重要和前沿内容。

中国是世界上多洪涝灾害的国家,洪涝灾害不仅范围广、发生频繁、突发性强,而且损失大。进入21世纪,中国暴雨洪涝呈现新的特征,主要体现在中小河流洪水、山洪、暴雨诱发的泥石流和滑坡以及城市内涝灾害频发,造成人民生命伤亡和财产损失。气候变化改变了大气持水能力,将引起洪水等极端水文事件出现的频率和强度的变化,使得一些地区的洪水风险增加。相对而言,气候变化对洪涝等极端水文事件影响研究相对薄弱,已成为亟须加强研究和解决的科学问题。因此,研究气候变化对典型区域洪涝灾害的影响与适应性对策具有重要的价值和意义。

自2010年以来,由水利部水利信息中心、河海大学、中山大学、广东省水文局等单位组成的研究团队,通过承担国家973计划项目课题“气候变化对南方典型洪涝灾害高风险区防洪安全的影响”研究,分析揭示了近60年中国洪涝极端事件的变化特征,深入研究和开展了与气候变化密切相关的非稳态极值洪水频率计算方法;基于不同气候变化情景多模式数据,预测在全球变暖背景下中国南方典型流域极端洪水变化趋势,进而分析未来气候变化对中国洪涝灾害风险的可能影响,并提出一些具有实践意义的应对气候变化对策建议,为相关部门应对气候变化提供参考,发挥了项目基础研究与应用支撑的关键作用,是一项优秀的科研成果,在国内外产生了很好的影响。希望本书的出版发行,进一步推动气候变化影响及应对方面的研究。

是为序。

中国工程院 院士
南京水科院 院长



2016年5月10日

前言

气候变化对水资源安全的影响是国际上普遍关心的问题，也是我国可持续发展面临的重大战略问题。

2010年1月，国家重点基础研究发展计划（973计划）启动了“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”项目研究，主要针对我国东部季风区的大江大河流域水循环和水资源格局变化以及南方洪涝灾害和北方水资源短缺等重大水问题，开展气候变化背景下陆地水循环响应机理、气候变化对我国区域水资源安全与适应对策研究，对于科学认识全球气候变化背景下我国陆地水循环时空演变规律、评估气候变化对水资源安全的影响、保障我国经济社会可持续发展，具有重要科学意义与应用价值。该项目由中国科学院地理科学与资源研究所主持，联合国家气候中心、水利部水利信息中心、北京师范大学、中国科学院大气物理研究所、水利部水利水电规划设计总院、中国科学院东北地理与农业生态研究所等7家国内重要的气候、水文科研单位共同承担。

“气候变化对南方典型洪涝灾害高风险区防洪安全的影响”是该项目应用基础层面的研究之一，由水利部水利信息中心承担。本书的研究目标是以我国东部季风区频繁发生暴雨洪水的珠江流域和淮河流域为研究对象，建立水文循环模拟系统（TERWAS）区域水循环洪水模块；基于长期水文监测及未来气候情景，开展气候变化对洪水的强度、频率及时空分布影响研究，分析洪涝极端事件对区域和城市的防洪工程设计和运行等防洪安全方面的影响，揭示气候变化背景下我国洪涝灾害高风险区洪水发生、演变及极端事件发生的规律，为我国应对气候变化对区域防洪安全影响而采取的适应性措施提供科学依据。

本书针对气候变化对我国南方极端洪涝水文频率变化的认知，考虑气候变化的洪水频率分析计算方法，气候变化对重大水利工程、防洪城市洪水风险影响的预估等三大科学问题，围绕分析评估和科学判断气候变化对我国防洪安全影响的后果与风险的研究目标，设置了区域水循环洪水模块研制与气候变化对极端洪涝水文事件的影响分析、气候变化对洪水频率变化影响分析的方法研究、气候变化对区域防洪安全体系风险影响的分析评估、气候变化对典型城市防洪安全的影响评价等4个方面的研究内容。

本书研究的总体思路是以系统观测事实为基础，科学认知过去60a^①我国南方极端洪涝事件时空演变规律和变化过程；以洪水频率分析计算方法创新为核心，科学认识气候变化对水文非稳态序列洪水频率变化影响的机理；以预估不确定性和风险分析为重点，科学判断未来气候变化对重大水利工程、防洪城市防洪安全影响的后果与风险。

^① 本书均指1951~2010年。

经过近五年的研究攻关，本书取得了如下四方面的主要研究成果。

1) 揭示了我国东部季风区及珠江、淮河流域过去 60a 暴雨洪涝极端事件强度、频率的时空变化规律，定量预估了 2021 ~ 2050 年洪涝极端事件的演变趋势，绘制了珠江、淮河流域极端洪涝事件变化分布图集。

2) 探索了变化环境下洪水频率计算理论与方法，提出了环境变化引起的非稳态洪水极值频率计算方法，研发了考虑气候变化的水文极值统计预测模型，并应用到我国南方典型洪涝风险区未来气候变化对洪涝极端事件的影响分析。

3) 提出了气候变化对区域洪水风险影响的评价方法和计算途径，评估了不同 RCP 排放情景、多组气候模式条件对我国南方洪涝风险区重大水利工程防洪安全的影响，提出了考虑气候变化的水利工程防洪规划设计、防洪调度管理等适应对策与建议。

4) 以广州市、蚌埠市为研究对象，采用 Copula 函数构建了雨潮组合、雨洪组合风险概率模型，预估了不同 RCP 排放情景、多组气候模式条件下雨潮遭遇、雨洪遭遇对气候变化的响应，提出了城市防洪适应性建议和应对措施。

总结起来，针对研究中遇到的难点，本书有以下几点创新。

1) 探讨发展了非稳态水文极值系列的频率计算理论，提出了考虑气候变化影响的水文极值统计预测模型和洪水频率计算方法，并应用到我国南方重要的洪涝风险区开展未来气候变化对极端洪涝事件的影响评估，为区域防洪规划和工程设计提供了技术支撑。

合理推算非稳态序列极端事件的重现期，对水资源评估和水利设施的设计至关重要。分析了水文时间序列的统计特征时空变异性和变异程度，重新认识非平稳的水文序列及其统计特征随环境因子的变化规律，从而揭示水文情势演变规律。探索了变化环境下洪水频率计算理论与方法，提出了不同条件下的洪水频率计算方法，尝试研发考虑气候变化的水文极值统计预测模型。

2) 提出了考虑模拟降水的独立性进行多组全球气候模式筛选的方法，建立了适用于洪水模拟的区域降尺度方法，为合理应用全球气候模式预估数据开展气候变化对极端洪涝水文事件影响评估提供了一条新的途径。

在系统评估多达 47 个气候模式模拟能力的基础上，检验了模式间模拟降水的独立性，依据层次聚类分析结果筛选出代表性模式，降低了相似模式对评估结果的影响；分别采用分位图按同频率订正和按月随机选取方法进行降尺度。与传统方法相比，该方法具有时空分布一致、对降水极值有较好的模拟能力、灵活快捷等特点，适用于未来多情景模式的洪水模拟，有效解决了气候模式和水文模型尺度匹配问题。

依据国家/行业规范，结合流域防洪标准现状及未来可能出现的变化，定义了蒙洼蓄滞洪区启用的阈值，评估了气候变化对工程运用的影响；基于 Copula 函数，提出了气候变化情景下外洪与城市暴雨遭遇分析方法，构建了雨洪遭遇联合分布，定量评估了多种雨洪组合下不同情景遭遇的概率及其变化情势。研究成果进一步丰富和完善了气候变化对水文水资源影响评估的内容与方法体系。

3) 基于长系列观测的极端暴雨洪水序列，揭示了我国东部季风区及珠江和淮河典型流域暴雨洪水的年代际、年际变化规律，为未来全球气候变暖条件下暴雨洪水的预估提供

了参考依据。

基于多个排放情景下多组气候模式耦合水文模型的模拟结果，科学判断了气候变化对南方洪涝高风险区洪水时空格局变化的长期影响，绘制了珠江流域、淮河流域 2021 ~ 2050 年极端洪涝水文事件变化空间分布图集。利用 IPCC 最新发布的气候模式预估及多种二次开发数据，嵌套水文模型模拟了新一代排放情景下 2021 ~ 2050 年典型断面洪水过程。对多组模拟结果进行集合处理，在一定程度上减少了评估结果的不确定性，为流域管理部门决策提供了科学参考。

本书在上述课题研究的基础上，对相关成果进行了凝练。全书共 10 章，分别是第 1 章绪论，第 2 章区域水循环洪水模型与方法研究，第 3 章气候变化对极端洪涝水文事件的影响分析，第 4 章气候变化条件下洪水频率计算方法研究，第 5 章区域洪水频率分析方法研究，第 6 章气候变化对重要大型水库设计和区域防洪安全风险的影响评估，第 7 章气候变化对重要蓄滞洪区运用和区域防洪安全风险的影响评估，第 8 章气候变化对沿海城市防洪安全的影响评估，第 9 章气候变化对滨河城市洪涝风险的影响评估，第 10 章结论及对策建议。

限于著者水平，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

著者

2016 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 我国洪涝灾害概况	1
1.1.2 国家重大需求分析	1
1.1.3 研究的科学意义	2
1.2 研究目标与主要研究内容	2
1.2.1 研究目标	2
1.2.2 主要研究内容	2
1.2.3 关键科学问题	3
1.3 总体思路及技术路线	3
1.3.1 总体思路	3
1.3.2 技术路线	3
1.4 研究区概况	5
1.4.1 珠江流域	5
1.4.2 淮河流域	7
第2章 区域水循环洪水模型与方法研究	10
2.1 概述	10
2.2 大尺度水文模型——VIC 模型	10
2.2.1 VIC 模型简介	10
2.2.2 数据来源及参数标定	12
2.2.3 淮河和珠江流域大尺度水文模拟	14
2.3 基于网格的流域汇流模型	27
2.3.1 基本原理	27
2.3.2 参数求解	28
2.3.3 计算方案	29
2.3.4 模型应用	30

2.4 小结	35
第3章 气候变化对极端洪涝水文事件的影响分析	36
3.1 概述	36
3.2 资料及数据说明	36
3.2.1 水文气象资料	36
3.2.2 其他数据	39
3.3 过去60年(1951~2010年)极端洪水事件变化趋势分析	43
3.3.1 研究方法与技术路线	43
3.3.2 极端洪水事件发生频次变化	44
3.3.3 极端洪涝水文事件强度和频率变化	45
3.3.4 结果讨论	58
3.3.5 初步结论	59
3.4 未来洪水事件对气候变化的响应分析	59
3.4.1 研究方法与技术路线	59
3.4.2 模型介绍	60
3.4.3 汛期年最大流量与日流量(径流深)相关分析	62
3.4.4 基准期及未来20~50a日流量过程模拟	63
3.4.5 极端水文事件对未来气候变化的响应	70
3.4.6 初步结论	106
3.5 小结	107
第4章 气候变化条件下洪水频率计算方法研究	108
4.1 概述	108
4.2 目前研究方法及存在问题	108
4.2.1 国际目前洪水频率计算方法	108
4.2.2 我国现行洪水频率计算方法	109
4.2.3 目前研究中存在的问题	109
4.3 考虑气候变化影响的非稳态水文极值系列洪水频率计算方法	110
4.3.1 水文极值与气候影响因子关系的初步分析	110
4.3.2 淮河流域水文极值统计预测模型	113
4.3.3 研究结果与主要结论	116
4.4 环境变化引起的非稳态水文极值系列洪水频率计算方法	117

4.4.1	降水强度增大下洪水频率计算方法	118
4.4.2	降水频次增加下洪水频率计算方法	122
4.4.3	洪水历时缩短下洪水频率计算方法	128
4.5	小结	131
第5章	区域洪水频率分析方法研究	133
5.1	概述	133
5.2	区域洪水频率分析原则	133
5.3	指标洪水法	134
5.3.1	“水文相似性”聚类分析	134
5.3.2	分区合理性检验	135
5.3.3	指标洪水法计算区域洪水频率	136
5.4	珠江流域区域频率分析	137
5.4.1	资料与数据	137
5.4.2	水文相似性分区	139
5.4.3	分区结果的检验	140
5.4.4	指标洪水法计算区域频率	141
5.4.5	本节小结	145
5.5	淮河流域区域频率分析	145
5.5.1	资料与数据	145
5.5.2	水文相似性分区	146
5.5.3	分区结果的检验	147
5.5.4	指标洪水法计算区域频率	148
5.5.5	小结	151
5.6	气候变化情景下珠江流域洪水频率分析	152
5.6.1	气候变化情景下径流模拟	152
5.6.2	气候变化下珠江区域洪水频率分析	154
5.7	小结	163
第6章	气候变化对重要大型水库设计和区域防洪安全风险的影响评估	164
6.1	概述	164
6.2	北江流域研究区概况	165
6.3	飞来峡水库极端洪水事件历史发生规律和演变趋势	167

6.3.1	资料与方法	167
6.3.2	极端气候事件的趋势强度分析	169
6.3.3	极端气候事件的趋势稳定性分析	173
6.3.4	极端气候指标时间序列分析	176
6.3.5	极端气候指标相关关系分析	179
6.3.6	强降雨变化分析	179
6.3.7	洪水变化分析	185
6.3.8	相关性分析	187
6.4	气候变化背景下飞来峡水库水文情势未来趋势分析	189
6.4.1	资料与方法	189
6.4.2	飞来峡流域 VIC 模型构建	191
6.4.3	飞来峡流域 VIC 模型评估	193
6.4.4	CMIP5 多模式集合数据适应性评估	194
6.5	气候变化背景下极端洪水对其工程设计、运行等防洪安全影响	196
6.5.1	月气温及月降雨变化情景预估	196
6.5.2	月流量变化情景预估	197
6.5.3	未来情景洪水频率变化可信度分析	198
6.5.4	未来情景极端入库洪水风险预估	201
6.6	小结	202
第7章	气候变化对重要蓄滞洪区运用和区域防洪安全风险的影响评估	204
7.1	概述	204
7.2	淮河流域研究区概况	205
7.3	王家坝以上流域极端洪水事件历史发生规律和演变趋势	206
7.3.1	资料与方法	206
7.3.2	王家坝以上流域不同历时年最大面降雨量的线性变化趋势 及突变特征	208
7.3.3	王家坝以上流域不同历时最大洪量的线性变化趋势及突变特征	211
7.4	气候变化背景下蓄滞洪区极端洪水事件未来趋势分析	214
7.4.1	基准期及 RCPs 情景下王家坝断面流量过程模拟	214
7.4.2	极端水文事件对未来气候变化的响应	215
7.5	气候变化背景下极端洪水对区域防洪安全的影响	216

7.5.1	气候变化对蒙洼蓄滞洪区运用的可能影响	217
7.5.2	气候变化对区域防洪的可能影响	217
7.5.3	结果讨论	218
7.6	小结	219
第8章	气候变化对沿海城市防洪安全的影响评估	221
8.1	概述	221
8.2	典型沿海城市广州市概况	221
8.3	广州市水文气象要素时空变化历史规律和演变趋势分析	222
8.3.1	致涝的短历时暴雨变化	222
8.3.2	日强降雨变化	226
8.3.3	气温变化	228
8.3.4	沿海相对海平面变化	228
8.4	广州市城区雨潮风险概率模型构建	230
8.4.1	雨潮联合分布函数构建	230
8.4.2	雨潮组合风险概率模型	235
8.5	气候变化对广州市城区内涝风险概率影响评估	238
8.5.1	广州未来气候情景预估	238
8.5.2	广州未来海平面变化预估	240
8.5.3	广州雨潮组合风险概率对气候变化的响应	241
8.6	小结	245
第9章	气候变化对滨河城市洪涝风险的影响评估	247
9.1	概述	247
9.2	资料与方法	247
9.2.1	研究区概况	248
9.2.2	模式资料	248
9.2.3	VIC 模型	248
9.2.4	Copula 函数	249
9.2.5	遭遇概率模型	250
9.2.6	参数估计	250
9.3	结果分析	251
9.3.1	联合分布函数的确定	251

9.3.2 未来气温降水变化预估	253
9.3.3 历史城市暴雨洪水遭遇概率分析	253
9.3.4 未来情景下外洪与城市暴雨遭遇概率趋势分析	254
9.4 小结	256
第 10 章 结论及对策建议	258
10.1 结论	258
10.2 对策建议	259
参考文献	261

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 我国洪涝灾害概况

中国洪涝灾害频繁且严重,防洪安全问题始终是心腹之患。新中国成立以后,经过 60 余年的水利建设,我国主要江河常遇洪水基本得到控制,但是遇到大洪水、特大洪水时,由于现有的防洪排涝体系尚不完善,防洪工程病险问题较为突出,非工程措施相对薄弱,经济社会快速发展等,洪涝灾害依然十分严重。据统计,20 世纪 90 年代以来,全国年均洪涝灾害损失达 1100 多亿元,相当于同期 GDP 的 1%~2%。

在全球气候变暖背景下,已观测到强降水、洪涝频次和强度增加,海平面上升,台风和风暴潮概率及强度增大,直接威胁到我国的防洪安全。《第二次气候变化国家评估报告》指出,近 60a (1951~2010 年)来,中国的高温、强降水、台风等极端气候事件的频率和强度存在变化趋势,并有区域差异。强降水事件在我国长江中下游流域、东南和西部地区有所增多、增强。2007 年 8 月 9 日至 11 日,受第 7 号热带风暴“帕布”、第 8 号热带风暴“蝴蝶”和热带辐合带的共同影响,广东雷州半岛持续降大到特大暴雨,暴雨中心湛江市雷州幸福农场雨量站最大 24 h 降水量达到 1188.2 mm,暴雨导致雷州半岛部分河流发生超历史实测记录的洪水。未来我国高温、强降水、洪涝等极端事件将可能继续增加,海平面将趋于上升,防洪安全保障将面临巨大风险。

1.1.2 国家重大需求分析

在全球气候系统变暖的大背景下,中国是气候变暖特征最显著的国家之一。《第二次气候变化国家评估报告》指出:①近 100a 来中国年平均地表气温明显升高。升温幅度为 0.5~0.8℃;近 50a (1961~2010 年)增温尤其明显,平均地表气温升高 1.1℃,增温速率为 0.022℃/a,明显高于全球或北半球同期平均增温速率。②近 100a 和近 50a 中国年降水量变化趋势不显著,但年际波动较大,并存在明显的区域差异。在一些总降雨已经增加的地区,强降雨事件也有显著增加。在个别地区,虽然总降雨减少或保持不变,但强降雨事件增加了。③在气候变暖背景下,近 50a 来中国主要极端气候事件的频率和强度出现了明显变化,寒潮事件频数显著下降。华北和东北地区干旱趋重,长江中下游流域和东南沿海地区洪涝加重。④未来 20~100a 中国地表气温将明显增加,降雨量也将呈增加趋势。和全