

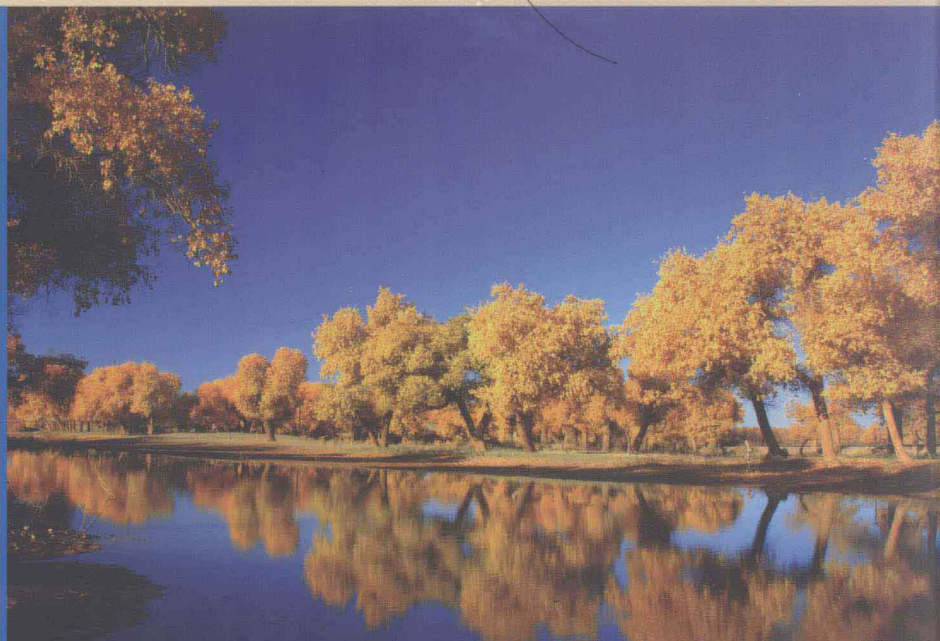
李原园 文康 沈福新 张世法 王家祁 著

# 气候变化 对中国水资源影响及应对策略研究

Impacts and Adaptation of Climate Change in China



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



# 气候变化

## 对中国水资源影响及应对策略研究

李原园 文康 沈福新 张世法 王家祁 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

内容提要 ●

本书根据大量有关中国气温、降水、径流以及暴雨洪水的实际观测成果和水资源调查评价成果，构建了大尺度水文模型，对中国近 50 年来各水资源分区水资源的变化事实进行了模拟、检验与分析；根据对未来不同气候变化情景下的预测分析成果，对中国未来 50 年各水资源分区的水资源变化趋势进行了分析预测。根据大量观测与调查资料对中国各地区旱涝极端事件的历史演变规律进行了深入分析，对中国不同地区暴雨极端事件的变化趋势作了分析与展望，对中国东部地区极端干旱事件的可能变化作了预估。本书还针对气候变化背景下模拟和预测降水与径流的不确定性进行了详细分析，针对气候变化对水资源的不确定的影响，就气候变化应对措施制定的风险决策进行了探讨，提出了建议。

本书是一本具有较强学术性、应用性与参考性的专著，可供与气候和水利相关的部门、高等院校和科研机构等技术、管理人员参考使用。

图书在版编目（C I P）数据

气候变化对中国水资源影响及应对策略研究 / 李原园等著. — 北京：中国水利水电出版社，2012. 11  
ISBN 978-7-5170-0402-8

I. ①气… II. ①李… III. ①气候变化—影响—水资源—研究—中国 IV. ①TV213

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第287782号

审图号：GS（2012）1104 号

|      |                                                                                                                                       |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 气候变化对中国水资源影响及应对策略研究                                                                                                                   |
| 作 者  | 李原园 文康 沈福新 张世法 王家祁 著                                                                                                                  |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址：www. waterpub. com. cn<br>E - mail：sales@waterpub. com. cn<br>电话：(010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心 (零售)<br>电话：(010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                          |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                       |
| 印 刷  | 北京纪元彩艺印刷有限公司                                                                                                                          |
| 规 格  | 184mm×260mm 16 开本 27. 75 印张 658 千字                                                                                                    |
| 版 次  | 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷                                                                                                   |
| 印 数  | 0001—1000 册                                                                                                                           |
| 定 价  | 78. 00 元                                                                                                                              |

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换  
版权所有 · 侵权必究

# 《气候变化对中国水资源影响及 应对策略研究》编写人员名单

统稿人： 李原园 文 康 沈福新

## 各章编写人员：

绪 论 李原园 文 康

第 1 章 沈福新 陈艺伟 雷 Wen 曹建廷

第 2 章 郦建强 李福绥 陈艺伟 沈福新

第 3 章 张世法 李蝶娟 李 琪 顾 颖

第 4 章 王家祁 雷 Wen 吴志勇

第 5 章 李蝶娟 吴志勇 毛羽俊

第 6 章 李 琪 李蝶娟 吴志勇 陈艺伟 文 康

第 7 章 文 康 张世法 沈福新 李福绥 陈艺伟

第 8 章 李原园 文 康 沈福新 张世法 雷 Wen

# 序

气候变化正在全球范围内产生日益广泛和深远的影响，不仅影响着自然生态系统和人类生存环境，而且也影响着经济社会的发展，是当今国际社会和科学技术界普遍关注的全球性问题。中国幅员广阔、气候类型多样、水资源短缺、生态环境脆弱、社会发展压力巨大，是最易受气候变化影响的国家之一。在全球气候变化的大背景下，中国的气候也发生了显著的变化，对水资源的形势产生了较大的影响，主要表现在水循环发生变化，暴雨洪水、特殊干旱、强风暴、热浪等极端天气事件发生的频率和强度明显增大，使得水资源短缺和区域不平衡问题更加突出、洪涝干旱灾害加剧、自然生态环境受损，供水安全、防洪安全、生态安全和粮食安全等面临着气候变化带来的严峻挑战。

党中央、国务院历来高度重视气候变化问题，党的第十八次全国代表大会明确提出了“坚持共同但有区别的责任原则、公平原则、各自能力原则，同国际社会一道积极应对全球气候变化”。2007年，中国政府成立了以温家宝总理为组长的国家应对气候变化领导小组，负责研究制订国家应对气候变化的重大战略、方针和对策，统一部署应对气候变化工作，协调解决应对气候变化工作中的重大问题，同时还成立了气候变化专家委员会，为中国政府制定应对气候变化相关战略方针、政策法规和措施提供科学咨询建议。中国政府在致力于发展经济的同时，十分重视气候变化的科学问题和政策研究工作，为应对气候变化和改善生态环境，制定、颁布了一系列法律法规和政策措施。2006年中国《气候变化国家评估报告》正式发布，2007年颁布了《中国应对气候变化国家方案》，全面介绍了中国气候变化的科学基础以及气候变化的社会经济评价，明确了气候变化的影响与适应对策。2002~2005年，水利部会同有关部门组织开展了《全国水资源调查评价》，全面调查评价了我国水资源的数量、质量、开发利用状况以及生态环境状况；从2007年开始，水利部会同国家发展和改革委员会以及有关部门，根据经济社会快速发展和深刻变化、流域水资源状况和工程设施情况的重大变化、全球气候变暖和流域下垫面的显著变化，部署开展了新一轮流域综合规划修编工作，研究制定了流域开发、利用、保护、节约水资源和防治水害的总体部署，提出了加强流域社会综合

管理的政策措施。所有这些成果的取得，为制定应对气候变化对策奠定了坚实的基础。

全球气候变暖的趋势已不可避免，研究制定适应和减缓气候变化对水资源影响以及保障国家水安全的战略措施，特别是研究针对极端气象事件的有效应对措施已是当务之急，对提高国家、流域以及区域防洪抗旱综合减灾能力，水资源统筹调配能力和水资源保护能力具有重要意义。近年来，水利部水利水电规划设计总院根据新一轮流域综合规划修编工作的需要，组织有关单位对气候变化对水资源影响及其对策问题进行联合攻关，并与南京水利科学研究院共同开展了气候变化对中国水资源影响及应对策略的研究，取得了诸多颇有价值的研究成果，在该项研究主要成果的基础上，经过提炼、浓缩、加工，形成《气候变化对中国水资源影响及应对策略研究》一书。

该书系统总结了国内外气候变化对水资源影响的研究成果，在对大量详尽实际观测资料和全国水资源调查评价以及相关规划成果数据进行系统整理分析的基础上，全面分析了气候变化对中国各水资源分区的影响，系统研究了适应和应对气候变化的水资源战略，成果丰富，学术观点颇具新意，对国家在相关领域的决策具有重要参考价值。该书对于科学认知影响气候变化的自然因素与人为因素及其相互作用，以及评估未来气候变化可能造成的影响，也提供了借鉴和参考，亦给读者留下了思考空间。希望该书能在应对气候变化对水资源的影响以及保障国家水安全的实践中发挥积极和重要的作用。

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes that form the characters '胡一凡' (Huo Yifan).

2012 年 11 月

# 前言

中国政府密切关注全球气候变化，对适应和应对气候变化给予了高度重视，专门成立了国家气候变化对策协调机构，根据国家可持续发展战略的要求，采取了一系列应对气候变化的政策和措施，为减缓和适应气候变化作出了积极的贡献。2007年初，中国政府正式发表《中国应对气候变化国家方案》，全面阐述了中国政府对待全球气候变化的态度和履行的责任，重申了已经采取并将继续采取的应对气候变化的策略与措施。水是生命之源、生产之要、生态之基，水利与经济社会发展和生态文明建设休戚相关，事实证明气候变化已经并正在对水资源产生影响，预计未来这种影响还将继续，从而直接影响我国经济社会的可持续发展。分析研究未来气候变化对水资源的综合影响，研究适应和减缓气候变化影响的水安全保障战略措施，制定变化环境、变化条件下的水资源可持续利用的应对对策已是当务之急。

本书以联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第四次气候评估报告为依据，参考国内外有代表性的相关文献成果中关于中国气候变化的主要结论与预测结果，针对过去100年尺度全球温度、降水、干旱、洪涝、海平面上升等要素以及生态环境的变化事实和对未来变化趋势的预测，归纳提出对气候变化的综述。全书以大量的有关中国气温、降水、径流以及暴雨洪水的实际观测资料和全国水资源调查评价成果，以及水利部水利水电规划设计总院组织全国有关科研单位、高校和流域机构共同开展的气候变化对水安全保障影响及应对措施研究等多项研究成果为基础，对中国各水资源分区主要气候要素的变化情况进行了分析，系统评估了气候变化条件下中国各水资源分区水资源的变化及其现状形势与变化趋势；统计分析了中国各地区历史干旱资料，评估了历史极端干旱事件在气候变化背景下的发生与发展规律；统计分析了中国历史暴雨资料，评估了历史极端暴雨事件的时空变化趋势及其未来发展的分析与预估。根据大量的中国各地区水文气象历史观测资料及全国水资源调查评价成果，对中国近50年来的水资源情势变化进行了系统的模拟、检验与分析，揭示了气候变化对水资源影响的事实；根据国内外不同气候模式对未来中国气温与降水变化的分析预测成果，以及笔者研制的大尺度径流计算模型，对未来50年中国水资源的变化趋势作了预测；同时根据大量的历

史暴雨洪水和干旱与调查资料，对中国暴雨极端事件的变化趋势作了分析与展望，对中国东部地区极端干旱事件的可能变化作了分析评估。本书还针对气候变化背景，对模拟和预测降水与径流的不确定性进行了深入分析，并针对气候变化对水资源的不确定的影响，就如何进行风险决策和应对策略制定进行了探讨，提出了建议。

本书参考了大量的国内外文献，并引用了其中部分资料；利用了国家气候中心大量的气候观测资料和水利部水利水电规划设计总院组织完成的全国水资源调查评价资料，可参见本书所附的参考文献，谨此对文献作者表示衷心谢意！

参加本书编写工作的主要人员如下。

水利部水利水电规划设计总院：李原园、沈福新、郇建强、陈艺伟、曹建廷、康立芸。南京水利科学研究院：文康、张世法、王家祁、李蝶娟、李琪、李福绥、顾颖、毛羽俊。河海大学：吴志勇。McGill University, Canada: 雷 Wen。

作 者

2012 年 8 月

# 目 录

序

前言

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 绪论                                        | 1   |
| 第 1 章 全球气候变化综合分析                          | 18  |
| 1.1 全球气候变化评估背景                            | 18  |
| 1.2 IPCC 评估方法概述                           | 19  |
| 1.3 全球气候变化事实与分析                           | 22  |
| 1.4 全球气候变化影响评估结论                          | 38  |
| 1.5 气候变化预测                                | 46  |
| 1.6 中国气候变化研究成果综述                          | 53  |
| 附表                                        | 75  |
| 第 2 章 近 50 年气候变化对全国水资源的影响                 | 78  |
| 2.1 全国近 50 年主要气候要素变化分析                    | 78  |
| 2.2 全国近 50 年水资源变化情况分析                     | 96  |
| 2.3 气候变化因素对全国水资源影响的识别                     | 121 |
| 第 3 章 气候变化对中国极端干旱事件的影响分析                  | 127 |
| 3.1 历史重大干旱灾害事件回顾                          | 127 |
| 3.2 极端干旱灾害事实分析                            | 130 |
| 3.3 影响干旱极端事件的气象水文因子分析                     | 151 |
| 3.4 不同气候模式模拟与实际资料统计特征的检验                  | 160 |
| 3.5 未来气候变化对于干旱特征的影响和展望                    | 166 |
| 第 4 章 中国暴雨和洪水极端事件的变化趋势                    | 180 |
| 4.1 典型长系列代表站年最大 1d 雨量年代际变化                | 180 |
| 4.2 代表站年最大 1d、3d 点雨量前后期多年统计特征的变化          | 181 |
| 4.3 早年和近年编制的年最大 60min 和 24h 暴雨统计参数等值线图的变化 | 184 |
| 4.4 经纬度 1°网格最大点雨量发生年代变化的空间分布              | 192 |
| 4.5 多个地区及代表省暴雨年代际变化的分布                    | 194 |
| 4.6 最大 1d 雨量年代际变化及长期演变趋势分析                | 196 |
| 4.7 各地区大暴雨面积和大洪水的年代分布                     | 213 |
| 4.8 气候变化对暴雨洪水情势可能影响的展望                    | 220 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 第 5 章 | 中国气温与降水的变化趋势分析           | 226 |
| 5.1   | 主要气候模式简介                 | 226 |
| 5.2   | 计算分区与方法                  | 229 |
| 5.3   | 中国 14 分区预测气温分析           | 230 |
| 5.4   | 中国分区降水预测分析               | 248 |
| 5.5   | 气候模式模拟降水功能的分析与讨论         | 289 |
| 第 6 章 | 中国地表径流的变化分析及趋势展望         | 291 |
| 6.1   | 大尺度径流模拟思路与技术方法           | 291 |
| 6.2   | 多输入/单输出 (TLR) 系统模型及其应用   | 298 |
| 6.3   | 中国分区径流的年际变化              | 307 |
| 6.4   | 中国分区地表径流预测分析             | 316 |
| 6.5   | 中国未来气候要素变化分析与径流变化趋势展望    | 341 |
| 第 7 章 | 气候变化对中国水资源情势的影响及不确定性分析   | 343 |
| 7.1   | 气候变化影响的不确定性问题            | 343 |
| 7.2   | 处理不确定性的综合分析方法            | 356 |
| 7.3   | 气候模式预测中国分区水资源情势变化趋势分析    | 361 |
| 7.4   | 中国极端水旱情势可能变化趋势的总体估计      | 364 |
| 7.5   | 中国未来水资源及水旱情景可能演变的总体评估与展望 | 368 |
|       | 附表                       | 372 |
| 第 8 章 | 应对气候变化的中国水安全对策研究         | 390 |
| 8.1   | 中国水资源的脆弱性                | 390 |
| 8.2   | 应对气候变化的总体思路与战略           | 405 |
| 8.3   | 应对气候变化的中国水安全对策措施         | 417 |
|       | 参考文献                     | 428 |

# 绪 论

## 1. 气候变化的事实和影响

(1) 据 IPCC 估计, 1906~2005 年全球温度平均增高了  $0.74^{\circ}\text{C}$ , 近 50 年来每 10 年的增温率是过去 100 年的 2 倍。1901~2004 年全球陆地降水增加不很明显, 有些地方近几十年陆地降水还有所减少。从 1970 年起, 很干旱的地区增加了 2 倍多。整个 20 世纪, 海平面估计已上升了  $0.17\text{m}$ 。

IPCC 根据 21 个全球气候模式 (中等排放情景 A1B) 对中国地区未来的气温和降水可能变化进行了预测, 以中位数计, 2080~2099 年相对于 1980~1999 年, 气温增加  $3.3^{\circ}\text{C}$ , 降水增加 9%。

(2) 据中国《气候变化国家评估报告 (2007)》, 近 100 年来, 中国年平均气温升高了  $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ , 略高于同期全球增温平均值。近 100 年和近 50 年中国年降水量变化趋势不显著, 但区域降水变化的波动较大。中国年平均降水量在 20 世纪 50 年代以后开始逐渐减少, 平均每 10 年减少  $2.9\text{mm}$ , 但 1991~2000 年略有增加。从地域分布看, 华北大部分地区、西北东部和东北地区降水量明显减少, 平均每 10 年减少  $20\sim 40\text{mm}$ , 其中华北地区最为明显; 华南与西南地区降水明显增加, 平均每 10 年增加  $20\sim 60\text{mm}$ 。近 50 年来, 中国主要极端天气与气候事件出现的频率和强度出现了明显变化。华北和东北地区干旱趋重, 长江流域中下游地区和东南地区洪涝加重。1990 年以来, 多数年份全国年降水量高于常年, 出现南涝北旱的情势。20 世纪 50 年代以来, 中国沿海海平面每年上升了  $1.4\sim 3.2\text{mm}$ 。

(3) 据中国科学家估计, 中国未来气候变化总的趋势是: 温度持续攀升、降水总体增多、极端事件加剧、径流有增有减、海面不断升高、生态环境恶化。据《中国应对气候变化国家方案 (2007)》估计:

——与 2000 年相比, 2020 年中国年平均气温将升高  $1.3\sim 2.1^{\circ}\text{C}$ , 2050 年将升高  $2.3\sim 3.3^{\circ}\text{C}$ 。全国温度升高的幅度由南向北递增, 西北和东北地区温度上升明显。预计到 2030 年, 西北地区气温可能上升  $1.9\sim 2.3^{\circ}\text{C}$ , 西南可能上升  $1.6\sim 2.0^{\circ}\text{C}$ , 青藏高原可能上升  $2.2\sim 2.6^{\circ}\text{C}$ 。

——未来 50 年中国年平均降水量将呈增加趋势, 预计到 2020 年, 全国年平均降水量将可能增加  $2\%\sim 3\%$ , 到 2050 年可能增加  $5\%\sim 7\%$ 。其中东南沿海增幅最大。

——中国干旱区范围可能扩大、荒漠化可能性加重。

——气候变化已经引起了中国水资源分布的变化, 主要表现为近 40 年来中国海河、淮河、黄河、辽河、松花江等流域的水资源量多呈下降趋势, 北方地区干旱、南方地区洪涝等极端水文事件频繁发生。中国水资源在气候变化影响下最为脆弱的地区为海滦河流

域,其次为淮河、黄河流域,整个内陆河地区也因干旱少雨而非常脆弱。未来气候变化将对中国水资源的形势可能会产生较大的影响:一是未来 50~100 年,全国多年平均径流量在北方的宁夏、甘肃等省(自治区)可能明显减少,在南方的湖北、湖南等部分省份可能显著增加,表明气候变化将可能增加中国洪涝和干旱灾害发生的几率。二是未来 50~100 年,中国北方地区水资源短缺形势不容乐观,特别是宁夏、甘肃等省(区)的人均水资源短缺矛盾可能加剧。三是在水资源可持续开发利用的情况下,未来 50~100 年,全国大部分省份水资源供需基本平衡,但内蒙古、新疆、甘肃、宁夏等省(自治区)水资源供需矛盾可能进一步加剧。

(4) 本书以水利部和国家发展改革委员会以及相关部门组织的第二次全国水资源评价中经过还原和下垫面一致性处理后的 1956~2000 年全国同步天然径流系列成果为研究基础,进行了气候变化对水资源影响的分析,该径流系列能较好地反映近期下垫面条件下的产汇流规律。

从全国总体情况来看,近 20 年来,全国多年平均年降水深变化不大,1980~2000 年平均年降水深仅较 1956~1979 年增加 4.2mm;但是,南北方地区的变化差异却比较显著。20 世纪 80 年代后,北方大部分地区降水偏少,尤以海河、黄河中下游地区以及山东半岛最为明显,1980 年后 21 年与前 24 年系列相比,海河区降水偏少 10%、黄河区偏少 7.0%、辽河区偏少 2.6%,淮河区山东半岛和沂沭泗水系降水分别偏少 16%和 12%。南方大部分地区、西北部分地区和东北北部及东部地区后 21 较前 24 年系列降水偏多,长江区和东南诸河区后 21 年系列平均降水深比前 24 年系列平均降水深偏多 3%,松花江区偏多 5%,西北诸河区偏多 6.5%。

(5) 北方降雨径流关系发生一定变化的地区主要包括海河水系、滦河水系、辽河水系、黄河中下游地区、山东半岛和沂沭泗水系。这些地区正常降水条件下径流衰减幅度一般为 10%~20%,降水偏少条件下,其减少幅度一般可达 15%~40%。在黄河、淮河、海河、辽河 4 个水资源一级区合计的水资源衰减量中,由于降水偏少等气候因素导致的地表水资源量减少约占总减少量的 75%。其中辽河区由降水等因素减少的地表水资源量约占 40%,黄河区约占 60%,淮河区 and 海河区约占 80%。

(6) 对比两次(20 世纪 70~80 年代和 21 世纪初)全国水资源评价成果,全国水资源总量变化不大,但其水资源的地区变化及其组成变化显著,北方地区变化尤为突出。其中北方黄淮海辽 4 个水资源一级区降水减少 3.1%,地表水资源量减少 11%,地下水资源量减少 3.6%,水资源总量减少 6.0%。

(7) 在气候变化和人类开发利用的影响下,中国水生态环境状况也发生了变化,表现为:河流断流、湖泊萎缩、湿地退化、地下水超采、水土流失以及土壤盐渍化、草地林地退化、土地沙化等其他生态环境问题。

## 2. 本书的研究思路与方法

(1) 综合分析国内外研究成果,客观分析研究现状,评估结论、存在问题和难点。为了解与掌握国内外关于气候变化的研究现状,本书查阅了众多的文献,主要包括政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第 3、第 4 次评估报告,《中国应对气候变化国家方案



(2007)》,《气候变化国家评估报告(2007)》,以及相关论文、研究报告和专著等,并将其关于气候变化的事实分析、对未来气候变化趋势的评估以及应对策略、结论、问题和论点,浓缩性地摘要选入本书,作为笔者研究的基础,同时供读者查询参阅。

(2) 基础资料力求全面系统和权威,能够真实反映中国各地的气候变化和水资源状况变化。为了客观分析气候变化对我国水资源形势、干旱和暴雨洪水的影响,本书系统整合和分析了气象、水利、国土等有关部门大量的长期关于气象观测、水文观测、水资源和生态环境的监测资料,还利用了水利部水利水电规划设计总院组织完成的全国水资源调查评价成果资料,南京水利科学研究院完成的暴雨洪水调查资料以及其他相关的调查资料,水利部在组织开展流域综合规划中对全国主要江河流域的水文水资源调查分析资料等,利用全国统一的分区对资料进行了规范,力求全面客观地反映我国水资源形势的变化。

(3) 在对气候变化的影响分析中,力求将人类活动影响撇开,径流采用经过用水还原的天然径流。本书重点研究气候变化条件下中国水资源的变化趋势,鉴于中国水资源的96%为地表径流,因此,以研究地表径流的变化趋势为主。由于我国大部分江河实测径流兼受气候变化因素与人类活动作用交织的影响,为探求气候变化对径流的影响,本书将人类活动因素的作用作了剔除,因此,本书应用的径流资料是对实测流量进行用水还原后的资料,并对下垫面引起降雨径流关系较大变化的地区,进行了下垫面的一致性处理,从而使修正过的径流资料尽量接近现状下垫面条件下的天然情况。

(4) 根据气候尺度的要求,建立大尺度径流模型,实现从大范围气象要素到水文要素的转换。气候(Climate)是指地球上某一地区多年的天气和大气运动的综合情况,其表征要素包括各种气候要素的多年平均值,极值、变差和出现频率等。鉴于气候模式模拟与预测的气候变量尺度都比较大,而区域性(如中国,或其中某个地区)尺度都较小,因而在推求陆面径流时,国内外惯用的方法是通过降尺度途径将气候变量匹配到一个区域。经过分析计算,得到小流域径流,再通过某种方法(如地区综合)将之转换为大面积径流,这样难免产生尺度转换过程中的累积误差。为此,本书研制成功具有较高精度的大尺度水文模型,时间尺度不短于年,空间尺度在数十万平方公里以上,从而可以一站式将气候尺度的气候变量转变为长历时、大面积径流,减少了尺度转换带来的不确定性。

(5) 注重不同气候模式引起分析结果的不确定性,建立分析处理不确定性的综合方法。目前,预测未来气候变化趋势的主要方法是依靠气候模式,为了避免少数模式预测的不确定性,大多科学家们主张采用多模式预测的结果;然而,多模式又产生了不同模式预测结果差异很大的问题,产生了新的不确定性问题。为此,需要研究根据多模式多种预测结果凝炼出具有倾向性结果的方法。本书提出的加权平均综合评估法,旨在缩小多个模式预测结果的不确定性范围,以满足处理不确定性的需要。

(6) 把风险管理引入气候变化应对方案分析,以史为镜探求水资源未来变化情景,将气候模式预测结果和历史资料查证结合起来,综合评估未来水资源变化趋势及其风险。经过加权平均综合评估可以根据多个气候模式预测结果得到具有倾向性的结果,但这种结果也仅仅是一种平均变化趋势,如,未来水资源减少、增加,或稳定不变,而无法预测变化的情景,如洪涝的地区差异,水资源短缺的地区遭遇、连续干旱等;而这种气候变化特有的情景在历史上却曾发生过。因此,将模式预测与史料查证结合起来,从而大大丰富对

未来气候变化预测情景的评估。

### 3. 本书基本观点与特点

(1) 本书的基本观点如下。

一是中国的气候已经发生了较为显著的变化，保障经济社会可持续发展和生态文明建设要求回答未来气候如何变化。

二是气候预测是对某个长时段内气候要素和天气状况平均统计量的估计。气候预测必须考虑包括大气、海洋、大陆、冰雪、岩石圈、生物圈在内的气候系统内能量和物质交换以及天文因子的影响。此外，时间较长的气候预测，还要考虑到人类活动以及气候本身固有的随机变化对气候的影响。评估气候变化对水资源的影响，必须从气候时间尺度的视角，讨论气候变化影响下水资源多年平均统计量的变化，亦即评估未来若干年大范围内的多年平均径流统计量的变化。

三是国内外气候变化预估的主要方法是依靠气候模式对未来气候变化进行预测，然而，不同的模式预测存在许多不确定性，通过综合分析和加权平均，从众多不确定性中梳理出具有倾向性的变化趋势是增加预测可信度的有效方法。

四是根据对未来预测不确定趋势制定应对策略，是一种不确定性战略选择问题，具有很大的风险挑战，属于风险决策（风险管理）范畴。

五是未来气候变化万千，错综复杂，确定与不确定并存，常态与非常态共生，渐变与突变交替是风险的三大主要特征。有效地进行风险管理，必须认真辨识和科学对待风险的特征。对于预测结果，要有忧患意识，“不可不信，不可全信”，“宁可信其有，不可信其无”，这是因为，对待气候变化预测结果，如果全然不信，也就没有必要对未来气候变化进行预测与评估；如果全信，又如何处理不同模式预测的不同结果？要从最坏处着眼，多从可能造成不利于水安全方面考虑。

六是“模式预测”与“史料查证”相结合是处理不确定性、展望未来气候变化趋势的可行途径。

以史为镜，可以窥未来，风险管理中的一个非常重要的认识是：风险决策措施只能从概率意义上寻求最优，或者说从长期的角度寻求最优，即：风险决策大都以对期望值进行比较为基础，期望损益决策就是选择期望损失最小或期望效益最大的决策。

然而，气候变化影响水资源的风险决策最令人困惑之处恰恰在于结果事件的概率分布是很模糊的。决策者面对的不是发生概率比较确定的一种可能的未来变化，而是发生概率不清晰的多种可能的未来变化，基于后果发生概率计算的风险决策也就失去了直接比较期望值进行决策的基础，因而很难单纯遵循风险管理理论求得最优决策。

既然无法找到最优解，比较现实的决策思路就是设法寻找非劣解，走“史料查证”与“模式预测”相结合的道路。史料查证可以扫描旱涝交替史实，模式预测则可判断未来趋势方向。例如，自2009年9月起，中国南方连续数月出现了罕见的干旱，北方暴风雪一次又一次地肆虐，亦极为罕见，中国似乎进入剧烈的气候变化过程中。中国西南部五省（自治区、直辖市），遭遇的特大干旱，最早的地区，降雨量仅为常年的1/10，许多河流断流，两千多万人陷于饮用水短缺的境地。据史料查证，1963年和1906年旱情与2009～



2010 年旱情颇为类似。又据 17 个不同的气候模式预测,这次旱情席卷的长江上游和西南诸河分区,在 2011~2050 年,全部模式预测气温将持续上升,有近半数模式预测降水减少,有 12 个模式预测长江上游分区径流减少,10 个模式预测西南诸河分区前 20 年径流减少,有 12 个模式预测后 20 年径流可能增加,表明类似西南诸省这次发生的持续旱灾不仅历史上有过,预计未来几十年内也有发生的可能,这就为决策者评判该地区未来水资源的变化趋势,并作出应对持续干旱的决策提供了重要的参考依据。

(2) 本书的特点如下。

一是径流观测资料全部经过用水量还原,并对下垫面变化大的地区,进行了降水径流关系订正,从而使本书采用的径流资料系列尽可能接近近期下垫面条件下的天然情况,减少了气候变化分析中人类活动的干扰。

二是建立的大尺度水文模型,可以直接根据气候模式预测的大尺度(时间尺度为年,空间尺度在数十万平方公里以上)气温和降水要素推算不同分区的径流量,建立的大尺度水文模型基本满足水文模拟精度要求。

三是不轻信 1~2 个气候模式预测未来气候变化趋势的结果,也不单纯根据多数模式预测结果平均对未来气候变化趋势作出评估;而是根据有一定数量(例如半数以上模式)模式预测的结果,对几种预测趋势进行加权平均,经综合分析后,梳理成具有倾向性的趋势,作为模式预测结果;并从当地历史资料中提炼出重要的水旱灾害情景,结合模式预测结果,对地区未来气候变化趋势作出展望与评估。

## 4. 各章要点

### 第 1 章 要点:

(1) IPCC 评估气候变化主要采用了以下 3 种方法。

第一,利用气候模式对历史和未来气候要素进行模拟与预测。

IPCC 应用的气候模式有三大类,包括大气—海洋一般性环流模式(AOGCMs),中等复杂的地球系统模式(EMICs)和简单的气候模式(SCMs)。利用这些模式,根据温室气体浓度和按照排放情景(SRES)排出的成分对气候变化进行模拟。若干个模式根据同一种排放情景可以给出一系列的模拟值,得到一个取值范围。

多个模式相应于同一种排放情景模拟出的各模拟值形成一种频率分布,根据该频率分布,可以得到相应于不同指定频率的模拟值,例如,相应于 25%、50%、75%等频率的模拟值等。在预测 21 世纪区域温度和降水时,IPCC 利用 21 个气候模型,分别按照 A1B 排放情景(中等情况),对 1980~1999 年和 2080~2099 年两段时期的平均温度和降水进行模拟,并以 1980~1999 年平均温度与降水作为基础,分别求得 2080~2099 年平均温度和降水对 1980~1999 年平均温度与降水各自的差值,以及 21 个模式计算出的差值中的最小、最大、25%、中值(50%)和 75%相应的差值。根据需要,可以选用其中的某一差值作为预测值。

由于局地气候和区域下垫面的巨大差异,区域气候变化的模拟与预测要比全球气候变化的模拟和预测困难得多。IPCC 认为,目前没有任何一种气候模式可以对青藏高原的气候作出可以被接受的模拟和预测。一般而言,大气—海洋一般性环流模式(AOGCM)不

可能对小于  $200\text{km} \times 200\text{km}$  网格细部进行模拟。为模拟区域气候变化，一般需要依靠气候模式和降尺度 (Downscaling) 技术。降尺度技术包括动力学方法 (dynamic) 与统计学方法 (statistic) 两种，动力学方法在全球气候模式 (GCM) 的基础上，建立适合于区域尺度的区域气候模式 (RCM)，如加拿大区域气候模式 (CRCM, Canadian Regional Climate Model)；统计学方法依靠全球气候模式 (GCM) 对区域气候要素进行模拟，并将模拟结果 (如温度、降水) 与相应的实际观测成果建立相关关系，如果这种相关关系满足精度要求，则用这种相关关系将气候模式对未来气候要素所作出的预测值，订正为该区域选用的预测值。

第二，利用统计方法建立气候要素间的相关关系。

根据大气物理机制，分析气象气候要素与某些天气系统之间的因果关系，或气象气候要素之间的相关关系。科学家发现，气象气候因子之间，如副热带高压与东亚夏季风之间，以及气象气候因子与气候要素之间，如夏季风强弱与中国内地夏季降水之间存在某种相关关系。科学家还进一步发现，副热带高压与海面温度 (SST) 之间，以及夏季风强弱与中国内地夏季 (6~8 月) 平均气温之间存在相关关系。从而在未来气候变暖的大格局下，提供了根据这些相关关系预测未来中国降水的一种统计方法。

第三，利用古气候资料评估无观测记录前的气候特征，探讨气候本身固有的自然变率。

古气候研究根据对气候敏感的指标变化，窥测全球气候在过去几十年乃至数百万年间固有的自然变率 (Natural Variability)，例如树木的年轮宽度可能受到局地温度和降水的影响，因而常常代表着某些季节而非全年的气候状态。不过，时间愈久远，这种信息的不确定性因信息来源的稀少而逐渐加大。

古气候信息有助于解释至少在过去 1300 年间，20 世纪后半叶的气候变暖是不正常的。

在上一个间冰期 (interglacial period, 大约 12.5 万年前)，海平面可能要比 20 世纪海平面高出 4~6m，主要原因是极地冰体消融所致。根据冰芯资料的研究表明，当时的极地平均温度较现在高 3~5℃，这是地球轨道的差异引起的。格陵兰的冰层以及北极的其他冰区引起海平面上升不超过 4m，南极则是引起海平面上升的另一因素。IPCC 利用古气候资料得到有观测资料以前长时段的温度、降水以及海平面的数据，从而为研究更长时间气候要素的自然变率，提供重要的依据。

(2) 据 IPCC 估计：1906~2005 年全球温度平均增高了 0.74℃，近 50 年的每 10 年增温率是过去 100 年的 2 倍。1901~2004 年陆地降水增加不很明显，有些地方近几十年陆地降水还有所减少。从 1970 年起，很干旱的地区增加了 2 倍多。整个 20 世纪，海平面估计已上升 0.17m。

IPCC 根据 21 个全球气候模式 (中等排放情景 A1B) 对中国地区未来气温和降水的可能变化进行了预测，以中位数计，2080~2099 年相对于 1980~1999 年，气温增加 3.3℃，降水增加 9%。

(3) 《气候变化国家评估报告》指出，近 100 年来，中国年平均气温升高了 0.5~0.8℃，略高于同期全球增温平均值。近 100 年和近 50 年中国年降水量变化趋势不显著，



但区域降水变化波动较大。中国年平均降水量在 20 世纪 50 年代以后开始逐渐减少,平均每 10 年减少 2.9mm,但 1991 年到 2000 年略有增加。从地域分布看,华北大部分地区、西北东部和东北地区降水量明显减少,平均每 10 年减少 20~40mm,其中华北地区最为明显;华南与西南地区降水明显增加,平均每 10 年增加 20~60mm。近 50 年来,中国主要极端天气与气候事件的频率和强度出现了明显变化。华北和东北地区干旱趋重,长江流域中下游地区和东南地区洪涝加重。1990 年以来,多数年份全国年降水量高于常年,出现南涝北旱的情势。20 世纪 50 年代以来,中国沿海海平面每年上升了 1.4~3.2mm。

(4) 中国科学家估计,中国未来气候变化总的趋势是:温度持续攀升、降水总体增多、极端事件加剧、径流有增有减、海面不断升高、生态环境恶化。

《中国应对气候变化国家方案》估计:

——与 2000 年相比,2020 年中国年平均气温将可能升高 1.3~2.1℃,2050 年将升高 2.3~3.3℃。全国温度升高的幅度由南向北递增,西北和东北地区温度上升明显。预计到 2030 年,西北地区气温可能上升 1.9~2.3℃,西南可能上升 1.6~2.0℃,青藏高原可能上升 2.2~2.6℃。

——未来 50 年中国年平均降水量将呈增加趋势,预计到 2020 年,全国年平均降水量将增加 2%~3%,到 2050 年可能增加 5%~7%。其中东南沿海增幅最大。

——中国干旱区范围可能扩大、荒漠化可能性加重。

## 第 2 章 要点:

(1) 气候变化已经引起了中国水资源分布的变化,主要表现为近 40 年来中国海河、淮河、黄河、辽河的天然径流量呈下降趋势,北方干旱、南方洪涝等极端水文事件频繁发生。中国水资源对气候变化最脆弱的地区为海滦河流域,其次为淮河、黄河流域,整个内陆河地区由于干旱少雨非常脆弱。

(2) 未来气候变化将对中国水资源产生较大的影响:一是未来 50~100 年,全国多年平均径流量在北方的宁夏、甘肃等部分省(自治区)可能明显减少,在南方的湖北、湖南等部分省份可能显著增加,表明气候变化将可能增加中国洪涝和干旱灾害发生的几率。二是未来 50~100 年,中国北方地区水资源短缺形势不容乐观,特别是宁夏、甘肃等省(区)的人均水资源短缺矛盾可能加剧。三是在水资源可持续开发利用的情况下,未来 50~100 年,全国大部分省份水资源供需基本平衡,但内蒙古、新疆、甘肃、宁夏等省(自治区)水资源供需矛盾可能进一步加大。

(3) 气候变化由两方面因素引起:一是导致气候变异的外因(如温室气体排放和下垫面)改变;二是气候固有的自然波动规律,后者已持续亿万年,而且还将自然波动下去。据中国史料记载和孢粉、冰芯分析,证实中国历史上在工业化前曾出现过 5000 年的高温期和近几千年的冷暖交替期,物候发生过较大变异,树木年轮也显示出中国降水呈现周期振荡的趋势。这些史实对于认识气候变化的规律具有极重要意义。

(5) 根据水利部和国家发展和改革委员会会同相关部门组织的第二次全国水资源调查评价,按 1956~2000 年同步系列资料,全国多年平均降水深约为 650mm。降水深以东南诸河区最大,为 1787mm,西北诸河区最小,为 161mm。年降水深 200mm 以下面积约占全国的 26%,400mm 以东地区面积约占全国的 58%。年降水深 800mm 以上面积约占全