



科学方法大系

“十二五”国家重点图书出版规划项目

水文学方法研究丛书

气候变化对水资源的 影响模拟

Modelling the Impact of Climate
Change on Water Resources

〔英〕冯 辉 〔英〕A. 洛佩兹 〔英〕M. 钮 著

杨志勇 于赢东 严登华 邵薇薇
李光华 李孟南 译



科学出版社



科学方法大系

“十二五”国家重点图书出版规划项目

水文学方法研究丛书

气候变化对水资源的影响模拟

Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources

〔英〕冯 辉 〔英〕A. 洛佩兹 〔英〕M. 钮 著

杨志勇 于赢东 严登华 邵薇薇 李光华 李孟南 译

科学出版社

北京

图字: 01-2013-0910

内 容 简 介

本书针对气候变化对水资源影响模拟过程中存在的机遇与局限性,分别从天气和气候、区域气候降尺度、气候变化条件下的水资源供需、气候变化风险管理方法和气候变化对水资源影响模拟案例等多个方面进行了介绍和阐述。通过详细介绍气候降尺度方法、气候模式与水文模型耦合方法和气候变化风险管理方法,本书完整地描述了气候变化信息如何提供给水文模型并用于水资源系统模拟。为气候变化对水资源影响的相关研究者提供了完整的理论架构和技术示范。

本书可供高等院校和科研单位及从事气候变化对水资源影响、气候变化的应对与适应、水资源管理的专家学者、研究生及技术人员参考。

This edition first published 2011, © 2011 by Blackwell Publishing Ltd. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, except as permitted by UK Copyright, Designs and Patents Act 1988, without the prior permission of the publisher.

Chinese Translation Edition Copyright © Science Press, 2014. All rights reserved.

图书在版编目(CIP)数据

气候变化对水资源的影响模拟 / (英) 冯辉 (Fung, F.) 等著;
杨志勇等译. —北京: 科学出版社, 2016. 1

(水文学方法研究丛书)

书名原文: Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources

ISBN 978-7-03-046981-6

I. ①气… II. ①冯… ②杨… III. ①气候变化-影响-水资源-研究 IV. TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 311347 号

责任编辑: 李 敏 刘 超 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 黄华斌

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 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 14 3/4 插页: 2

字数: 350 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

创新方法工作专项项目 (2009IM020100, 2011IM011000)



《水文学方法研究丛书》编委会

主	编	胡四一			
编	委	陈志恺	刘昌明	王浩	王光谦
		张建云	钟登华	康绍忠	王超
		沈冰	芮孝芳	刘国纬	胡春宏
		许唯临	谈广鸣	唐洪武	夏军
		杨大文	丁晶	任立良	秦大庸
		严登华	王文圣	杨志勇	

本书主要作者

沃尔特·柯立钦：海军研究所，南大河州联邦大学，阿雷格里港，巴西

海利 J. 福勒：水资源系统研究实验室，土木工程与地球科学学院，纽卡斯尔大学，泰恩赛德，英国

冯辉：廷德尔气候变化研究中心，地理学院，牛津大学，英国

弗雷德里希·亨德里克：法国电力集团，法国

雷托·克努蒂：大气与气候科学研究所，苏黎世联邦理工学院，瑞士

A·洛佩兹：格兰瑟姆研究中心，伦敦政治经济学院，廷德尔气候变化研究中心，地理学院，牛津大学，英国

M·钮：地理学院，牛津大学，英国

罗德里格·派瓦：海军研究所，南大河州联邦大学，阿雷格里港，巴西

伊迪斯·比阿特丽斯·斯凯蒂尼：海军研究所，南大河州联邦大学，阿雷格里港，巴西

达西 A. 斯通：气候系统研究组，开普敦大学，隆德伯西，南非

简-飞利浦·维达尔：环境工程研究院，里昂第三大学，里昂，法国

格兰·瓦茨：监测与创新研究中心，环境署，布里斯托，英国

罗伯特 L. 威尔比：地理学院，拉夫堡大学，莱切斯特，英国

总 序

水文学和水资源学是水资源可持续利用的科学基础和技术手段。20 世纪 90 年代以来,由于人口、社会、经济的高速发展,除防洪形势依然严峻外,水资源短缺与水环境恶化的问题(并称为水问题)也突显出来,并成为国家可持续发展的制约因素。应对这些水问题,满足可持续发展所需要的水供给和水环境支持条件,自然成为这一时期水文学和水资源学研究的中心任务,这就向水文水资源科技工作者提出了新的更高要求。为防洪减灾提供水文水资源信息和知识支撑,需要加强特大洪水形成规律、水文信息采集传输预报调度决策现代化、非工程措施的研究;为水资源可持续利用提供科学基础,需要加强水资源形成、演化机理研究和全球变化对水资源影响的研究,注重水资源系统、经济社会系统、生态环境系统在其耦合演进过程中相互依存与相互制约定量关系的研究,以及水资源评价与规划、水资源承载能力评价、水资源开发利用与保护的研究;为生态安全和环境保护提供水文水资源知识服务,需要揭示水对于生态安全的控制机理和水作为环境要素的基础作用,研究不同自然地理条件下生态需水量计算方法,制定描述河流健康状态的评价体系和人类-经济社会-生态环境系统中水分配策略;在流域规划和工程设计中,需要加强高强度人类活动条件下的水文水资源预测研究,探索新的水文水资源分析计算途径与方法;为建设节水防污型社会提供水文水资源科技支撑,需要开发水资源循环再生利用、综合节水和水资源高效利用技术,建立水资源利用效率评价与水资源价值的综合核算方法,以及加强水管理制度安排和政策设计的科学基础与应用研究。

科学地认识和创造性地解决我国的水问题,离不开科学技术,水文和水资源领域的科技创新与技术进步将为我国水资源可持续利用提供坚实的科学理论和有效的关键技术。科技创新,方法先行,方法对路,事半功倍。随着水文学研究内容 and 应用方向的多样化,水文学界对学科发展的兴趣与日俱增,更加关注其学科方法和哲学基础,发展与创新传统的水文学研究方法,已成为解决我国在变化环境下复杂水问题的迫切需求。随着近几十年来科学技术的突飞猛进,大量新技术、新方法广泛应用于水文学研究,传统水文学方法也从技术进步中受益匪浅,促进了水文学研究方法体系的日趋成熟和完善。受数量化、系统论和信息技术的影



逐步实现了从传统水文学向现代水文学的过渡，即以学科综合交叉发展为主线，以天-地-一体化的系统视角，运用“原型观测+数值模拟+地理信息技术”的研究途径，模拟预测“自然-人工”范式下的二元水循环过程的演化趋势和动态变化，揭示水量、水沙、水质、水生态过程的耦合机制和相互作用，强调人类活动对水循环的重要性，注重复杂水资源系统的优化配置和综合调控，为提高水旱灾害的预测防控水平、提升水利工程的建管调控能力和加强水资源与水环境的协调管理提供科学原理及实践方法。在这一转变过程中，新的水文实验、水文观测、水文模拟、水文预测预报方法快速发展，在我国水问题研究和实践中获得了广泛应用，取得了丰硕的研究成果，水文学的方法体系也不断丰富完善，有力地推动了复杂水问题解决思路、研究平台和技术手段的现代化转型。系统回顾和总结水文学研究方法的发展历程，深入揭示水文学方法的演进规律和驱动机制，科学评估水文学方法的学科前沿和发展趋势，对于水文学的知识传承和学术创新发挥着基础性和先导性作用，对于进一步推动水文科学发展、实现水资源可持续利用具有重要意义。

2010年，中国水利水电科学研究院王浩院士和科学出版社共同发起，组织活跃在水文学研究领域的专家学者，成立了《水文学方法研究丛书》编委会。历经近三年的酝酿，通过组织召开多次编写工作协调会议及学术委员工作会议，在充分讨论并征求由多名院士组成的学术委员会意见的基础上，结合当前水文学方法研究中的热点和前沿问题，确定了《水文学方法研究丛书》的编写框架、主要内容、体例要求。丛书面向水文水资源相关领域学者、管理人员和基层水文工作者，针对不同读者的阅读需求，组织各主要分册编写。该丛书集成了当前国内外水文学研究领域主要的研究方法及相关的基本理论和分析思路，注重认识论和方法论层面的研究和总结，许多内容都是这些编著者多年潜心研究的成果，集中了众多水文学者的集体智慧，凝结了参与这项工作的全体同志的心血和汗水。该丛书的出版发行，必将助益于水文学科的传承和创新，进而对推动我国水文学科的发展发挥积极作用。

水利部副部长

2012年6月

原 书 序

这本书是我和我的同事、合作者花费大量时间完成的，本书分析了当前模拟气候变化对水资源影响过程中存在的机遇与局限性。全球气候模式通常通过降尺度到流域尺度或水资源系统模型尺度，他们是分析气候变化对水资源影响的有效工具。但是模型中的假设和可能出现的问题通常只对从事模型模拟工作的人公开，而对于想使用这些信息的人却是保密的。这本书的目的是清晰完整的描述气候变化信息如何提供给水文模型并用于水资源系统模拟。我们希望本书能够受到学生、研究人员和从业者的喜欢。

在此，我们要感谢对本书编写过程提供过帮助的所有人，同时要感谢牛津大学廷德尔研究中心的气候研究和地理与环境学院为本书提供的相关数据资料使得本书得以完成。

目 录

总序	
原书序	
第1章 引言	1
1.1 关键议题	2
1.2 本书结构	3
参考文献	4
延伸阅读	4
第2章 天气与气候	5
2.1 引言	5
2.2 气候模型	8
2.3 气候模型的输出	17
2.4 未来气候变化预测	24
2.5 对主要不确定性的理解	28
2.6 未来几年可能的研究进展	34
2.7 术语汇编	35
参考文献	37
延展阅读	38
第3章 区域气候降尺度	39
3.1 引言	39
3.2 数值天气预测中降尺度的起源	40
3.3 降尺度方法的回顾	41
3.4 降尺度概念的发展	58
3.5 降尺度的适用性	76
3.6 结论	80
参考文献	84
第4章 人类之水：气候变化与供水	103
4.1 简介	103
4.2 供水规划的水文分析	104
4.3 从水文到水资源可利用量：供需平衡	121

4.4 气候变化下的供水	141
参考文献	144
第5章 气候风险管理的新兴方法	151
参考文献	157
延伸阅读	158
第6章 实例研究	160
6.1 前言	160
6.2 案例1：气候变化对夸拉伊河流域地区水资源的影响	161
6.3 案例2：气候变化对水电的影响——以法国阿列日河流域为例 ...	174
6.4 实例3：英国西南部的水资源管理水平实例	190
参考文献	208

图版

第 1 章 引 言

冯 辉¹, A. 洛佩兹², M. 钮³

¹廷德尔气候变化研究中心, 地理学院, 牛津大学, 英国

²格兰瑟姆研究所, 伦敦经济学院, 英国

³地理学院, 牛津大学, 英国

人类活动对气候变化造成了影响这一事实已被联合国所有成员所接受, 并且很多国家已将此明确记入了国家法案 (例如英国《气候变化法案》, 2008)。目前人类社会已经普遍认识到人为因素对气候变化的影响, 即便这种影响可能已经有所缓和, 人类社会也必须采取行动来适应它 (New et al., 2009)。这种适应性措施首先需要对气候变化影响评价的基础科学和技术方法有全面的认识, 不仅涉及气候科学家, 也关系到食品及农业、生态系统、能源及基础设施等一系列领域的科学家、工程师和决策者, 而水资源作为所有生命的基础和几乎所有社会经济活动的必须资源, 在气候变化研究中吸纳水资源领域的相关研究人员尤为重要 (Bates et al., 2008)。

目前, 有关气候变化对水资源潜在影响的评价方法多种多样, 这些方法几乎都用到了气候模式数据和水文水资源模型。诸多复杂的气候模式被用来预测全球未来 100 年的气候变化情况, 但是却难以得出哪种模型预测的结果更为可靠的结论。整个气候变化影响模拟过程包括: 气候模式的选择、模式输出结果降尺度、水资源供需模拟三个过程。全面理解模拟中的每一个过程, 是正确理解模拟中涉及的假定和注意事项以及这些假定和参数对模拟结果的影响的基础。气候变化涉及诸多学科, 而多数学者是在自己的研究领域内进行相关研究, 然后通过相对平行的渠道将信息从研究气候模型的学者传递给水资源管理者, 因此会导致很多信息的缺失。虽然学者在气候变化领域已经公开发表了很多科技论文, 并且被广泛引用, 但是对于模型的假设及误差, 只有模型开发者才能全面了解, 而对其他希望利用这些信息的人却不公开。

因此, 虽然目前已经开展了大量的气候模型研究工作, 但模型的实际应用情况和模型传递给水资源管理者、水利工作者以及水资源决策者的信息情况却难以确定。

虽然气候变化是一个多学科交叉的议题, 但模拟过程中对每个步骤的优劣

评价也不需要面面俱到。本书将评价过程中模型开发者在每个阶段提出的假设和警告一一列出，为模型使用者提供指导。本书的写作目的是为学生、工作人员和决策者提供目前水资源系统模拟影响科学发展的关键问题，同时为更好地做出气候风险决策提供基础。

1.1 关键议题

本书拟通过讨论气候和水资源要素，给出气候变化模拟的理论和目前存在的问题，关键议题如下。

- 非平稳性。气候是非稳态的，也就是说观测到的数据并不能描述未来的气候状态。基于历史事件的水资源管理决策在未来水资源研究中可能并不适用。未来水资源管理决策制定方式可能会彻底改变。

- 不确定性叠加。要计算世界某一地区可利用的水资源量，通常的方法是利用气候模型数据，进行降水尺度处理与水文模型耦合。该过程的每个阶段，都有很多假设，其中可能涉及许多不确定性；这些不确定性在整个过程中从一个阶段传递到下一阶段。不确定性的叠加及其在对结果的解释方面的应用都需要通过模拟过程来进行评估。

- 方法评估。由于时间和资源的限制，从业者更倾向于已开发成熟、应用广泛的方法，而不是一系列需要继续研究的模型和方法。目前是否存在一个适用于气候变化背景下的评估模型和方法？对于某个特定的问题，确定性方法是否比其他方法更适用？本书对这些问题进行了探讨，但要寻求一个适用于各种情景的万全之策是不可能的。

- 社会-地球系统的交界面。水资源分布在人类和地球系统交界的地方，人类活动和气候变化直接影响水资源的分布。一旦人类系统、水资源系统和替代适应性选择方法引入到模型中，会使其更加复杂并且不稳定性增加。在不确定性背景下发展适应策略需要重视物理机制以及人类活动的影响（如人口增加、土地利用变化、经济及标准服务）。

- 数据分辨率。受影响的群体需要比目前全球气候模型模拟的时空尺度更为细致的数据。气候数据为相关决策者，尤其是研究流域尺度的决策者，提供极为重要的水资源管理信息。但是，这些尺度上的数据是否可靠？其中的一个亟待解决的问题，就是这些模型是否能解决洪水和干旱等极端天气事件。

1.2 本书结构

本书根据常用于评估气候变化对水资源影响的方法进行写作。首先是对介绍气候模型概况的介绍，其次是介绍将气候模型数据转化到地区尺度的降尺度方法，最后是水资源模型的应用。

达西·A. 斯通和雷托·克努蒂编写“天气与气候”一章中（第2章）介绍了气候模型。这一章主要从简单的探索性模型到综合环流模型描述了气候模拟的不同方法。主要讨论了气候的可预测性、气候模型评估及气候变化背景下预测的不确定性等问题。其中重点关注利用气候模型模拟得出的数据定量评估气候变化对水文的影响这一途径的可能性和局限性。

第3章是由罗伯特·L. 威尔比和海利·J. 福勒编写的“区域气候降尺度”，通过将气候模型数据降尺度处理为与水资源规划相关的时空尺度，将气候模型和水文/水资源模型联系起来。包括阐述已经应用在数据处理中的统计学和动力学方法，及其自身优势和局限性。最后探讨适用于改善决策制定的降尺度方法。

第4章“人类用水：气候变化与供水”中，格兰·瓦茨从气候变化背景下供需水问题的角度阐述了社会-地球系统的相互关系。利用目前基于水文地质的供需水模型来评估气候变化对水资源的影响。同时探讨了如何利用模型在极大不确定性背景下制定决策方案。

第5章“气候风险管理的新兴方法”中，我们讨论了如何将模型不同步骤中所得的数据应用到适应气候变化的决策制定中。虽然本书并不能得出一套完整的决策制定理论方法，但讨论了如何在更大的不确定性条件下将气候-水-水资源系统模拟更为高效地应用到决策制定中。

为了将第2章~第4章中所介绍的不同概念整合起来，本书最后一章列举一些典型案例，这些案例解释了前几章提到的气候风险评价类型。罗德里格·派瓦，沃尔特·柯立钦和伊迪斯·比阿特丽斯·斯凯蒂尼列举了一条跨越乌拉圭和巴西两国的跨国河流的影响评价的案例。同时也列举了两个欧洲的案例：简飞利浦·维达尔和弗雷德里希·亨德里克 阐明了利用高度复杂的降尺度方法确定气候变化对比利牛斯山水利工程影响程度的案例；安·洛佩兹阐述了如何利用大量气候模型数据来探索英格兰西南部水资源系统适应性方案。这些案例分析不一定是成功的典范，但是包含了目前科学家试图解决这些问题所用的方法。

参 考 文 献

- Bates, B. C. , Kundzewicz, Z. W. , Wu, S. and Palutikof, J. P. (eds) (2008) *Climate Chnage and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretatiat, Gneva, 210 pp.
- New, M. , Liverman, D. and Anderson, K. (2009) Mind the gap. Nature Reports Climate Change (0912) , 143-144.
- Availaiaable at; <http://dx.doi.org/10.1038/climate.2009.126>.

延伸阅读

本书中所列问题并未在其他书刊中有所涉及，但是以下文章可能有助于更好地理解本文。

- Garbreche, J. D. and Piehota, T. C. (2007) *Climate Variations, Climate Change, and Water Resources Engineering*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- Millr, K. and Yates, D. (2006) *Climate Change and Water Resources: A Primer For Municipal Water Providers*. American Water Works Research Foundation.
- Frederick, K. D. (2002) *Water Resources and Climate Change*, The Management of Water Resources; 2. Edward Elgar Publishing, Cheltenham.
- Kaczmarek, Z, (1996) *Water Resources Management in the Face of Climate/Hydrologic Uncertainties*. Water Science and Technology Library, Springer.

第2章 天气与气候

达西·A. 斯通¹, 雷托·克努蒂²

¹气候系统分析小组, 开普敦大学, 隆德伯西; 南非

²大气和气候科学研究所, 苏黎世联邦理工学院, 瑞士

2.1 引言

2.1.1 气候变化问题

气候变化不属于任何一门科学方法。对科学家而言, 将最近几个世纪有温室气体排放的情形与那些无温室气体排放的情形相对比是不科学的, 同时也是不可行的。此外, 科学家不可能构建出很多个地球来对其进行实验。因此, 目前我们仍停留在观测阶段, 期待进一步确定人类活动是否真正引起了足够显著的气候变化, 从而进一步验证已有证据。这个问题与人们试图建立的一种疾病与吸烟之间特定的联系时遇到的问题很类似。强制一部分随机抽取的人群吸几十年的烟, 而另一组随机抽取的人群不允许吸烟, 需等待几十年来观察其不同结果, 这是一个非常漫长的过程, 最终用肺癌和心脏病发病率的高低, 来验证之前的假设, 但是仍有很多其他疾病并不能与吸烟建立明确的关系。

然而, 人类活动排放的温室气体和吸烟是不同的。气候系统是一个物理系统, 其大尺度的模式受一些读者熟知的流体和辐射运动的法则所控制, 而人体本身是一个至今都未完全被理解的生物化学系统。这就意味着, 与人体不同, 理论上, 气候系统可以通过建立数字地球、建立一套基于计算机语言的数学规则被模拟出来, 这样研究人员就可以在模拟的地球上进行真实的科学实验。

当然, 这个过程在实践中会十分复杂。这是因为气候系统动力学机制中蕴含的法则可能很简单, 但是研究如此庞大的地球内部交互作用的过程异常复杂。同时, 维持并且改变大气中化学物质的生物化学过程也牵涉其中, 这对气候系统的运转是至关重要的, 但是至今人们尚未全面理解生物化学过程。将一个本质上无限复杂的系统压缩到一个有限的计算机结构中, 必然要寻找一些捷径。在通常的模型构架中, 这些捷径包括用粗略的估算值来进行更小时空尺度的模拟。以目前

电脑的精度来说，可模拟的精度在几百千米内意味着模拟的范围在几百千米范围内。

从表面上看，利用气候模型来解释气候变化对水文的影响并不乐观。云量和降水是水文学科两个重要的天气因素，而在气候模型中仅通过启发式算法来体现，而不进行直接的模拟。因此在类似的实验中可靠度就主要依赖于学者对这些估算的信任程度。事实上这些简化计算可能并没有想象的那么差，只是目前还不能确定。

纵观气候变化对水文影响的研究，仍有一定的应用前景。通俗来讲，气候变化经常被认为就是“全球变暖”，这也是有一定原因的。造成目前气候变化的主要原因是过去和目前温室气体的排放，尤其是二氧化碳的排放（IPCC，2007）。温室气体阻碍地球将能量再次辐射回太空，使地球从太阳辐射中获得的能量滞留在地球上的时间有所增加，虽然增加时间并不多，但是长期作用的结果便导致了地球变暖。云量和降水的变化是气候变化的二级表现。这是因为它们的变化是对变暖的响应，而不是对温室气体本身浓度增加（气溶胶浓度变化可以直接影响云量和降雨，但对气温的影响最强烈）的响应。因此在很多地区，目前乃至未来，气候变化对水文的最主要的影响都不是通过云量和降雨等相对变化程度较小的因子来体现，而是通过气温升高对水文循环的直接影响来产生，特别是地表和植被的蒸发以及蒸腾都将显著增加，雪盖萎缩并提前融化（Barnett et al., 2005, 2008）。由于气温的变化多发生在较大时空尺度上，因此，气温可以通过气候模型模拟，而非粗略估计。另外，多种潜在因子促使气候变化，变暖是对其最主要的响应特征，因此，可以认为气候模型是评估目前和未来变暖的相对精确的手段。在全球很多地区，气候变化对水文影响的研究主要关注的是水文系统对某些我们认为气候模型模拟良好的因子是如何响应的。

以上所述过程之间都存在着细微差别。本章讨论了气候模型的概念，它们能做什么、不能做什么以及从能从中获得什么信息。并试图对研究领域有一个全面的阐述，但是会重点关注与水文相关的问题。

2.1.2 气候和气候变化的界定

一个著名的气候学家在六岁时问自己的母亲：“妈妈，天气和气候有什么区别？”他已经有了一个很好的开始。令人难以置信的是，虽然目前全球对气候变化关注度极高，但并未对“气候”有普遍公认的定义。本章列举了三种普遍使用的定义（图 2.1），图中用高速公路上行驶的汽车来进行类比。很大程度上人们是从自己的专业以及“气候”在其专业中的作用来对“气候”进行定义，所