

“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



中国陆地水循环 演变与成因

罗勇 姜彤 夏军 等著



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

中国陆地水循环演变与成因

罗 勇 姜 彤 夏 军 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以我国长期观测的水文气象数据和最新气候模式为基础,采用国际上先进的诊断分析、检测分析等方法,按照一级水文分区对中国陆地水循环要素(大气通量、降水、径流、实际蒸发、土壤水分、地下水变化等)和水资源态势的演变进行了诊断分析和检测分析,阐述了其时间和空间变化规律,以及未来演变特征;通过区域气候模式进行数值模拟,揭示了陆地水循环要素和水资源格局的主要控制因素及其演化趋势,辨识了气候变化和人为活动因素对陆地水循环格局和水资源态势影响的相对贡献;对我国主要江河流域水文-气候数据序列进行了均一性等分析。

本书的出版深化了对我国陆地水循环要素变化和未来发展趋势的科学认识,为气候变化影响的归因和检测提供科学方法支撑,也为我国参加气候变化国际评估和国家评估提供科学支持,为区域水资源脆弱性与适应对策等相关研究提供基础科学信息。

本书适合与气候变化和水资源有关的政府部门、高等院校和科研院所从事教学、研究的人员以及相关专业研究生、本科生等阅读。

图书在版编目(CIP)数据

中国陆地水循环演变与成因 / 罗勇等著. —北京: 科学出版社, 2017. 9

(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 978-7-03-048097-2

I. ①中… II. ①罗… III. ①陆地-水循环-演变-研究-中国 ②陆地-水循环-成因-研究-中国 IV. ①P339

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 085549 号

责任编辑: 李 敏 周 杰 / 责任校对: 彭 涛

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张: 34 3/4 插页: 2

字数: 830 000

定价: 238.00 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		

《中国陆地水循环演变与成因》

撰写委员会

课题负责人 罗 勇

承担单位 国家气候中心

参加单位 国家气象信息中心

中国科学院大气物理研究所

山西省气候中心

河南省气候中心

安徽省气候中心

清华大学地球系统科学系

南京信息工程大学

中国气象科学研究院

中国科学院新疆生态与地理研究所

水利部水利信息中心

武汉大学

参加人员	罗 勇	姜 彤	夏 军	苏布达
	唐国利	王永光	高学杰	许红梅
	刘绿柳	李修仓	翟建青	张建松
	张冬峰	常 军	刘春蓁	张艳武
	吴 佳	石 英	曹丽娟	陈鲜艳
	孙赫敏	罗岚心	温姗姗	蹇东南
	邓汗青	黄金龙		

序

经过多年的潜心研究和充分准备，罗勇教授、姜彤研究员和夏军院士等撰写的专著《中国陆地水循环演变与成因》即将付梓出版。谨向作者团队表示热烈的祝贺！

自 2010 年以来，由国家气候中心等单位组成的研究团队承担了国家重点基础研究发展计划（973 计划）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”第一课题“季风区陆地水循环要素演变规律分析与成因辨识”的研究。课题组以增强应对气候变化对我国水资源安全影响与适应性对策的基础科学支持能力为目标，发挥课题承担单位掌握全国长期、动态、连续水文气象观测资料以及长期研究基础积累的优势，通过对气候变化背景下过去 50 年或更长时间的我国东部季风区主要流域水循环要素观测的事实分析与陆地水循环演变规律的深入研究，提出气候变化背景下我国东部季风区主要流域水循环变化的完整图像，正确辨识已经发生的人为因素和气候变化对陆地水循环各分量的影响，为科学认识气候变化下水循环响应机理，发展未来气候变化对水资源影响的概率预估与风险评估方法以及气候变化背景下“水文-气候双向耦合”模拟技术和水资源脆弱性评价理论与方法做出了重要贡献。这些成果可为应对气候变化对我国水资源安全的影响与适应对策的制定及南水北调等重大调水工程科学设计和安全运营提供科学基础信息和事实依据。

该书以该课题研究成果为基础，介绍了陆地水循环研究的数据基础，阐明了陆地水循环变化特征，估算了中国蒸散发量的变化，研究了陆地水循环要素极值的变化，揭示了陆地水循环要素变化的成因，还给出了陆地水循环要素预估及其不确定性。在此基础上，该书深入认识了过去 50 年或更长时间中国东部季风区主要流域水循环变化和水资源格局演变的完整图像，揭示了气候变化对中国水资源分布的格局（如“南涝北旱”）已经产生了哪些显著影响。

另外，该书还阐明了气候变化背景下我国极端旱涝等气候水文事件导致风险加剧的程度和概率，包括气候变化下南方调水区和北方受水区丰枯遭遇问题的严重性。上述结果能清楚地阐述我国水资源系统面临的气候变化与区域人类活动（经济社会发展）的双重影响，可为我国更好地适应气候变化对水资源的不利影响，加强适应性管理，趋利避害，提供有力的基础事实和科学依据。

该书是在气候变化与水循环和水资源研究领域最新的成果，适合与气候变化和水资源

有关的政府部门、高校和研究所从事教学和研究的人员，以及研究生和本科生等阅读。愿《中国陆地水循环演变与成因》早日出版，使更多感兴趣的读者能从本书的阅读中获得收益。

丁一汇

中国工程院院士

2016年9月

前 言

水循环是气候系统的大气圈、水圈、岩石圈、冰冻圈和生物圈各个圈层之间相互作用中最活跃且最重要的枢纽，在地球能量平衡中扮演着重要的角色，在全球气候和生态环境变化中发挥着至关重要的作用。近百年来，随着全球地表平均温度的升高，全球尺度降水、蒸发、水汽及土壤湿度和径流的分布、强度和极值都发生了变化，显示出气候变暖已对全球尺度水循环产生了一定程度的影响。由于存在着较大的时空分异，陆地水循环演变与成因以及未来变化预估的研究仍然存在相当大的不确定性。气候变化与水循环研究是地球系统科学与水科学的国际前沿。

本书是在国家重点基础研究发展计划（973 计划）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”（2010CB428400）第一课题“季风区陆地水循环要素演变规律分析与成因辨识”（2010CB428401）的研究成果基础上总结完成的。本课题以全球气候变化背景下我国东部季风区陆地水循环要素（水汽、降水、蒸发、土壤水分、径流和地下水）时空演变特征为研究对象，利用中国气象局和水利部的长期气象和水文观测资料，开展陆地水循环格局和水资源情势的时空演变规律和变化过程的检测及诊断研究；揭示陆地水循环要素和水资源格局的主要控制因素及其演化趋势，辨识气候变化和人为活动因素对陆地水循环格局和水资源情势影响的相对贡献，为建立大尺度陆地水循环模拟和数据同化系统、实现“陆地水文-区域气候”双向耦合模拟以及研究区域水资源脆弱性与适应对策提供基础科学信息。

本书研究了我国东部季风区及主要江河流域陆地水循环气候要素各种时间尺度的变化和变异，包括年代际变化、周期、突变和趋势；研究了我国东部季风区的主要流域地表和地下径流的年代际变化、周期、突变和趋势特征；进行了东部季风区及主要江河流域近 50~100 年极端气候与水文事件变化特征分析；在已有的降雨径流系数、降雨蒸发系数、大尺度水汽收支诊断、水循环强度指数以及时间序列的突变、周期和趋势统计分析和非线性动力学分析方法等的基础上，发展改进应用适合于我国东部季风区水循环变化特点的分析检测诊断理论方法。通过研究，更新了对我国东部季风区与主要流域水汽-降水-径流水量平衡及其年代际演变规律的科学认识，建立了季风区陆地水循环格局和水资源情势演变的完整图像；全面系统分析比较了我国东部季风区各主要流域潜在蒸散发和实际蒸散发的年代际时空变化规律与成因，有助于科学解决蒸发悖论问题；揭示了人类活动和自然强迫对

我国区域气候变化的相对贡献，辨识出我国东部地区降水和水资源情势的“南涝北旱”特征可能主要由自然强迫所主导。

本书共分7章。第1章引言，对中国陆地水循环演变与成因的研究进展进行综述，由张建松、罗勇和张艳武执笔。第2章陆地水循环数据基础，由唐国利、吴佳、石英、曹丽娟、翟建青和陈鲜艳执笔。第3章陆地水循环变化特征，由翟建青、孙赫敏、罗岚心、李修仓和姜彤执笔。第4章中国蒸散发变化特征及其成因，由李修仓、姜彤、温珊珊和蹇东南执笔。第5章陆地水循环要素极值变化，由苏布达、孙赫敏和黄金龙执笔。第6章陆地水循环要素变化成因，由王永光、张冬峰、高学杰、常军、邓汗青、刘春蓁、许红梅和夏军执笔。第7章陆地水循环要素预估及其不确定性，由许红梅、刘绿柳、高学杰、翟建青、苏布达和温珊珊执笔。全书由罗勇、姜彤、夏军统稿。

在本课题研究和本书撰写的过程中，得到了项目咨询专家组孙鸿烈院士、徐冠华院士、秦大河院士、刘昌明院士、郑度院士、丁一汇院士、陆大道院士、李小文院士、傅伯杰院士、王浩院士、周成虎院士、崔鹏院士等的精心指导。项目工作专家组夏军院士、王明星研究员、沈冰教授、蔡运龙教授、刘春蓁教授级高工、任国玉研究员、李原园研究员、戴永久教授、林朝晖研究员和姜文来研究员等提供了悉心帮助。项目首席夏军院士、其他课题组长段青云教授、谢正辉研究员、莫兴国研究员和刘志雨教授级高工也给予了大力支持。丁一汇院士为本书作序。参与本书编辑与绘图等工作的人员还有翟建青、秦建成、陈雪、周建、秦景秀和杨鹏等。科学出版社的周杰编辑对本书的编辑、出版付出了辛勤劳动。在此一并向他们表示衷心的感谢！

由于在全球气候变化背景下中国陆地水循环演变与成因科学问题复杂，本领域的科学研究正处于快速发展过程中，虽然作者在编写过程中投入了大量精力和时间，书中仍难免存在缺点和不足，恳请读者批评指正。

作 者

2016年3月

目 录

第1章 引言	1
1.1 全球及中国的气候变化	1
1.1.1 全球气候变化	1
1.1.2 中国气候变化	3
1.2 全球水循环变化	5
1.2.1 全球水循环的主要研究计划	5
1.2.2 全球水循环变化的主要研究领域	6
1.2.3 气候变化对水循环与水资源的影响研究	8
1.2.4 全球水循环变化的主要研究结论	8
1.3 中国陆地水循环演变	10
1.3.1 水平输送	11
1.3.2 降水	12
1.3.3 径流	13
1.3.4 蒸散发	13
1.3.5 极值变化	15
1.3.6 变化成因	16
1.3.7 变化预估	17
1.4 重要概念	18
1.4.1 气候变化	18
1.4.2 水循环	18
1.4.3 辐射强迫	18
1.4.4 检测和归因	19
1.4.5 不确定性	19
1.4.6 极端气候事件	19
第2章 陆地水循环数据基础	20
2.1 气象水文数据概述	20
2.1.1 定义和分类	20
2.1.2 基本属性	20
2.2 观测与再分析数据	21
2.2.1 气象观测数据	21
2.2.2 格点分析数据	45

2.2.3	水文观测数据	60
2.2.4	再分析数据	66
2.3	预估数据	68
2.3.1	全球气候模式	68
2.3.2	区域气候模式	69
2.3.3	中国地区气候变化预估数据	70
2.4	数据产品共享与应用	74
第3章	陆地水循环变化特征	76
3.1	概述	76
3.2	数据和方法	78
3.2.1	数据	78
3.2.2	方法	81
3.3	大气水汽的时空变化	85
3.3.1	探空资料的检验	86
3.3.2	大气可降水量	87
3.3.3	降水转化率	95
3.3.4	水汽收支	97
3.3.5	水汽通量	122
3.3.6	水汽输送影响范围	125
3.4	降水的时空变化	128
3.4.1	降水的时空变化	129
3.4.2	不同等级日降水天数的分布特征	133
3.5	蒸散发的时空变化	145
3.6	地表径流的时空变化	149
3.7	陆地水量平衡	152
第4章	中国蒸散发变化特征及其成因	156
4.1	概述	156
4.1.1	蒸散发相关概念	156
4.1.2	蒸散发理论研究进展	157
4.1.3	蒸散发时空变化研究进展	160
4.2	模型和计算方法	164
4.2.1	互补相关理论及互补关系判定	164
4.2.2	实际蒸散发模型及其率定	173
4.2.3	分析方法	178
4.3	实际蒸散发时空变化	181
4.3.1	松花江流域	181
4.3.2	海河流域	185

4.3.3 珠江流域	189
4.3.4 长江流域	193
4.3.5 黄河流域	195
4.3.6 塔里木河流域	197
4.3.7 辽河、淮河、东南诸河及西南诸河等	200
4.3.8 典型流域之间比较	207
4.4 实际蒸散发时空变异的原因分析	209
4.4.1 造成实际蒸散发时空变异的来源	209
4.4.2 实际蒸散发对气象要素的敏感性	209
4.4.3 实际蒸散发与主要气象要素的相关关系	216
4.4.4 实际蒸散发时空变异的可能原因	221
4.4.5 主要气象要素对实际蒸散发变化的定量化贡献	223
4.5 水分条件对实际蒸散发的定量化影响	226
4.5.1 蒸散发互补相关理论与 Budyko 水热耦合理论的内在联系	226
4.5.2 下垫面供水条件对实际蒸散发的影响	228
第5章 陆地水循环要素极值变化	230
5.1 概述	230
5.2 数据与方法	232
5.2.1 数据	232
5.2.2 方法	233
5.3 旱涝变化	242
5.3.1 空间分布	242
5.3.2 趋势变化	247
5.4 极值分布特征	253
5.4.1 空间分布	253
5.4.2 最优函数的选取	264
5.4.3 极端事件的重现期	283
5.4.4 重现期估算的不确定性	318
第6章 陆地水循环要素变化成因	334
6.1 资料和方法	334
6.1.1 气候要素和再分析资料	334
6.1.2 模式、试验设计和方法	335
6.2 季节内变化特征及成因分析	336
6.2.1 长江流域春夏季降水量变化特征	336
6.2.2 大气环流	347
6.3 年际尺度变化特征及成因分析	357
6.3.1 北半球积雪	357

6.3.2	海冰对中国降水的影响	361
6.3.3	海温对中国降水的影响	365
6.3.4	海温异常对长江流域降水的影响	370
6.4	年代际尺度变化特征及成因分析	374
6.4.1	近 50 年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征	374
6.4.2	年降水量和雨日的平均特征及长期变化	374
6.4.3	雨日长期变化的季节特征	378
6.4.4	降水量和雨日突变分析	385
6.4.5	年降水量及雨日减少的成因分析	386
6.4.6	结论	387
6.5	百年尺度变化特征及成因分析	387
6.5.1	水文归因	387
6.5.2	人为活动归因	392
第 7 章	陆地水循环要素预估及其不确定性	408
7.1	研究进展	408
7.1.1	概述	408
7.1.2	预估方法	409
7.1.3	不确定性	412
7.1.4	挑战	415
7.2	松花江流域水循环预估	415
7.2.1	数据及方法	416
7.2.2	气温和降水预估	418
7.2.3	径流量预估	423
7.2.4	小结	426
7.3	海河流域水循环预估	426
7.3.1	数据及方法	427
7.3.2	气温和降水预估	429
7.3.3	径流量	435
7.3.4	洪水强度和洪水频率	438
7.3.5	小结	439
7.4	黄河流域水循环预估	439
7.4.1	数据及方法	439
7.4.2	黄河上中游水循环变化预估	441
7.4.3	皇甫川子流域水循环变化预估	443
7.4.4	小结	445
7.5	淮河流域水循环预估	446
7.5.1	数据及方法	446

7.5.2 气温和降水预估	447
7.5.3 径流量预估	456
7.5.4 小结	464
7.6 长江流域水循环预估	464
7.6.1 数据及方法	465
7.6.2 气温和降水预估	471
7.6.3 径流量预估	476
7.6.4 小结	479
7.7 珠江流域水循环预估	480
7.7.1 研究区及数据概况	480
7.7.2 研究方法	481
7.7.3 气温和降水变化预估	484
7.7.4 径流变化预估	490
7.7.5 不确定性分析	501
7.7.6 小结	504
参考文献	505
附录	530
附录一：函数列表	530
附录二：引用函数列表	540

第1章 引言

本章基于联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernment Panel on Climate Change, IPCC）第五次评估报告和《第三次气候变化国家评估报告》对中国乃至全球气候变化的主要科学认识进行了简要介绍；总结了国际科学界与全球水循环相关的主要研究计划；梳理了全球水循环的大气过程、陆面过程以及陆-气相互作用的耦合等全球水循环变化的主要研究领域及其研究现状；对气候变化对水循环与水资源的影响研究进展进行了归纳分析，给出了全球水循环变化的主要研究结论，包括观测到的气候变化对水循环的影响和归因以及水文循环要素的情景预估等。本章从水汽水平输送、降水、径流、蒸散发和极值变化等方面综述了中国陆地水循环演变的总体态势，对观测到的演变成因进行了分析，对未来的可能变化进行了预估。最后，本章还介绍了一些与气候变化、水循环相关的重要概念。

1.1 全球及中国的气候变化

1.1.1 全球气候变化

全球气候变化是指全球气候平均值和离差值中的一个或二者同时在持续较长时间段（一般为10年或更长时间）内出现的统计学意义上的显著变化。平均值的升或降，表明气候平均状态发生的变化；而离差值增大，表明气候状态不稳定性增加，气候异常越发明显。全球气候变化既包括由自然原因造成的变化，还包括由于人类活动引起的变化。《联合国气候变化框架公约》中提到的气候变化则特指人类间接或直接活动导致气候发生的变化。

虽然全球气候变化目前已经成为人们普遍接受的事实，但是对全球气候变化问题的认识却经历着一个较缓慢的过程。经典的气候理论认为某地区长期的温度、湿度和气压的平均值是这个地区的气候状态。自20世纪80年代以来，现代气候理论提出了气候系统的概念，它是指一个由大气、水圈、冰冻圈、生物圈和岩石圈组成的高度复杂的系统。这些圈层内部存在着复杂的物理、化学和生物过程，各个圈层之间也不是独立的，而是存在着明显的相互作用。气候系统概念的提出，是现代气候理论的一个重要里程碑。20世纪90年代后，人们开始意识到不同时间尺度上发生的气候系统变化，其原因是不同的，这是一个重要的科学观念。总的来说，人为因素造成的气候变化比自然因素造成的气候变化更受重视，因为应对人为因素造成的气候变化既有减缓的问题，也有适应的问题；而对于自然因素造成的气候变化，只有适应问题。

联合国政府间气候变化专门委员会在其第五次评估报告 (AR5) 中指出, 1880 ~ 2012 年全球平均地表温度上升了 0.85°C ($0.65 \sim 1.06^{\circ}\text{C}$), 且陆地增温大于海洋, 高纬度地区大于中低纬度地区, 冬半年大于夏半年。在水循环变化、海洋变暖、冰冻圈退缩、海平面上升和极端天气气候事件变化等诸方面, 已能够检测到人类活动的贡献。为此, 有更充分的理由确信近百年来人类活动对气候变暖发挥着主导作用。最新的科学认知是, 人类活动导致了 20 世纪 50 年代以来全球一半以上的地区气候变暖, 这一结论的可信度超过 95%。

不同时期、不同季节全球地表温度的增加速率存在明显差异。通过对不同时段의增温趋势进行分析发现, 1910 ~ 1945 年和 1976 ~ 2000 年两个时期的增温速率相对较大, 其中后一个时期的增温速率最大; 而 1945 ~ 1976 年, 北半球大部分地区的年平均温度存在着下降趋势; 1976 ~ 2000 年, 全球地表冬季平均温度升高最为显著, 特别是以北半球中高纬度地区更为明显; 春季的增温幅度次之; 而秋季的增温幅度最弱, 某些地区还表现出降温趋势。总体上看, 近百年来地表年平均温度在全球绝大多数地区均表现为增高趋势。

全球气候变化已经并将继续对全球自然系统和人类系统产生深远影响, 而且有些影响将会是难以逆转的, 尤其是那些对气候变化特别敏感及脆弱的地方来说, 气候变化的影响更加强烈。目前, 尽管人们还不能全面预估气候变化带来的可能后果与风险, 但已有学者对全球气候变化的影响进行了大量研究, 其科学认识更加清晰。

气候变暖对人类赖以生活的水环境产生了巨大的影响, 如全球水资源分布改变、极端自然灾害频繁发生、海平面上升以及淡水资源短缺等。研究表明, 20 世纪全球陆地上的降水增加了 2% 左右, 但显然各个地区实际的变化并不一致。北半球中高纬度大陆地区降水的增多更明显, 北纬陆地降水量的平均增幅为 7% ~ 12%, 且以秋冬季节最为显著。北美洲大部分地区 20 世纪降水增幅为 5% ~ 10%, 欧洲北部地区在 20 世纪后半叶降水明显增多。但是, 在北半球的副热带陆地地区, 年降水量却明显减少。

气候变暖加剧了旱灾的次数和程度, 尤其是干旱的非洲, 许多地处于干旱和半干旱地区的发展中国家异常脆弱。1997 年在马拉喀什举行“第一届水资源论坛”, 发表的公报中指出, “人类正面临水资源危机”。国际水文地质学家协会主席迈克尔·奈特指出, 世界地下水资源有一半正在受到污染, 缺水现象会影响到 80 个国家和全世界 40% 的人口。国际水资源管理研究所在一项关于水资源日益紧缺的报告中指出, 21 世纪初世界 1/4 以上的人口将生活在严重缺水的地区。据预测, 到 2025 年出现缺水的大部分地区位于非洲和中东地区, 但是印度、中国的部分地区及秘鲁、英格兰和波兰也将会受到缺水的影响。有专家认为, 21 世纪水资源危机将取代能源危机, 成为人类所面临的最严重问题。

对全球海平面变化的研究表明, 全球平均海平面正在以每年 $1.0 \sim 2.0\text{mm}$ 的速度上升, 过去 100 年中, 全球海平面上升的最佳估算值为 $10 \sim 20\text{cm}$ 。根据第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 的气候预估以及对冰川和冰盖贡献的分析, 与 1986 ~ 2005 年相比, 2081 ~ 2100 年全球平均海平面上升区间可能为 $0.26 \sim 0.82\text{m}$ 。

全球气候变化研究的目标是描述和认识全球气候变化的过程以及导致全球气候变化的