

陈亚宁 等 著



中国西北干旱区

水资源研究

 科学出版社

中国西北干旱区水资源研究

陈亚宁等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从气候变化、水文循环、水资源构成等方面研究分析了中国西北干旱区的水文-水资源系统,解读气候变化背景下的水循环机制与极端水文事件的发生规律。通过对未来水资源变化趋势的预估分析,探讨了变化环境下的水资源供需平衡问题。结合对水资源开发利用问题的分析,提出了应对未来气候变化的水资源管理对策与建议。本书是对中国西北干旱区气候水文过程前沿科学成果的总结,旨在为保障西北干旱区经济社会可持续发展和生态安全提供科学依据。

本书面向从事干旱区地理学、环境学、水资源学、气候变化科学及管理学研究的科技与管理人员,特别是相关科研机构的专业研究人员和高等院校有关专业的师生及水资源管理和决策者。

图书在版编目(CIP)数据

中国西北干旱区水资源研究/陈亚宁等著. —北京:科学出版社,2014.9
ISBN 978-7-03-041689-6

I. ①中… II. ①陈… III. ①干旱区-水资源-研究-西北地区
IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 196483 号

责任编辑:李秀伟 白雪 / 责任校对:赵桂芬 刘亚琦
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:北京铭轩堂广告设计有限公司

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 9 月第一次印刷 印张:38 3/4 插页:18

字数:680 000

定价:238.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

水资源是西北干旱区经济社会发展的重要基础资源,对实现西部大开发宏伟战略目标至关重要。IPCC 第五次评估报告指出:1880-2012 年,全球平均地表温度升高了 0.85°C ,同时,预估到 21 世纪末全球平均地表温度在 1986-2005 年的基础上将升高 $0.3-4.8^{\circ}\text{C}$ 。全球变暖降低了水系统的稳定性,加剧了水资源的不确定性,加大了极端水文事件发生频率和水资源供需矛盾。为此,系统研究气候变化对西北干旱区水资源形成、转化和时空分布的影响,深化认识干旱区水循环过程和水系统脆弱性机制,预估全球变化环境下的水资源未来趋势,讨论分析水资源开发利用存在的问题,对提高干旱区水系统应对气候变化的能力、制定未来气候变化下的应对策略具有重要的现实意义。

西北干旱区地处中纬度地带,是全球气候变化响应最敏感地区之一。在气候变化和人类活动的综合影响下,西北干旱区以冰雪融水为基础的水资源系统非常脆弱。随着人口增长和经济社会发展对水资源需求的进一步增加,西北干旱区水资源问题将会更加突出,影响也更加深刻。西北干旱区相对丰富的自然资源与极端脆弱的生态环境交织在一起,水资源开发利用过程中生态与生产的矛盾始终是西北干旱区水资源开发利用与管理的核心问题。研究表明,未来气候变化将会进一步加大对西北干旱区水资源供给系统的影响,加剧干旱区水资源的紧缺形势,加大干旱区生态用水和经济用水的竞争,导致水资源开发利用中生态与生产之间的矛盾更加突出。随着我国现代化建设的推进和西部大开发战略的深入实施,以新疆为主体的西北干旱区在国家资源安全体系中的位置日显突出,将成为我国经济发展的重要支点。然而,如何确保西北干旱区生态安全与经济社会可持续发展、实现国家西部大开发宏伟战略目标,有诸多科学与技术问题需要研究和回答。西北干旱区已成为众多有志之士和科技工作者关注的热点地区。

《中国西北干旱区水资源研究》一书是中国科学院新疆生态与地理研究所陈亚宁研究员团队,结合多年的工作积累和资料诊断分析,对西北干旱区水资源问题的一个系统总结。该书从西北干旱区水资源研究的热点问题入

手,通过大量数据和案例,结合对西北干旱区水资源数量、时空分布、区域差异等特征的分析,系统研究了气候变化和人类活动对西北干旱区水资源形成、演变及水循环过程的影响,分析了西北干旱区径流组分特征和水资源构成,探讨了西北干旱区供需水问题,结合对水资源开发利用问题的分析,提出了应对未来气候变化的西北干旱区水资源管理对策与建议。研究成果为我国西北干旱区水资源高效利用和生态系统可持续管理提供了重要科学依据。

长期以来,许多科技同仁和各级政府都一直关注着西北干旱区的经济社会发展与生态安全问题,尤其关注着西北干旱区水资源的可持续利用,对其在全球气候变化和人类活动叠加影响下的水资源系统的脆弱性颇感忧虑。陈亚宁研究员和他的科研团队在解答这些问题的同时,在水资源管理创新方面提供了可行、可信的思路,值此《中国西北干旱区水资源研究》一书出版之际,我对陈亚宁及其研究团队表示祝贺,并期望各界人士对西北干旱区水资源的合理利用和生态环境保护给予更多的关注,为西北干旱区的生态安全、经济繁荣、社会稳定做出贡献。

秦大河

2014年6月于北京

序 二

水,作为干旱区最关键的资源和生态环境因子,不仅是绿洲生态系统构成、发展和稳定的基础,而且决定着干旱区绿洲化与荒漠化两类极其对立的生态环境的演化过程。当前,国际上就干旱区水资源及其相关生态环境问题研究的总趋势不再单纯就水论水,而是把干旱区水资源问题及其引起的环境变化和生态效应纳入流域、区域乃至全球变化系统,从自然、社会、经济耦合和系统综合方面开展研究,把影响水资源形成、转化和消耗的气候与水文、水资源联结起来,综合探讨水资源的动态变化及其生态、经济和社会效应。

我国西北干旱区,位于欧亚大陆腹地,约占我国陆地面积的 25%。山、盆相间的独特地貌,干旱少雨的气候条件,加之丰富的高山冰雪资源,使得西北干旱区水资源的形成、转化和水循环过程独具特色。中国西北干旱区与非洲、西亚及澳大利亚等干旱区不同的是,周边及中部发育着众多高大的山系。这些高大的山体截获高空传输的水汽,产生较多的降水,在山区形成大面积冰川和积雪,为西北干旱区绿洲的形成、发育提供了丰富的水源。长期以来,该地区水资源依靠自然界独特的水循环过程保持着脆弱的平衡关系。

西北干旱区的经济布局 and 结构、经济发展速度和规模及区域生态和环境问题等无不与水密切相关。水资源问题是西北干旱区经济社会发展首要解决的关键问题。近 50 年来,全球气温持续上升加速了水循环,导致全球不同尺度水资源的重新分配。西北干旱区由于其特殊的地理位置和地貌特点,对全球变化的响应十分敏感。随着人口压力的增加和水土资源开发活动的日益扩大,西北干旱区水资源利用过程中的生态与经济问题日益突出,气候变化引起的水资源量及其时空分布的变化,导致流域内绿洲经济与荒漠生态两大系统的水资源供需矛盾更加突出,给水资源管理带来了新的问题和严峻的挑战。

《中国西北干旱区水资源研究》是陈亚宁博士和他的研究团队多年从事干旱区水资源研究的一个系统总结。全书以气候变化对水循环要素和水资源的形成、演变、开发和利用的影响为主线,以系统论的观点,从气候—水文过程剖析了气候变化对西北干旱区水资源的影响,辨析了自然因素与人类活

动对水文、水资源变化的影响程度,讨论了全球变化环境下极端水文事件的发生特点,揭示了水循环特征和水资源的组分,剖析了供需水问题,在此基础上,有针对性地提出了西北干旱区水资源可持续利用与管理的对策建议。研究成果对于西北干旱区水资源合理调配、经济社会可持续发展具有重要的科学意义和应用价值。

该书包含了陈亚宁博士团队的最新研究成果,内容丰富、资料翔实,是一部优秀的学术著作,是他们扎根西北、艰苦卓绝的研究结晶,是知识和奉献的完美结合。

值此书出版之际,我谨表示诚挚的祝贺和敬意,并期望该书的出版激励更多的年轻科研人员继续努力,为实现我国西北干旱区生态安全、经济社会的可持续发展做出更大贡献!



2014年6月于北京

前 言

气候变化与水资源问题是当今各国政府部门、学术界和社会公众普遍关注的热点,在过去半个世纪,西北干旱区的气温上升速率为 $0.33\text{--}0.39^{\circ}\text{C}/10$ 年,明显高于全国($0.25\text{--}0.29^{\circ}\text{C}/10$ 年)和全球平均水平($0.13^{\circ}\text{C}/10$ 年),是在全球变化背景下响应最敏感的地区之一。

中国西北干旱区地处欧亚大陆腹地,远离海洋,气候干燥,降水稀少,是世界上最干旱的地区之一。中国西北干旱区以山、盆相间的地貌格局为特点,构成了以山地—绿洲—荒漠三大生态系统为基本特征的特殊自然单元,进行着以水为主要驱动力和纽带的物质运移与能量转化,水资源的形成、转化及水循环过程独特,诸多科学问题需要解读。

水资源是西北干旱区基本保障性自然资源和战略性经济资源,是制约经济社会发展、生态环境建设的最关键因素。研究表明,气候变化将导致西北干旱区水资源的可再生性降低,水循环系统的稳定性下降,加剧西北干旱区水资源供给的不确定性,加大极端水文事件发生频率和强度。

西北干旱区是多条国际河流的发源地,气候变化导致的水资源不稳定性正在引发中亚邻国间新的矛盾,不断的水冲突及气候变化对水循环的影响正成为国际关注的焦点。随着人口增长和经济社会发展对水资源需求的进一步增加,西北干旱区水资源的供需问题将会更加突出,水资源开发利用过程中的生产与生态的矛盾会进一步加剧。气候变化对西北干旱区水资源形成、转化及水循环过程的影响,以及西北干旱区未来水资源变化趋势等重大科学问题急需解答。

本书针对中国西北干旱区气候变化及其对水资源影响的热点问题,以水过程为主线,以山地—绿洲—荒漠三大生态系统为脉络,对中国西北干旱区水资源系统进行了分析研究。采用多种技术手段,从不同角度对气候、水文过程和水系统稳定性进行剖析,探讨西北干旱区水文、水资源对气候变化的响应,解读气候变化背景下的水循环机理与极端水文事件的发生规律,划分西北干旱区径流组分和水资源构成,为应对气候变化、确保西北干旱区经济社会可持续发展提供科学依据。

本书是在国家重点基础研究发展计划项目“气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究”(2010CB951003)资助下完成,包含了课题组主要成员的辛勤工作,以及我的学生李宝富、李奇虎、杨余辉、李稚、范煜婷等博士论文最新研究成果。全书约 68 万字,分为 10 章。第一章主要介绍西北干旱区的水资源数量及分布,对西北干旱区水资源研究的热点问题进行了分析;第二至第四章阐述了西北干旱区气候、水文、水资源系统及水文、水资源对气候变化和人类活动的响应;第五、第六章从水循环的重要组成部分——蒸散发和径流组分入手,分析了西北干旱区水循环特征和水资源组分问题;第七章采用多种方法和模型,对未来不同气候变化情景下西北干旱区典型流域的径流变化趋势进行了预估;第八章分析了气候变化下极端水文事件的变化趋势和特征;第九章从农业、工业、生活及生态用水等方面分析了西北干旱区供需水问题;第十章对西北干旱区水资源管理面临的挑战及水资源开发利用问题进行了剖析,提出水资源管理对策与建议。各章参与编写的人员:第一至第四章,陈亚宁、李宝富、陈忠升;第五、第六章,李稚、范煜婷、陈亚宁;第七章,徐宗学、刘兆飞;第八章,陈亚宁、王怀军、孙桂丽;第九章,沈彦俊、郭斌、李硕;第十章,陈亚宁。陈亚宁对全书进行统稿和总纂。

本研究得到了科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院新疆生态与地理研究所等单位的大力支持;得到了秦大河院士、王浩院士、刘昌明院士、吴国雄院士、丁一汇院士、傅伯杰院士、张建云院士及傅小峰、王静、张耀、王苏民、丁永建、史培军、宋长青、冷疏影、蔡运龙、谢正辉、李忠勤等领导和专家的指导和帮助,中国科学院院士秦大河、傅伯杰分别为本书写序。在此一并表示最诚挚的感谢。

陈亚宁

2014 年 6 月于乌鲁木齐

目 录

序一

序二

前言

第一章 西北干旱区水资源分布及特征	1
第一节 西北干旱区水资源特点	2
一、水资源的形成	2
二、水资源赋存形式	3
三、水资源数量	8
四、水资源特征	16
第二节 西北干旱区水资源区域差异性	21
一、水资源分布的区域差异	22
二、水资源可利用量的区域差异	25
三、水储量变化的区域差异	32
第三节 水资源研究现状与热点问题	36
一、水汽来源与气候变化	37
二、蒸发潜力与实际蒸散发	40
三、冰川水资源变化	43
四、水资源构成与径流分割	44
五、流域水循环问题	46
六、气候模式和水文模型	47
七、水系统脆弱性与水资源安全	49
参考文献	50
第二章 西北干旱区水资源形成的气象因素	57
第一节 研究方法 with 数据	58
一、研究方法	58
二、数据来源	63
第二节 西北干旱区气温变化特征	63

一、气温变化趋势分析	64
二、气温突变检测	83
三、气温变化归因分析	85
第三节 西北干旱区降水变化特征	93
一、西北干旱区水汽通量特征	94
二、降水变化趋势分析	98
三、降水突变检测	113
第四节 西北干旱区未来气候变化分析	115
一、西北干旱区未来气温变化趋势	115
二、西北干旱区未来降水变化趋势	119
小结	122
参考文献	122
第三章 西北干旱区水文水资源系统	127
第一节 不同时空尺度径流变化特征	128
一、数据来源及处理	128
二、年径流变化特征	129
三、径流四季变化特征	147
第二节 径流变化的周期性检验	148
一、北疆径流周期分析	149
二、南疆径流周期分析	150
三、河西走廊径流周期分析	154
第三节 径流的未来变化趋势	154
一、统计模型及经验性模型	154
二、北疆径流变化趋势	155
三、南疆径流变化趋势	159
四、河西走廊径流变化趋势	167
五、典型案例分析	168
小结	170
参考文献	171
第四章 气候变化对水文水资源的影响	173
第一节 径流变化的原因分析	173
一、径流与气候因子的关系	174

二、径流对 0℃ 层高度变化的响应	190
第二节 径流对气候变化的敏感性分析	206
一、不同敏感性计算方法对比	206
二、气候变化对典型河流径流的影响	208
第三节 气候和人类活动对径流的影响	210
一、典型源流区气候和人文要素的量化	210
二、典型干流区气候和人文要素的量化	215
三、气候和人类活动对博斯腾湖入湖径流影响的定量分析	220
第四节 气候变化对冰雪水资源的影响	225
一、冰川对气候变化的响应	226
二、冰川融水对河川径流的影响	229
三、不确定性分析	242
四、积雪对气候变化的响应	243
小结	258
参考文献	259
第五章 西北干旱区蒸散发时空变化分析	263
第一节 蒸散发研究的理论基础	263
一、蒸散发不同概念的理解	263
二、蒸发悖反观点的提出	264
三、蒸发正比和互补理论	265
第二节 蒸发潜力变化趋势及归因	266
一、蒸发皿蒸发时空变化差异及原因	266
二、潜在蒸散发时空变化差异及原因	280
第三节 基于遥感和 SEBAL 模型的实际蒸散发估算	287
一、SEBAL 模型物理基础	288
二、SEBAL 模型辅助数据	292
三、典型案例分析	293
第四节 不同时空尺度上实际蒸散发与蒸发潜力的关系	300
一、基于水热平衡原理计算年尺度实际蒸散发	300
二、年际尺度上实际蒸散发与蒸发潜力的关系	301
三、年内日尺度上典型流域实际蒸散发与蒸发潜力的关系	304
四、干旱区水循环过程的响应探讨	305

小结	307
参考文献	308
第六章 西北干旱区水资源构成与径流组分特征	311
第一节 径流组分及贡献量分析	312
一、研究方法	312
二、基于同位素技术的径流组分分析	317
三、冰雪融水补给特征及贡献量	325
第二节 基流分割特征及贡献量	327
一、研究方法	327
二、基流分割结果	330
三、基流量变化特征	334
第三节 地表水、地下水转化及贡献量	336
一、研究方法	336
二、不同水体的稳定同位素组成特征	336
三、水化学特征分析	338
四、地表水对地下水的补给量	340
第四节 径流组分对气候变化的响应	343
一、研究方法	343
二、基流对气候变化的响应	344
三、冰川对增温的响应	356
小结	358
参考文献	360
第七章 气候变化情景及其对径流的影响	365
第一节 区域气候变化影响研究进展	365
第二节 典型流域的 GCM 评价	367
一、数据	367
二、基于秩打分的 GCM 评价方法	370
三、各个要素的 GCM 评价	372
四、GCM 综合评价及敏感性分析	386
第三节 统计降尺度模型在塔里木河流域的适用性评价	391
一、数据	391
二、方法介绍	392

三、降尺度结果比较分析	396
第四节 塔里木河流域源区未来气温和降水变化分析	407
一、源区未来最高和最低气温变化分析	407
二、源区未来降水变化分析	413
第五节 塔里木河流域源区径流对未来气候变化的响应	415
一、气候变化对源流区径流时间变化特征的影响	416
二、气候变化对源流区径流空间分布特征的影响	418
小结	423
参考文献	424
第八章 西北干旱区极端水文事件研究	429
第一节 极端水文事件研究进展	429
一、问题的提出	429
二、极端水文事件研究成为热点	431
第二节 气候极值的变化	432
一、冷极值	435
二、暖极值	441
三、日较差	444
四、气温极值的比较	445
五、降水极值	445
六、极值、均值与高程的关系	447
第三节 极端水文事件的时空变化	451
一、极端水文事件年内分布	454
二、极端水文事件年际及年代际变化	457
三、极端水文事件的变异	459
四、极端水文事件的空间分布	460
第四节 气候变化与极端水文事件的关系	464
一、极端水文事件与气候的关系	465
二、与流域气候的关系	466
三、极端水文事件对气候变化的响应	471
第五节 西北干旱区气候极值跃变及其影响因子	474
一、气候极值区域趋势研究	476
二、气温、降水极值空间差异分析	478

三、气候极值突变研究	480
四、极端高温和极端降水时间频率间的关系	483
五、气候极值态变化对均值态的贡献率	484
六、气温、降水突变的可能原因分析	486
第六节 径流极值特征与遥相关	488
一、水文极值的变化	489
二、频率分析	491
三、与环流变量的相关分析	493
四、水文极值与环流指标的小波一致性分析	496
小结	499
参考文献	501
第九章 西北干旱区供需水分析	508
第一节 西北干旱区农业用水特征分析	508
一、西北干旱区农业生产概况	508
二、农业用水的影响因素分析	510
三、西北干旱区农业灌溉需水量的计算	512
四、西北干旱区农业灌溉需水量的时空变化特征	517
第二节 西北干旱区工业用水特征分析	523
一、工业用水的影响因素分析	523
二、西北干旱区工业用水的计算	524
三、西北干旱区工业用水时空变化特征	529
第三节 西北干旱区生活用水特征分析	533
一、生活用水的影响因素分析	533
二、西北干旱区生活用水的计算	534
三、西北干旱区生活用水时空变化特征	540
第四节 气候变化对西北干旱区农业用水的影响	546
一、气候变化对西北干旱区作物生长期的影响	546
二、气候变化对西北干旱区作物灌溉需水量的影响	550
第五节 西北干旱区水资源供需分析及预测	552
一、西北干旱区水资源供需分析	552
二、气候变化情景下的作物灌溉需水量	558
三、不同应对策略的情景分析	562

小结	566
参考文献	567
第十章 西北干旱区水资源开发利用与管理	571
第一节 水资源管理面临的挑战	571
一、水-生态-社会经济系统复杂	572
二、水资源多元构成	574
三、水循环过程独特	575
四、水资源的不确定性加大	576
第二节 水资源开发存在的问题	577
一、资源性缺水	577
二、工程性缺水	579
三、浪费性缺水	581
第三节 水资源管理对策与建议	582
一、深化水资源管理体制与机制创新	584
二、制定落实最严格的水资源管理制度	585
三、加快实施退耕还牧、退地减水行动计划	586
四、构建地表水、地下水的统一管理机制	586
五、加快“南水西调”方案的研究实施	587
参考文献	588
附录一 作者发表的相关论文目录	590
附录二 近 5 年培养的与本研究相关的硕士、博士学位论文目录	599
索引	600
彩图	

第一章 西北干旱区水资源分布及特征

中国水资源总量为 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 居世界第 6 位, 但人均水资源量少, 仅为世界人均占有量的 28%, 是全球人均水资源最贫乏的国家之一, 居世界第 109 位, 属 13 个最贫水国家之一。耕地亩^①均水资源量不足世界平均水平的一半, 水资源十分匮乏。同时, 中国又是世界上用水量最多的国家, 目前中国淡水取用量达到 $6500 \times 10^8 \text{ m}^3$, 大约占世界淡水年取用量的 14%, 是美国年淡水供应量 $4700 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 1.4 倍。

中国西北干旱区系指昆仑山—祁连山以北、贺兰山以西的广大西北内陆干旱区, 地理坐标介于 73°E - 106°E 和 35°N - 50°N 之间, 行政范围包括新疆、甘肃河西走廊、内蒙古自治区阿拉善高原及黄河宁夏段以西的宁夏回族自治区部分, 土地面积约占中国总土地面积的 1/4, 但地表水年径流总量不足全国径流总量的 3.5%。

中国西北干旱区地处欧亚大陆腹地, 远离海洋, 降水较少, 是世界上最干旱的地区之一。中国西北干旱区与非洲、西亚、澳大利亚等地的干旱区不同的是: 周边及中部发育着众多高大的山系。例如, 北部有阿尔泰山, 南部有喀喇昆仑山、昆仑山、阿尔金山和祁连山, 天山山脉横亘于新疆中部, 在中国境内东西长约 1500km。这些高大的山体截获高空传输的水汽, 产生较多的降水, 形成大面积现代冰川和积雪, 成为西北干旱区的湿岛, 为西北干旱荒漠区绿洲的形成、发育提供了源源不断的水源。

中国西北干旱区平均年降水量约 230mm, 蒸发能力为降水量的 8-10 倍。由于受高山峻岭的阻隔, 山区降水较丰富, 并且发育着大面积现代冰川, 为径流形成区, 西北干旱区的水资源主要形成于山区。平原区降水稀少, 为径流失散区。平原区降水大多在 100mm 以下, 以荒漠为主体。新疆的塔里木盆地年降水量甚至低于 50mm, 是我国最干旱的一个水文地区。

中国西北干旱区不同区域和地带的降水功能不同。分布在山区的降水既有水文意义, 可以产生径流, 也有生态意义, 可以支撑山区天然植物的生

① 1 亩 $\approx 666.67 \text{ m}^2$