

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

区域干旱形成机制与 风险应对

严登华 翁白莎 王浩 秦天玲 史晓亮 等著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

区域干旱形成机制与 风险应对

严登华 翁白莎 王浩 秦天玲 史晓亮 等著



科学出版社

北京

内 容 简 介

全书由四篇共 20 章构成。第一篇是理论与技术,介绍了广义干旱风险评价与风险应对的理论框架、技术体系以及模拟模型。第二篇是海河流域干旱时空演变特征,介绍了不同干旱指标在海河流域的应用,识别流域干旱驱动机制,以及分析流域干旱时空演变特征。第三篇是东辽河流域广义干旱风险评价与综合应对,识别流域广义干旱驱动机制,量化评价流域广义干旱,介绍了流域广义干旱风险评价与风险区划,以及风险应对。第四篇是滦河流域干旱驱动机制识别及量化评价,介绍了流域径流演变归因识别,以及流域干旱评价研究。

本书可供水文水资源学科的科研人员、大学教师和相关专业的研究生,以及从事水利工程规划与管理专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

区域干旱形成机制与风险应对 / 严登华等著. —北京: 科学出版社, 2014. 1

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-128965-7

I. 区… II. 严… III. 海河—流域—干旱—研究 IV. P426.615

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第251566号

责任编辑: 李 敏 张 震 周 杰 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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

*

2014年1月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年1月第一次印刷 印张: 22 插页: 2

字数: 530 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

国家自然科学基金面上项目 (51279207)

“十二五”国家科技支撑计划课题 (2012BAC19B03)

国家重点基础研究发展计划 (973计划) 课题 (2010CB951102)

科技部创新方法工作专项项目 (2011IM011000)

资助

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在2010年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域973计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步奖一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河973计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011年10月10日

序

随着经济社会的快速发展，在以全球变暖为主要特征的气候变化背景下，人类社会水资源的需求量可能会越来越大，但容易开发利用的水资源越来越少，因此，面对频繁发生的干旱现象，人类社会显得更加脆弱，干旱的影响越来越大。干旱不仅会导致巨大的经济损失，还会造成大范围的环境退化，表现为冰川融化、雪线上升、森林减少和草地荒漠化。干旱对于社会的影响也是巨大的，特别是在经济相对滞后的国家，干旱会导致贫穷、饥荒、社会动荡、种族冲突和战争等社会问题。我国位于亚洲季风气候区，加之三级阶梯状的地貌格局，从根本上决定了我国大范围干旱频发的背景，且近些年来干旱范围和程度均有逐渐增加的趋势，严重威胁到了我国的粮食安全和经济社会的发展。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，不同行业用水竞争激烈，干旱问题极其突出。

干旱是一个世界性的难题。为了应对干旱，我国成立了国家防汛抗旱总指挥部，发布了《国家防汛抗旱应急预案》，近年又编制了《全国抗旱规划》，地方政府也成立了相应的本级指挥机构，颁布了有关抗旱的地方法规。此外，在水文情报预报等方面，我国建立了国家防汛抗旱水文气象综合信息系统，为全国大范围的干旱监测和分析预测以及国家抗旱调度决策提供科学依据和技术支撑。但是，目前的抗旱工作，基础研究相对薄弱，对干旱发生的机理及其变化的复杂性认识不够，缺乏较为科学合理的旱情、旱灾统计分析评价指标体系。目前的抗旱管理基本上还是采用危机管理的方法，缺乏以防为主意识，区域经济布局结构未考虑干旱缺水的因素及其影响，对包括生态用水在内的全面抗旱缺乏认识。

《区域干旱形成机制与风险应对》一书从水资源系统的角度，明晰广义干旱的内涵，提出广义干旱定量化评价指标体系；结合自然气候变化、人为气候变化、下垫面条件改变、水利工程调节对干旱事件的影响特性，构建广义干旱演变整体驱动模式，并定量识别其驱动机制；结合干旱事件演变的确定性和随机性特征，提出广义干旱风险评价方法和基于3S技术的广义干旱风险区划方法；从节流与开源两方面提出广义干旱风险应对措施，并评估应对措施的实施效果；选取干旱事件频发的海河流域和东辽河流域为研究区，进行广义干旱风险评价与应对的实例研究，对于增强区域应对干旱的能力，提升流域抗旱的管

理水平，具有重要的意义。

作者作为课题负责人参加了本人主持的“全球变化国家重大基础研究专项：气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估”项目的研究工作，并主持第二课题的研究。作者在系统总结课题研究成果和多年在干旱风险评价与风险应对方面的研究成果的基础上写作此书，对全球变化的干旱问题和抗旱管理进行了比较系统的探讨，是干旱风险评价与风险应对方面的创新力作。该书的出版发行，将推动水文水资源学科的发展，有利于国家的抗旱减灾工作，还将推动气候变化与资源环境领域的研究创新，对我国综合应对气候变化将起到积极的作用。

是为序。

“全球变化国家重大基础研究专项：气候变化对黄淮海
地区水循环的影响机理和水资源安全评估”首席科学家
南京水利科学研究院院长
中国工程院院士



2013 年 10 月

前 言

在气候变化和人类活动的影响下，世界范围内的干旱总体呈现出频发、多发、连发和并发态势。随着以增温为主要特征的气候变化影响的深入，气候系统的稳定性降低，干旱、洪涝等极端气象水文事件发生的概率及其影响将进一步增加。干旱在我国每年都会发生，平均2~3年就会发生一次严重的干旱灾害。干旱不仅发生在水资源相对匮乏的北方地区，在水资源相对丰富的南方地区也频繁发生。近年来，我国频繁出现多个破历史纪录的极端干旱事件。干旱已成为经济社会可持续发展的重大障碍性因素之一，识别变化环境下干旱演变规律及驱动机制，并对其进行综合应对，已受到政府部门、社会公众和科研人员的广泛关注，同时也是水文水资源研究领域的前沿和热点问题。

本书围绕变化环境下干旱综合应对的重大实践需求，以“自然-人工”二元水循环为主线，从水资源系统的角度，明晰广义干旱的内涵，并提出广义干旱定量化评价指标体系；结合自然气候变化、人为气候变化、下垫面条件改变、水利工程调节对干旱事件的影响特性，构建广义干旱演变整体驱动模式，并定量识别其驱动机制；结合干旱事件演变的确定性和随机性特征，提出广义干旱风险评价方法和基于3S技术的广义干旱风险区划方法；从节流与开源两方面提出广义干旱风险应对措施，并评估应对措施的实施效果。选取干旱事件频发的海河流域和东辽河流域为研究区，进行广义干旱风险评价与应对的实证研究。本研究统一了气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱，进一步发展了变化环境下干旱应对理论与技术，并为海河流域和东辽河流域干旱综合应对提供了科学依据。

本书共分四篇：第一篇是理论与技术，介绍广义干旱风险评价与风险应对的理论框架与技术体系，由严登华、王浩、翁白莎、王刚编写；第二篇是海河流域干旱时空演变特征，由马海娇、翁白莎编写；第三篇是东辽河流域广义干旱风险评价与综合应对，由翁白莎编写，赵志轩、金鑫、胡东来、王道源、王坤、高宇、刘少华等人参与了本部分内容的野外实验工作；第四篇是滦河流域干旱驱动机制识别及定量化评价，由史晓亮、秦天玲编写，张诚、袁勇、郝彩莲、袁喆、尹军、董国强、李立新等人参与了本部分内容的野外实验工作。全书由翁白莎、史晓亮和秦天玲进行统稿校核，并由严登华和王浩最后审定。

本书研究工作得到了国家自然科学基金面上项目“基于水资源系统的广义干旱风险评

价与风险区划研究”(编号:51279207)、“十二五”国家科技支撑计划课题“气候变化对水资源影响与风险评估技术”(编号:2012BAC19B03)、国家重点基础研究发展计划(973计划)课题“气候变化对旱涝灾害的影响及风险评估”(编号:2010CB951102)、科技部创新方法工作专项项目“新时期我国水文学集合方法研究与应用”(编号:2011IM011000)的资助。在上述项目研究中,中国水利水电科学研究院水资源研究所肖伟华、杨志勇、杨贵羽、鲁帆、李传哲、于赢东等给予了很多帮助。本书在模型方面得到了贾仰文教授的辛勤指导和耐心帮助。

“气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估”项目首席科学家张建业院士对课题二研究以及本书的出版,给予了诸多指导、督促和建议,特此致以衷心的感谢。

由于研究本身的复杂性,加之时间仓促和受水平所限,书中错漏之处敬请批评指正。

作者

2013年10月

目 录

总序
序
前言

第一篇 理论与技术

第1章 绪论	3
1.1 研究背景与意义	3
1.1.1 选题背景	3
1.1.2 理论背景	5
1.1.3 拟解决的关键科学问题	8
1.1.4 研究意义	8
1.2 国内外研究动态与趋势	9
1.2.1 干旱驱动机制研究进展	9
1.2.2 干旱评价指标研究进展	10
1.2.3 干旱风险评价研究进展	13
1.2.4 干旱风险区划研究进展	14
1.2.5 干旱风险应对研究进展	14
1.3 区域干旱应对存在问题	16
1.4 研究内容与技术路线	16
1.4.1 研究内容	16
1.4.2 技术路线	18
第2章 广义干旱风险评价与风险应对理论框架及技术体系	20
2.1 广义干旱的内涵	20
2.2 广义干旱的驱动机制	25
2.3 广义干旱的定量评价	26
2.3.1 广义供水量	27
2.3.2 广义需水量	28
2.3.3 广义干旱评价指标	28

2.4	广义干旱的风险评价	30
2.5	广义干旱的风险区划	32
2.6	广义干旱的综合应对	34
第3章	广义干旱风险评价与风险应对模拟模型	36
3.1	需求分析与整体开发思路	36
3.2	WEP-GD 模型结构	37
3.3	WEP-GD 模型要素过程	38

第二篇 海河流域干旱时空演变特征

第4章	研究区概况	43
4.1	自然地理条件	43
4.1.1	地形地貌	43
4.1.2	水文气象	44
4.1.3	土壤植被	44
4.1.4	河流水系	44
4.2	社会经济状况	45
4.3	水资源及开发利用概况	46
4.4	历史旱情概况	47
第5章	不同干旱指标在海河流域的应用	48
5.1	数据准备	48
5.2	干旱指标的选取	49
5.3	干旱指标的应用结果	50
5.3.1	典型旱灾年旱情空间分布对比	50
5.3.2	典型研究区的应用结果对比	71
第6章	海河流域干旱驱动模式识别	73
6.1	气候变化	73
6.2	下垫面条件（土地利用）变化	74
6.3	水利工程条件	74
6.4	流域干旱驱动模式	75
第7章	海河流域干旱时空演变特征	77
7.1	干旱时间变化特征分析	77
7.2	干旱空间变化特征分析	83

第 8 章 小结	88
----------------	----

第三篇 东辽河流域广义干旱风险评价与综合应对

第 9 章 研究区概况	91
9.1 流域自然地理概况	91
9.1.1 地理位置	91
9.1.2 地质地貌	91
9.1.3 河流水系	92
9.1.4 气候水文	94
9.1.5 土壤特征	97
9.1.6 植被特征	104
9.2 流域社会经济概况	106
9.3 流域土地利用概况	107
9.4 流域水资源概况	107
9.4.1 流域水资源量	107
9.4.2 流域水资源开发利用程度	108
9.5 流域历史旱情概况	108
9.5.1 流域干旱灾害特征	108
9.5.2 流域干旱灾害发展趋势	109
第 10 章 东辽河流域广义干旱驱动机制识别	111
10.1 流域气象水文要素演变规律分析	111
10.1.1 大气水汽含量	111
10.1.2 降水量	120
10.1.3 气温值	121
10.1.4 潜在蒸发量	122
10.1.5 天然径流量	124
10.1.6 土壤含水量	127
10.2 流域下垫面条件演变规律分析	128
10.2.1 土地利用条件	128
10.2.2 水利工程条件	136
10.3 流域广义干旱驱动模式识别	138
第 11 章 WEP-GD 模型在东辽河流域的应用	140
11.1 输入数据及格式化处理	140

11.1.1	数字高程信息	141
11.1.2	土壤信息	148
11.1.3	土地利用信息	149
11.1.4	气象水文信息	150
11.1.5	水利工程信息	155
11.1.6	社会经济及供用水信息	156
11.2	模型校验与验证	156
第 12 章	东辽河流域广义干旱定量化评价	161
12.1	流域广义干旱评价指标构建	161
12.1.1	指标构建	161
12.1.2	指标验证	165
12.2	流域广义干旱评价指标模拟效果分析	167
12.2.1	对比 DI 指标与 SPI 指标模拟结果	168
12.2.2	对比 DI 指标与 PDSI 指标模拟结果	171
12.2.3	对比 DI 指标与 RWD 指标模拟结果	173
12.3	流域广义干旱评价内容识别	176
12.4	流域广义干旱时空分布规律	177
12.4.1	流域广义干旱次数分布规律	177
12.4.2	流域广义干旱持续时间分布规律	184
12.4.3	流域广义干旱强度分布规律	192
第 13 章	东辽河流域广义干旱风险评价与风险区划	200
13.1	流域广义干旱风险评价方法	200
13.1.1	边缘分布函数的确定	200
13.1.2	联合分布函数的选取	204
13.1.3	重现期分析	207
13.1.4	流域广义干旱风险分析	209
13.2	不同驱动力作用下的流域广义干旱风险分析	212
13.2.1	自然气候变化情景	213
13.2.2	人为气候变化情景	215
13.2.3	下垫面条件变化情景	218
13.2.4	水利工程调节情景	220
13.2.5	综合分析	223
第 14 章	东辽河流域广义干旱风险应对	225
14.1	应对目标	225
14.2	应对策略	225

14.3 解决方案	225
14.3.1 提高农田灌溉水利用系数	225
14.3.2 减少田间土面蒸发	227
14.3.3 流域外调水	232
14.4 应对措施	245
第15章 小结	246

第四篇 滦河流域干旱驱动机制识别及定量化评价

第16章 研究区概况	251
16.1 自然地理概况	251
16.1.1 地理位置	251
16.1.2 自然地理条件	252
16.2 社会经济概况	255
16.2.1 行政区划与人口	255
16.2.2 社会经济发展情况	256
16.2.3 水利工程建设	256
16.3 水资源与历史旱情概况	256
16.3.1 流域水资源量和开发利用程度	256
16.3.2 流域历史旱情概况	257
第17章 基于 SWAT 模型的滦河流域分布式水文模拟	258
17.1 SWAT 模型原理及结构	258
17.2 SWAT 模型数据库的构建	260
17.2.1 数据格式与坐标系统	261
17.2.2 数据库构建过程	261
17.3 降水空间分布不确定性对分布式流域水文模拟的影响	266
17.3.1 雨量站降水数据时间维尺度扩展方法	267
17.3.2 武烈河流域 SWAT 模型构建	268
17.3.3 降水输入的不确定性分析	271
17.3.4 降水输入对分布式径流模拟结果的影响	273
17.4 SWAT 模型在滦河流域分布式水文模拟中的适用性	275
17.4.1 流域离散化与模拟方法选择	275
17.4.2 基于 SWAT 模型的滦河流域分布式水文模拟	275

第 18 章 滦河流域径流演变归因识别	279
18.1 流域水文气象要素演变规律分析	279
18.1.1 降水量	279
18.1.2 气温	282
18.1.3 潜在蒸发量	283
18.1.4 天然径流量	285
18.2 滦河流域径流演变归因识别方法	286
18.2.1 水文序列阶段划分	287
18.2.2 天然径流量模拟	289
18.3 滦河流域气候与人类活动对径流影响的归因识别	292
18.3.1 流域径流量变化归因的年际特征	292
18.3.2 流域径流量变化归因的年内特征	292
第 19 章 滦河流域干旱评价研究	294
19.1 基于分布式水文模拟的流域干旱评价模式构建	294
19.1.1 基于水分平衡的水分距平指数计算	294
19.1.2 干旱指标计算	296
19.1.3 权重因子修正	297
19.2 干旱评价模式验证	298
19.2.1 历史干旱事件过程验证	298
19.2.2 典型干旱年份旱情发展的空间分布验证	299
19.3 滦河流域干旱时空分布特征	301
19.3.1 流域干旱影响范围演变特征	301
19.3.2 流域干旱频率空间分布特征	303
19.3.3 流域干旱持续时间空间分布	304
19.3.4 流域干旱强度空间分布特征	305
19.4 滦河流域土地利用/覆被变化的干旱响应	307
19.4.1 土地利用/覆被变化对干旱影响范围的影响	307
19.4.2 土地利用/覆被变化对干旱频率的影响	308
19.4.3 土地利用/覆被变化对干旱持续时间的影响	309
19.4.4 土地利用/覆被变化对干旱强度的影响	311
19.5 滦河流域干旱应对措施	312
第 20 章 小结	314
参考文献	316
附表	326

第一篇 理论与技术

