

“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

海河流域二元水循环模式与 水资源演变机理

王建华 王 浩 秦大庸 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

海河流域二元水循环模式与 水资源演变机理

王建华 王 浩 秦大庸 等 著



科学出版社

内 容 简 介

本书是国家“973”项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”第一课题“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”研究成果的提炼和升华。人类活动对水循环影响机理及其演变规律是当前全球性的科学前沿问题,本书在理论技术层面上,系统提出了流域二元水循环理论模式、驱动机理,并构建了二元水循环概念性模型;在应用层面上,分析了海河流域“万年-千年-百年”尺度上水循环演变历程和变化规律,初步提出了海河流域城市、农业等典型单元水循环过程、水资源演变机理及其调控途径,并指出了进一步深入研究的科学技术问题。

本书可供水文水资源、生态与资源环境、气候及气象、水利经济、资源经济等领域的科技工作者、管理工作者和相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

海河流域二元水循环模式与水资源演变机理 / 王建华等著. —北京: 科学出版社, 2015. 7

(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 978-7-03-045335-8

I. 海… * 王… III. 海河-流域-水循环-研究 IV. P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第186568号

责任编辑: 李 霞 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 肖 兴 / 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

*

2015年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015年8月第一次印刷 印张: 16 插页: 2

字数: 600 000

定价: 138.00 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) 项目 (2006CB403401)

水利部和财政部专项 (水综节水[2006]50号)

中国工程院重大咨询项目 (2012-ZD-13-6)

国家自然科学基金项目 (51409274)

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

自人类活动出现以来，随着对自然改造能力的逐步增强，人工动力大大改变了水循环的天然模式，尤其在人类活动密集区域甚至超过了自然作用力的影响，水循环过程呈现出越来越强的“自然—社会”二元特性。传统自然水循环研究一般较少考虑人类活动，随着当前人类活动不断增强，流域下垫面和径流特性变化显著，相应研究成果失真越来越多。另一方面，在社会水循环研究方面，由于自然水循环过程直接和间接受人类活动干预，将自然循环的水量作为外部静态输入也会造成与自然水循环过程的脱节。综合而言，目前人类活动对于水文循环和水资源形成与演化过程的干扰已引起了广泛的关注，开展二元水循环模式和水资源演变机理的研究已成为现代水文科学和水资源科学的前沿领域。

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”中设立了“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”课题，研究取得了系统丰富的研究成果。一是在以往研究的基础上，针对人类活动对天然水循环影响的作用机制、人工水循环在水资源消耗属性上的区别、人工水循环系统在服务功能上的子系统分类等各个层面对二元水循环理论进行了研究，总结提出了较为系统的二元水循环理论模式；二是以二元水循环理论为指导，对二元水循环概念模型的整体构建及其嵌套构成进行了研究探讨，提出了包含海陆模式、流域模式、农业模式、城市模式、受干扰土地模式五类模式在内的二元水循环概念模型；三是研究了不同时间尺度海河流域的水循环演变历程，重点总结了近 50 年以来海河流域在气候变化、地表大规模拦蓄、土地利用和地下水强烈超采等人类活动影响下的水循环演变趋势，并对海河流域水资源演变机理及其影响因素进行了归因识别；四是以海河流域典型城市和典型农业区为单元，对其水循环演变规律和演变机理开展了详细解析，并预测了未来演变的重要影响因子，提出了相关控制性指标。

该书提出的理论和模式、获取的实验数据和重要发现提高了对高强度人类活动影响下缺水流域二元水循环规律的认知水平，有力支撑了海河流域水循环模拟和调控实践。由于人类活动对流域水循环系统的作用机制和水资源演变机理本身是复杂的，存在诸多

已知和未知的影响因素及关联机制，科学认知流域二元水循环过程及其演变因子，掌握其中的作用机理和科学规律是一项长期研究任务，构建系统完善的二元水循环理论及其技术研究体系需要水文水资源及相关领域的学者和研究人员不断探索和创新。望该书的出版能为促进二元水循环理论体系的研究发展，拓宽本方向的研究思路和积累相关研究经验提供有益的参考。

中国工程院院士



2015年5月6日

前 言

在没有人类活动或人类活动干扰可忽略的情况下,流域水分循环过程只在太阳辐射、重力势能等自然力作用下驱动,也称为“一元”流域水循环。自人类活动出现以来,随着对自然改造能力的逐步增强,人工动力大大改变了天然水循环的模式,在现代环境下,部分人类活动密集区域人工动力甚至超过了自然作用力的影响,水循环过程呈现出越来越强的“自然—社会”二元特性。当前人类对自然的干预能力越来越强,社会经济发展对水资源的需求量也越来越大,然而科技水平的局限性使得人类对水循环二元化规律及伴生效应机制认识的不尽充分,导致了一些不合理的开发利用水资源的行为方式,使得局部地区和流域天然和谐的水循环平衡被打破,严重影响了水循环的再生性,并引起与水循环密切相关的生态环境不断恶化,进而削弱了生态环境对人类社会经济发展的支撑作用,阻碍了社会和经济及生态的可持续发展。因此,需要在充分认识水循环二元化模式及研究其量化技术方法的基础上,尊重客观规律,把握主要矛盾,运用可持续发展的思想指导水资源开发利用,以保障水资源的健康良性循环,有效促进人-水和谐稳定发展。

目前,人类活动对水文循环和水资源形成与演化过程的干扰虽已引起了广泛的关注,并成为现代水文科学和水资源科学的前沿,但水循环二元化系统理论,不同人类活动对水循环的内在驱动机制、演变规律和影响程度,二元驱动作用下的水资源演变机理等研究仍处于探索阶段。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”设立了“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”课题,主要研究内容为在完善流域“自然—人工”二元水循环理论模式的基础上,开展不同层次和尺度单元水循环研究,揭示高强度人类活动对于水循环分项过程与整个系统演变的作用机制,以及由此衍生的水资源结构与效用次生演变机理和效应等,从而揭示“自然—人工”二元驱动下的水循环和水资源演变规律。

本书是海河“973”项目第1课题相关研究成果的系统总结,其中提出的理论和模式、获取的实验数据和重要发现提高了对高强度人类活动影响下缺水流域二元水循环的认知水平,有力支撑了海河流域水循环模拟和调控实践。本研究的基础成果不仅适用于半湿润半干旱气候的缺水地区,如我国北方的黄河流域、淮河流域和松辽流域,同样也适用于

其他气候带缺水地区，如西北干旱半干旱地区。

本书主要有两部分内容，共9章。第一部分叙述原理与方法，包括第1~4章；第二部分为海河流域应用，包括第5~9章。第1章由王建华、翟正丽、周祖昊、何国华执笔；第2章由王建华、秦大庸、陆垂裕、李海红、褚俊英、桑学锋执笔；第3章由陆垂裕、孙青言、张俊娥、葛怀凤、秦韬执笔；第4章由陆垂裕、张俊娥、苟思、孙青言、李慧执笔；第5章由刘家宏、郭迎新、张伟、郑跃军、徐鹤、李文鹏执笔；第6章由秦大庸、杨志勇、袁喆、于赢东、尹军、郭迎新执笔；第7章由褚俊英、栾清华、刘扬、秦韬执笔；第8章由李海红、桑学锋、邵薇薇、李科江、陈娟执笔；第9章由王浩、桑学锋执笔。全书王建华、桑学锋统稿。

在项目的完成和本书的写作过程中，得到科学技术部、水利部、海河水利委员会、河北省水利厅、天津市水务局等有关单位的大力支持和帮助。刘昌明、陈志恺、王光谦、严登华、韩大卫、任光照、韩振中、王忠静、蒋礼平等知名专家，对本研究给予了许多指导与帮助。谨在此一并表示感谢！同时感谢所有引用参考文献的作者！

受时间和作者水平所限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

作 者

2015年3月

目 录

总序

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 流域（区域）水循环演变规律	3
1.2.2 气候变化及其对水循环的影响	4
1.2.3 人类活动对水循环的影响	5
1.2.4 国内外水循环演变研究综合分析	7
1.3 研究目标与主要研究内容	8
1.4 研究方案及技术路线	9
1.4.1 研究方案	9
1.4.2 技术路线	9
第2章 流域二元水循环理论模式	11
2.1 水循环基本概念与模式	11
2.1.1 水循环	11
2.1.2 流域水循环	13
2.2 海陆水循环模式	16
2.2.1 海陆水循环系统识别	16
2.2.2 海陆水循环的原理解析	17
2.3 流域水循环模式	20
2.3.1 流域水循环系统识别	20
2.3.2 流域水循环模式	23
2.4 城市水循环模式	24
2.4.1 城市水循环模式概念性通式	24
2.4.2 发展中城市水循环系统	25

2.4.3	发达城市水循环系统	26
2.4.4	生态城市水循环系统	27
2.5	农田水循环模式	28
2.5.1	农田水循环过程解析	28
2.5.2	雨养农田水循环模式	31
2.5.3	灌溉农田水循环模式	33
2.5.4	农田水循环综合模式	36
2.6	其他类型水循环模式	38
2.6.1	林草、荒地受扰天然水循环系统	38
2.6.2	湖泊、湿地等水域受扰天然水循环系统	39
2.7	本章小结	39
第3章	流域二元水循环演化驱动机制	41
3.1	服务功能二元化	42
3.1.1	生命服务功能	43
3.1.2	资源服务功能	43
3.1.3	经济服务功能	44
3.1.4	生态服务功能	44
3.1.5	环境服务功能	45
3.2	循环结构与参数的二元化	45
3.2.1	蒸发结构的变化	45
3.2.2	下渗结构的变化	46
3.2.3	径流变化	47
3.2.4	参数变化	47
3.3	循环路径二元化	48
3.3.1	天然水循环路径的变化	48
3.3.2	社会水循环路径	49
3.4	驱动力的二元化	49
3.4.1	自然驱动力及其二元化	50
3.4.2	社会驱动力	50
3.5	二元水循环耦合作用机制	51
3.6	本章小结	52
第4章	流域二元水循环概念模型	54
4.1	“自然—社会”二元水循环模型系统	54

4.2 气候模型	55
4.2.1 气候模式	56
4.2.2 气候模式的基本原理	56
4.3 多目标决策模型	58
4.3.1 多目标决策理论	58
4.3.2 多目标决策模型	61
4.4 水资源合理配置模型	66
4.4.1 水资源合理配置理论	66
4.4.2 水资源合理配置模型	70
4.5 分布式水文模型	74
4.5.1 模型总体设计	75
4.5.2 模型原理	78
4.6 本章小结	87
第5章 海河流域不同时间尺度水循环演化规律	88
5.1 海河流域万年尺度水循环演变规律	88
5.1.1 气温主导下的流域水循环演变	88
5.1.2 黄河改道对海河流域水系及岸线的影响	94
5.2 海河流域千年尺度水循环演变规律	95
5.2.1 流域历史气候变化	96
5.2.2 海河流域典型水旱灾害	97
5.2.3 流域人口的演变及变化趋势	101
5.2.4 流域山林植被的演变	103
5.2.5 流域河湖水系的演变	106
5.3 百年尺度水循环演化规律	113
5.3.1 气候变化背景	113
5.3.2 下垫面演化	117
5.3.3 气候和下垫面演变驱动下的天然径流演化	119
5.3.4 循环演化背景下的洪旱碱灾害演化规律	124
5.4 本章小结	125
第6章 海河流域水资源演变规律	128
6.1 海河流域水循环要素演变	128
6.1.1 降水	128
6.1.2 温度	134

6.1.3 蒸发能力	138
6.2 海河流域水资源演变规律	142
6.2.1 地表水资源演变规律	142
6.2.2 海河流域地下水演变规律	147
6.3 海河流域水资源演变归因分析	150
6.3.1 气候变化背景	151
6.3.2 下垫面演化	151
6.3.3 人工取用水量的变化	155
6.3.4 水资源演变归因	157
6.4 本章小结	165
第7章 海河流域典型城市水循环演变规律与机理	167
7.1 海河流域城市化进程	167
7.2 城市水循环系统的基本结构与机理分析	167
7.2.1 城市发展对自然水循环要素的扰动	168
7.2.2 城市发展直接导致侧支水循环的形成	169
7.2.3 城市水循环系统面临的突出问题	171
7.3 城市水循环演变规律分析——以北京市为例	172
7.3.1 城市耗用水过程规律	172
7.3.2 城市污废水排放与处理过程	174
7.3.3 城市雨水利用与排放过程	174
7.3.4 城市多水源供给过程	176
7.4 本章小结	177
第8章 海河流域农业水循环演变规律与机理	179
8.1 海河流域农业分布及种植结构	179
8.1.1 海河流域农业的主要分布	179
8.1.2 海河流域农业种植结构的发展及其驱动	180
8.2 海河流域农业水循环及其演变规律	188
8.2.1 农业水循环的服务功能	188
8.2.2 农业水循环的驱动机制	189
8.2.3 海河流域农业水循环通量	191
8.2.4 海河流域农业水循环特征	207
8.3 海河流域农田水循环机理	207
8.3.1 农田水分迁移转化机理	207

8.3.2 海河流域农田水分迁移转化特征	213
8.4 海河流域农业用水对水循环的影响及其调控	220
8.4.1 海河流域农业格局的变迁对水分迁移转化的影响	220
8.4.2 海河流域农业水循环调控目标	222
8.4.3 海河流域农业水循环调控途径	223
8.5 本章小结	229
第9章 主要成果与研究展望	230
9.1 主要成果	230
9.1.1 流域二元水循环理论框架方面	230
9.1.2 海河流域不同时间尺度水循环演化规律方面	231
9.1.3 海河流域二元水循环模式方面	231
9.1.4 人类活动对水循环的影响及演化规律研究方面	232
9.2 研究展望	233
参考文献	234
索引	242

第 1 章 | 绪 论

1.1 研究背景

近几十年来，由于全球气候的变化和人类活动的加剧，地球上的水循环和水资源状况发生了深刻的改变，很多地区发生了严重的水问题和水危机，水问题已经成为很多国家和地区严重制约社会经济发展的重要因素。因此，变化环境的水循环研究是 21 世纪水科学发展的一个十分重要的发展方向。

受人口、经济压力和水资源本底条件的影响，我国是世界上水资源问题最严重的国家之一，缺水、水污染和水生态退化等问题已成为影响国家资源与环境安全的主要因素。在全国 10 个一级流域中，以海河流域最为严重和典型。

海河流域包括北京、天津的全部、河北的大部分，以及山东、河南、山西、内蒙古和辽宁的一小部分，总面积为 32 万 km^2 ，既是我国的政治文化中心，也是全国重要的经济重心和粮食生产基地之一，其中环渤海经济带已成为继长江三角洲、珠江三角洲后国家经济发展的“第三极”，在全国经济社会发展格局中占有十分重要的战略地位。2004 年流域内总人口为 1.37 亿，GDP 为 20 341 亿元，粮食产量 4576 万 t，分别占全国的 10%、15% 和 10%。与重要的战略地位不匹配的是，海河流域是我国水资源最为紧缺的地区，人均水资源量为 270m^3 ，居全国十大流域之末，仅为以色列人均水平的 76%。但区内人口稠密、生产发达，社会经济需水模数位于全国前列，因此水资源供需矛盾异常突出，迫于巨大的需水压力，不得不长期过度地开发利用水资源，全流域水资源现状开发利用率甚至超过 120%，由此引发了三大严重的生态环境问题：一是水污染。目前全流域 55 条重要河流中，严重污染的有 49 条，水功能区达标率不足 30%。二是水生态退化。流域内主要河流每年几乎全部要发生断流，白洋淀等 12 个主要湿地总面积较 20 世纪 50 年代萎缩了 5/6。三是深层地下水超采。全流域现状每年超采深层地下水 60 亿 m^3 以上，累计超采量超过 1000 亿 m^3 ，占全国超采总量的 2/3。总体来看，海河流域目前已呈现出“有河皆干、有水皆污、超采漏斗遍布”的严峻态势。

海河流域面临的三大水问题是我国乃至世界范围内缺水地区的共性问题，三大问题之间存在密切的内在联系，相互作用与影响的统一基础是流域水循环。大规模的工农业生产、城市化、生态建设及人工取、用、耗、排水等活动无时无刻不在深刻改变着天然水循环的大气、地表、土壤和地下各个过程，致使现代环境下流域水循环呈现出明显的“自然—社会”二元特性，集中体现在四个方面：一是服务功能的二元化，是二元水循环的“本质”，对水循环服务功能二元化的认识，有助于辩证地认识生态和环境系统、社会经济

系统之间的关系，科学地指导两个系统之间的用水协调。二是循环参数的二元化，是二元水循环的核心，即现代环境下流域水循环对于降水输入的过程响应不仅取决于自然的陆地、土壤和地下等水文与地质参数，还取决于水资源开发利用及其他相关社会经济活动参数。三是驱动力的二元化，是二元水循环的基础，这时流域水循环的内在动力已由过去一元自然驱动演变为现在的“自然—社会”二元驱动。四是循环路径的二元化，是二元水循环的具体表征形态，即在人类聚集区的水循环过程往往由“大气—坡面—地下—河道”自然循环和“取水—输水—用水—排水”的社会循环耦合而成。流域二元水循环演化衍生出三大后效：一是水资源次生演变效应，大多表现为径流性水资源衰减；二是伴生的水环境演变，主要表现为水体污染和环境污染；三是伴生的水生态演变，主要表现为天然生态退化和人工生态的发展。

海河流域三大水问题是缺水地区的共性问题。面对三大水问题，为保障区域经济社会的全面、协调、可持续发展，以海河流域为典型的缺水地区，提出了供用水安全、水环境安全和水生态安全三大国家目标。要实现缺水地区供用水、水环境、水生态安全的国家目标，必须实施以流域水循环为统一基础的水资源科学调控，首要的基础科学问题是高强度人类活动干扰下的流域水循环与水资源演变的内在机理及其规律。

海河流域是我国乃至全世界人类活动对流域水循环扰动强度最大、程度最深、类型最复杂的地区，因此该流域高强度人类活动干扰下的流域水循环与水资源演变内在机理及其规律的研究对于其他弱扰动缺水地区无疑具有直接的参考和借鉴意义。

1.2 国内外研究进展

随着人类活动影响的加剧，人类活动干扰下的流域水循环与水资源演变内在机理及其规律的研究已成为现代水文水资源与地球科学研究的核心命题和前沿领域，主要包括两个层面的问题：一是人类活动影响下的流域水循环分项过程与系统演化，包括典型人类活动对于流域水循环的大气、地面、土壤和地下过程的作用机制，“自然—人工”二元驱动力作用下的流域水循环系统的结构、功能和特性演变问题，以及不同人—地关系条件下的流域水循环系统演化规律等；二是伴随水循环系统演化的流域水资源演变机理，包括流域水循环系统演化下的水资源数量与质量、结构与效用、时空特性、资源构成演变效应，以及流域水资源演变预测的不确定性等基础科学问题。流域（区域）水资源演变规律和演变机理的研究以水资源的各个分量为研究对象，分析历史系列的水资源演变规律，或者预测未来水资源的变化趋势，大部分研究以径流系列为研究对象，包括天然径流系列和实测径流系列。研究天然径流系列，通常计算其变化周期，分析它与天气系统周期性演变之间的关系和变化机理。研究实测径流系列，通常分析其变化趋势和突变性，揭示人类活动和气候变化引起的趋势性变化和致变机理。考虑部分内容已在《海河流域二元水循环研究进展》一书中有所归纳，本书重点对水循环演变规律和机理的国内外研究过程和方法进行简要阐述。