

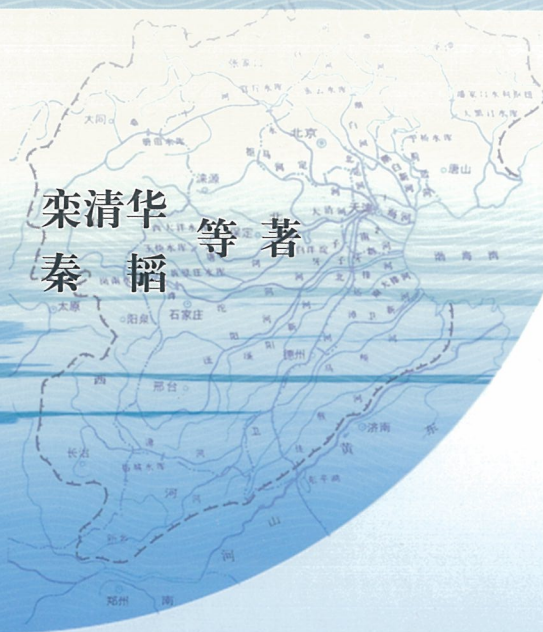
“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

海河流域城市水循环模式

王浩 褚俊英 栾清华 等著
刘扬 高学睿 秦韬



科学出版社

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 (2006CB403401)

国家自然科学基金面上项目(51279208、71273153)

国家自然科学基金青年项目(51409275)

资助

中国水利水电科学研究院专项(ZJ1224)

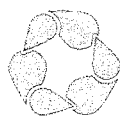
财政部“节水型社会建设”专项 (水综节水[2006]50号)

中国工程院咨询项目(2014-xy-11-4)

“十五”国家重点图书出版规划项目

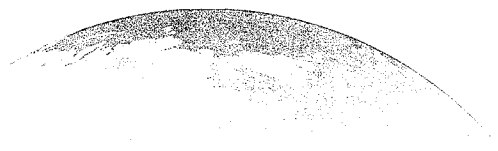


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

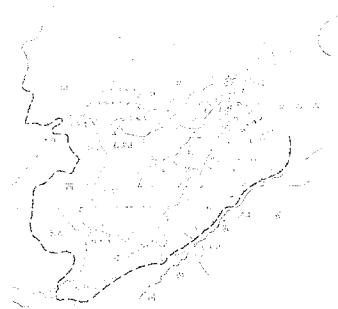


海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

海河流域城市水循环模式



王 浩 褚俊英 栾清华 等 著
刘 扬 高学睿 秦 韬



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书选取人类活动最为集中、面临的水问题最为典型以及社会经济发展战略地位最为突出的海河流域作为研究对象,系统总结了其城市水循环的机理、模式及其典型应用。在阐述水对城市的服务功能以及城市化对水循环影响的基础上,针对海河流域城市化特征以及城市水循环特征,分析了城市典型用耗水单元耗水规律及其影响因子;以城市水循环中的耗用过程为关键点,构建了海河流域城市二元水循环模式及概念性模型;利用此模式开展了流域不同类型城市水循环的实证研究,并对典型环节进行了案例分析,在此基础上,研发了城市区域水文过程分布式模型,并对海河流域的蒸散发过程进行精细化模拟分析。

本书可供水文水资源、水利水电及生态环境等部门的政府管理人员,以及相关的规划设计与工程建设的专业技术人员,高等院校水文水资源、水利水电及生态环境相关专业的教师、学生,以及关心中国水资源问题及其解决对策的企业、无政府组织和社会公众参考。

图书在版编目(CIP)数据

海河流域城市水循环模式 / 王浩等著. —北京: 科学出版社, 2016. 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 978-7-03-045573-4

I. 海… II. 王… III. 海河-流域-城市用水-水循环系统-研究

IV. TU991.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 208812 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 / 责任校对: 李 影

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

*

2016 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 12 1/4 插页: 2

字数: 500 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

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

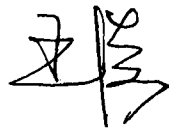
的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在 2010 年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域 973 计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社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

城市是人类活动最为频繁的区域。随着我国城市化进程的不断加剧,加上自然、社会等多种因素的综合影响,我国城市水循环的过程与结构极其复杂。海河流域在我国有着举足轻重的战略地位,是我国城市建设历史悠久、受强人类活动扰动程度剧烈的流域。该流域城市水循环的自然属性和社会属性具有鲜明的特点,特别受到南水北调等水资源配置重大工程的影响,其城市水循环的过程与结构颇具典型性和代表性。以海河流域为典型区域,研究城市水循环的模式与特征,对于提升我国城市水系统的公平、效率和可持续性具有重要的现实意义。

本书的研究成果紧密结合海河流域城市及其水资源开发利用的基本特征,从“自然—社会”二元水循环的视角出发,在机理、模式、规律、评价以及模型等多个方面对海河流域城市水循环进行了系统的研究分析。该书的特点体现在如下方面:一是借助统计调查与遥感分析等综合分析技术,从城市水循环的通量、结构和参数等方面研究了城市水循环总体以及分环节的演变规律;二是以水在城市中的服务功能为基础,分析了典型主体的用耗水规律及其主要驱动因素;三是探索性地提出了面向服务功能、以耗用水为中心的城市水循环模式与概念性通式,注重了多个环节、多个要素的关联和耦合,揭示了城市水循环的演变阶段与结构特征;四是综合社会、经济、资源等多个层面的主要指标,对海河流域的城市水循环过程进行了聚类分析,并选取典型案例进行了详细的实证分析;五是开展了城市水循环健康诊断和评价,为城市水循环的科学调控提供了基础;六是创新研发了分布式的城市水文模型,并对典型城区的蒸散发过程进行了定量模拟,为城市水循环的精细化调控提供了有力的支撑。

本书研究基础扎实、数据翔实,对于促进我国城市水循环的机理研究、模式识别与典型应用具有一定指导意义和参考价值。本研究成果对于我国形成高强度人类活动下城市水循环的理论与方法学体系、实现城市水循环的多学科融合具有重要的推动作用。

中国工程院院士



2015年8月

前 言

城市是人口、财富及其文明的集中地，是社会经济发展最活跃的区域。作为我国城市人类活动、城区建设及经济开发历史最早的流域之一，海河流域的农村人口不断向城市集聚，城市化进程不断推进，2007 年流域城市人口约 6500 万人，城市化率达到 47.6%。流域内现有 35 座大中城市，并有多个人口上千万的特大型城市，在我国的政治经济中具有十分重要的地位。

城市水资源开发与利用在流域社会水循环中起到至关重要的作用，是流域水循环宏观整体高效利用调控的重要环节。突出表现在如下方面：一是城市发展对自然水循环产生强烈扰动，具体表现为城市化下垫面的变化、雨水管网与渠道的形成对自然水循环要素（如入渗、径流、蒸发和降水等）产生影响；二是城市发展直接导致城市社会水循环的形成，即城市水基础设施的建设与发展，形成了城市社会水循环系统（包括供水、用水、耗水和排水等多个环节的有机系统）。

随着城市化进程的推进和城市系统的不断发展，城市社会水循环的结构、通量、过程及其次生效应不断发生演化，从而带来一系列水问题，突出表现在以下几个方面：一是城市社会水循环通量的扩大引发供水安全保障形势日益严峻，特大型城市人口的扩大和产业规模的发展使得用水总量持续扩大，保证率也需要不断提高，导致水资源供需矛盾日趋尖锐，一些城市不得不一再扩大范围寻求距离更远的水源以保障城市日益增长的用水需求。二是城市单元水文循环演变导致内涝灾害问题严峻，城市热岛效应造成的雨岛效应，增加了短时强降水发生的概率；不透水面增加、河道挤占、湿地减少等下垫面变化改变了城市单元的产汇流特性，加之城市内外排水系统的不匹配，造成城市内涝问题日益突出。三是城市生态系统失衡与水环境问题突出，多数城市内河、城市下游河段为严重污染的河段，城市水生态系统的服务功能严重受损，城市社会水循环通量的扩大能否确保供水安全保障形势，城市水文循环演变能否有效规避内涝灾害，城市污染负荷排放能否减少对水生态系统的扰动成为国内外研究的热点与难点。如何公平、有效地实现城市的供水、用水、污水、雨水的一体化的管理，已成为世界各国面临的复杂而艰巨的任务。

长期以来，我国城市水基础设施建设取得了长足的发展，但基本沿袭了发达资本主义

国家传统给排水系统建设的思路,越来越暴露出诸多弊端,需要从城市水循环系统全新的视角重新审视。本书从“自然-社会”二元水循环的视角出发,实现城市水循环多环节、多要素的系统耦合,对于形成高强度人类活动下城市水循环的基本理论与方法学体系,推动城市水循环的多学科交叉融合,促进城市水循环的优化调控,具有重要的理论和现实意义。

本书是在国家重点基础研究发展计划(973计划)“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(2006CB403401)、国家自然科学基金面上项目(51279208、71273153)和青年项目(51409275)、中国水利水电科学研究院专项(ZJ1224)、中国工程院咨询项目(2014-xy-11-4)、财政部“节水型社会建设”专项(水综节水[2006]50号)的共同资助下,由中国水利水电科学研究院、河北工程大学、海河水利委员会等单位的研究人员共同参与和编写完成。各章节参编人员为:第1章由王浩、栾清华、桑学锋、杨朝晖撰写;第2章由刘扬、褚俊英、秦韬、严子奇撰写;第3章由褚俊英、张世禄、牛存稳、何亚闻撰写;第4章由褚俊英、刘扬、周祖吴、张世禄撰写;第5章由栾清华、郭迎新、刘扬、张海行撰写;第6章由刘扬、徐鹤、陈根发撰写;第7章由栾清华、秦韬、张海行撰写;第8章由高学睿、刘家宏、户超撰写;第9章由栾清华、秦韬、高学睿撰写。全书由栾清华、褚俊英、刘扬统稿。

在本书研究和写作过程中,得到了海河水利委员会、北京市水务局、天津市水务局、河北省水利厅、邯郸市水利局、唐山市水务局、承德市水务局等有关单位的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

限于水平和编写时间仓促,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者不吝批评指正。

编 者

2015年3月于北京

目 录

总序

序

前言

第 1 章 海河流域城市化发展及其对水循环影响	1
1.1 海河流域城市发展现状	1
1.1.1 海河流域城市众多且人口密集	2
1.1.2 海河流域分布有世界级超大城市	2
1.1.3 海河流域城镇用地主要分布在平原地区	4
1.1.4 海河流域形成以京津冀都市圈为核心的城市群	4
1.1.5 海河流域分布的城市是我国环渤海地区的主要组成部分	5
1.1.6 海河流域分布的城市是我国重要的产业基地和贸易区	6
1.2 海河流域城市化的演变历程	8
1.3 城市化对海河流域水循环的影响	10
1.3.1 对水循环通量的影响	10
1.3.2 对河流和地下水质的影响	11
1.3.3 对产汇流规律的影响	16
1.3.4 对区域小气候的影响	18
1.4 本章小结	21
第 2 章 海河流域城市水循环机理研究	22
2.1 水在城市中的服务功能	22
2.2 城市典型主体的用耗水规律的驱动因素	24
2.2.1 城市人口规模是影响城市生活用水的重要因子	24
2.2.2 工业用水通量受到产业结构的影响	25
2.2.3 城市公共用水与第三产业发展规模成正相关	25
2.2.4 城市生态用水形成有效降水利用与补充灌溉方式	28
2.3 本章小结	31
第 3 章 城市水循环模式及概念性通式	32
3.1 城市水循环的模式分析	32

3.1.1	基于二元理论的城市水循环模式	32
3.1.2	城市水循环模式的基本特点	33
3.1.3	核心环节（用耗水系统）的结构分析	36
3.2	城市水循环系统的演变及结构剖析	43
3.2.1	发展中城市水循环系统	44
3.2.2	发达城市水循环系统	46
3.2.3	生态城市水循环系统	47
3.3	城市水循环的概念性通式与数学描述	49
3.3.1	城市水循环概念性通式及其目标函数	49
3.3.2	城市社会水循环过程的数学描述	52
3.4	本章小结	59
第4章	海河流域城市水循环模式的演变规律分析	61
4.1	流域典型城市选取及其社会经济特点	61
4.2	城市多水源供给过程	65
4.3	城市耗用水过程规律	68
4.3.1	用水通量不断增大后出现转折并趋于稳定，生活与公共用水量比例加大	68
4.3.2	用水通量在空间上主要分布在京津冀地区	72
4.3.3	市区的用水高度集中，供水保证率和水质刚性要求强	74
4.3.4	城市经济社会用水产出具有高效益	77
4.3.5	城市用水系统效率仍有待于进一步提高	77
4.4	城市污废水排放与处理过程	79
4.4.1	城市生活和工业耗水率较低，城市污废水集中排放	79
4.4.2	城市给排水管网的高密度建设分离了自然水循环过程	80
4.5	本章小结	82
第5章	海河流域不同类型城市水循环模式的实证研究	84
5.1	海河流域主要城市的聚类分析	84
5.1.1	中心都市型	85
5.1.2	高效工业型	86
5.1.3	传统工业型	87
5.1.4	特色产业型	87
5.2	中心都市型城市——北京市	88
5.2.1	人与自然和谐发展的政治、文化中心	88
5.2.2	中心都市型城市水循环模式特点	89
5.2.3	中心都市型城市的耗用水及污染物排放特点	90

5.2.4 中心都市型城市水循环合理模式	94
5.3 高效工业型城市——天津市	95
5.3.1 蓬勃发展的高效工业港口城市	95
5.3.2 高效工业型城市水循环模式特点分析	95
5.3.3 高效工业型城市水循环合理模式分析	99
5.4 传统工业型城市——邯郸市	100
5.4.1 钢铁煤炭为产业支柱的重工业城市	100
5.4.2 传统工业型城市水循环模式特点分析	101
5.4.3 传统工业型城市水循环合理模式分析	105
5.5 传统工业型城市——唐山市	106
5.5.1 产业结构转型的新型港口城市	106
5.5.2 转型工业城市水循环模式特点分析	107
5.5.3 转型期工业城市水循环合理模式分析	111
5.6 特色产业型城市——承德市	111
5.6.1 旅游产业蓬勃发展的休闲城市	111
5.6.2 旅游型城市水循环模式特点	112
5.6.3 旅游型城市水循环的合理模式	115
5.7 本章小结	116
第6章 海河流域城市水循环典型环节案例分析	118
6.1 城市绿地生态系统合理供水辨识分析——以北京市为例	118
6.1.1 城市概况	119
6.1.2 绿地生态系统用水过程特点	119
6.1.3 城市绿地生态系统合理供水评价模型	120
6.1.4 北京市绿地生态系统合理性分析	123
6.2 城市内涝风险评价及雨水收集利用——以天津市为例	124
6.2.1 城市概况	125
6.2.2 暴雨和内涝演变	125
6.2.3 内涝的形成因素演变	127
6.2.4 城市内涝风险的评估	129
6.2.5 天津市城市雨水收集利用技术	129
6.3 本章小结	130
第7章 海河流域城市水循环健康评价分析	132
7.1 基于 KPI 指标体系的评价模型	132
7.1.1 KPI 指标体系的构建	132
7.1.2 指标体系权重的确定	135

7.1.3 指标体系的评价标准	137
7.2 天津市水循环健康评价实例研究	138
7.2.1 单一指标健康评价结果	139
7.2.2 维度健康评价结果	140
7.2.3 综合健康评价结果及其分析	141
7.3 本章小结	143
第8章 城市区域水文研究及分布式模拟与实例应用	144
8.1 城市水文研究进展	144
8.1.1 城市化的水文效应	145
8.1.2 城市化伴生的水环境及水生态效应	147
8.1.3 城市化水文过程机理研究	149
8.1.4 城市化水文过程模拟模型	151
8.1.5 城市水文研究的发展趋势	153
8.2 城市区域水文过程建模思路	155
8.3 URMOD 城市水文模型的结构和原理	159
8.3.1 模型介绍及其结构	159
8.3.2 模型主要水文过程演算	160
8.4 URMOD 模型在北京市的应用案例	163
8.4.1 模型在研究区的适用性	163
8.4.2 北京市四环内区域蒸散发模拟与验证	165
8.5 本章小结	172
第9章 结论与展望	173
参考文献	176
索引	184

第 1 章 | 海河流域城市化发展及其对水循环影响

城市化是城市人口不断增加、城区面积不断扩大、城市系统功能不断复杂化的一个动态过程。自工业革命以来,随着社会经济高速发展,这一过程不断加剧,对自然水循环的扰动也逐渐增强,使得城市水循环逐渐成为社会水循环的一个相对独立的典型代表性单元。而城市化程度越高,其“取水—供水—用水—耗水—排水”的社会水循环过程就越显著,因此城市化发展对水循环影响分析是“自然—社会”二元水循环的重要内容。海河流域是北方城市化程度较高的区域,评价城市化对流域通量、水体水质、产汇流规律等水循环要素,关键子过程及其伴生过程的影响是研究整个海河流域“自然—社会”二元水循环的切入点,也是剖析海河流域“自然—社会”二元水循环机理、构建流域城市水循环模式及模型的重要前提。

1.1 海河流域城市发展现状

城市是人类活动最为强烈的地区,是人口、财富及其文明的集中地,是社会发展最活跃的区域(Zhang, 2001),其水资源开发与利用在流域社会水循环中起到至关重要的作用,城市水循环的效率关系到整个流域水循环系统稳定性、再生性的维系,以及社会、经济、生态、环境服务功能的实现,是流域水循环宏观整体高效利用调控的重要环节(褚俊英和陈吉宁, 2009)。从本质上看,城市化是一种空间集聚,其意义就在于通过人口的集聚带动其他要素的集聚,产生结构性改善和功能性提高的综合效应。从人类社会经济发展过程来看,城市化又是必然要经历的阶段,是社会进步的标志。城市化发展阶段不同,其水循环反映的特征不同。因此,剖析城市发展现状是研究城市水循环重要的前置内容。