

“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

# 城市二元水循环系统演化与 安全高效用水机制

陈吉宁 曾思育 杜鹏飞 孙 傅 董欣 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

# 城市二元水循环系统演化与 安全高效用水机制

陈吉宁 曾思育 杜鹏飞 孙 傅 董欣 著



科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

城市水循环既包括降雨、径流等自然循环过程,也包括供水、排水等社会循环过程,具有明显的“自然—社会”二元特性。城市水系统是自然水循环和社会水循环的重要载体和耦合界面,也是人类实现水资源安全、高效和可持续利用的重要调控手段。本书基于城市水循环系统的二元特征,提出了可持续城市水系统理论框架、调控原则和决策支持工具,构建了城市二元水循环系统数值模拟体系,定量研究了城市二元水循环关键过程的演化机制和规律,并提出了海河流域城市安全高效用水的调控机制。

本书可供水文水资源、环境科学与工程、给排水工程、城市规划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

城市二元水循环系统演化与安全高效用水机制 / 陈吉宁等著. —北京: 科学出版社, 2014. 10

(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 978-7-03-040939-3

I. 城… II. 陈… III. ①海河—流域—城市用水—水循环系统—研究②海河—流域—城市用水—安全管理—研究 IV. TU991.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 117723 号

责任编辑: 李 敏 张 菊 / 责任校对: 张怡君

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 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张: 11 1/2 插页: 2

字数: 550 000

定价: 110.00 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

水是人类赖以生存和发展的必需资源。随着人口增长和社会经济发展，人类对水资源的需求以及对水环境的压力日益增长。2009 年联合国教科文组织发布的《世界水发展报告》指出，一方面过去 50 年全球的水资源开采量增长了 2 倍，而另一方面目前发展中国家 80% 以上的污水未经处理直接排入受纳水体，一些发达国家的污水处理水平也不尽如人意。作为世界上最大的发展中国家，我国同样面临着水资源短缺和水环境污染的严峻形势。我国人均水资源量仅相当于世界平均水平的  $1/4$ ，而部分区域的水资源短缺更加严重。例如，海河流域涉及的北京市、天津市和河北省，近 10 年的人均水资源量尚不足同期全国平均水平的  $1/10$ ，三个省（直辖市）的水资源开发利用长期高于 100%。同时，我国水环境恶化、水污染事件频发的趋势尚未得到根本遏制。

城市是人类文明发展的重要标志，目前全球以及中国均有一半以上的人口居住在城市区域，这一比例在发展中国家还将快速提高。城市承载的高密度人口和高强度社会经济活动增大了区域性的水资源和水环境压力。以我国海河流域为例，北京、天津等城市的本地水资源供不应求，城市生活和工业取水往往挤占生态环境用水。同时，城市污水收集和处理设施的建设滞后和运行水平低下，也导致受纳水体难以完全达到水功能区的水质目标。此外，全球气候变化引起的干旱、高温、强降雨等极端天气现象，也常给城市水基础设施带来前所未有的冲击。如何实现城市水资源的高效、安全、可持续利用，既是当前国内外学术界的研究热点，也是城市管理者亟须解决的现实难题。

清华大学环境学院陈吉宁教授及其团队长期开展城市水系统研究，内容涉及城市给水、污水、雨水、再生水等系统的模拟、规划、设计和运行调控。近些年，该研究团队依托中国水利水电科学研究院王浩院士主持的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”中的“城市二元水循环系统演化与安全高效用水机制”课题，从自然属性和社会属性两个维度对城市水系统开展了综合研究，推动了城市水系统研究理论、方法和实践的进展。该课题对基于二元循环的可持续城市水系统理论进行了有益的理论探索，提出了相应的理论框架、概念和方法，并构建了城市二元水循环系统数值模拟体系，还以我国海河流域为案例，揭示了城市二元水循环系统的演化机制和规律，提出了城市二元水循环系统的调控机制，这些成果对于我国其他区域城市的水资源利用和管理具有示范和借鉴意义。

作为课题重要成果之一，该书全面展示了该课题的研究背景和目的、技术路线、方法

和工具、主要结果和结论以及对未来研究的建议等。正如该书的作者所述，随着资源和能源供给、气候变化等问题日益突出，人们对城市水系统的功能要求已经不仅仅局限于改善城市公共卫生条件、保障公众健康、改善水环境质量等，人们还希望能够最大限度地利用城市水系统中的水、碳、氮、磷等资源和能源物质，希望城市水系统能够最大限度地应对气候变化特别是极端气象事件带来的冲击等。该书在应对城市水系统这些新的功能要求方面进行了积极的探索，也奠定了良好的工作基础。希望该书的出版能够为学术界同仁继续深入开展城市水系统研究提供借鉴，为城市管理者推动城市水资源高效、安全、可持续利用提供参考。



2014年9月

# 前言

人类社会带来的地表覆被、生产生活方式、水资源利用技术等变化改变了水资源的循环过程，导致水循环的自然属性减弱、社会属性增强，呈现出“自然—社会”二元特性。这一特性在人口密集、社会经济活动高度发达的城市区域表现得更加突出。一方面，城市人口通过高度人工化的城市水基础设施满足其取水、用水和排水需求，通过这一人工系统组织的水循环属于社会水循环，但其取水水源、排水接纳水体等通常具有一定自然属性，并且人工水系统会受到其他自然水循环过程的影响，如地下水入渗、降雨径流汇入等。另一方面，城市降雨的产流、汇流和下渗等过程具有自然水循环属性，但这一过程也会受到城市下垫面改变的影响，同时部分汇流过程可能通过人工水系统完成，因此呈现出一定的社会水循环属性。由此可见，自然水循环和社会水循环在城市区域高度耦合，共同决定了水资源在城市区域的流动、储存和利用方式。同时，以水资源为载体，城市二元水循环也承载着其他物质（如营养盐、污染物等）和能量的迁移、转化和循环，并且水、物质和能量也相互耦合。这种复杂的耦合关系既影响城市二元水循环系统内部水资源及其他物质的利用效率和安全性，也影响城市二元水循环系统外部的环境质量和生态安全。

城市水系统是城市的生命线工程，是城市社会发展的重要保障。从城市二元水循环的角度来看，城市水系统是自然水循环和社会水循环的重要载体和耦合界面。传统的城市水系统格局成形于 19 世纪后半期，到 20 世纪后半期日臻完善，主要包括饮用水处理和输配、雨污水收集和处理等子系统。传统城市水系统在历史上在改善城市公共卫生条件、保障公众健康、改善水环境质量方面发挥了重要作用。但是，人口增长、经济发展等导致水资源压力增大，特别是 20 世纪 80 年代以来随着可持续发展理念日益渗透到各个领域，传统城市水系统的综合性能受到了质疑。例如，传统城市水系统中水和物质沿着“取水—用水—排水”的流程呈单向流动，水和营养物质等重要资源无法重复利用；传统城市水系统不能实现分质供水，大量饮用水高质低用，造成资源和能源的浪费等。因此，20 世纪 90 年代以来，特别是近 10 年来，为了应对水资源短缺，学术界和水行业出现了一系列将可持续发展理念应用于城市水系统的理论和实践，如“可持续城市水系统”（sustainable urban water systems）、“水敏感城市”（water sensitive city）、“以水为核心的城市化”（water centric urbanism）等。可持续城市水系统理念对传统城市水系统的功能、结构、布局等提出新的挑战，并可能从根本上改变原有的城市二元水循环系统。因此，在城市水系统新旧范式交锋之际，从城市尺度上研究二元水循环系统的演化机理和调控机制，对于

我国这样一个水资源短缺的国家来说,在实现城市水资源的安全、高效和可持续利用及选择未来城市水系统发展的技术路径方面具有十分重要的理论和实践意义。

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“城市二元水循环系统演化与安全高效用水机制”课题,重点研究城市二元水循环系统涉及的以下三个科学问题:①城市自然水循环与社会水循环具有怎样相互影响的耦合关系?②社会经济发展(如技术进步、行为变化等)对城市二元水循环系统的长期影响是什么?③如何对城市二元水循环系统进行合理高效的调控?针对上述科学问题,该课题将机理研究与模型研究相结合,以实验监测和数据调研为基础,构建了一系列描述城市二元水循环系统的机理模型和决策模型,并重点以海河流域为研究区域,揭示城市二元水循环系统的演化机制和规律,提出城市二元水循环系统的调控机制,并在成果集成的基础上提出基于二元水循环的可持续城市水系统理论框架。

本书是在“城市二元水循环系统演化与安全高效用水机制”课题研究成果的基础上凝练总结而成的。第1章介绍我国城市水资源利用的形势、未来发展趋势和挑战;第2章介绍基于二元循环的可持续城市水系统理论框架和核心内容,是第3~5章的理论和方法基础;第3章介绍多尺度城市二元水循环系统数值模拟体系的构建,该模拟体系是支撑可持续城市水系统理论及第4~5章研究成果的重要工具基础;第4章介绍城市二元水循环系统演化机制与规律的研究成果;第5章以海河流域为案例介绍城市二元水循环系统的调控机制及其效果;第6章总结上述各章的主要成果和结论,并对未来研究工作提出建议。

本书成果是清华大学环境学院环境系统分析教研所近十几年集体智慧的结晶,很多已毕业和在读的研究生参与了相关研究工作。此外,课题参与单位中国科学院地理科学与资源研究所的部分学者也作出了相关贡献,在此一并表示感谢。除本书作者之外,参与第1~5章相关研究的人员如下。

第1章,陈敏鹏、钟丽锦等;

第2章,余繁显、黄悦等;

第3章,张俊杰、赵冬泉、何炜琪、余繁显、黄悦、褚俊英、杜斌等;

第4章,张俊杰、赵冬泉、余繁显、黄悦、李志一、褚俊英、杜斌、郑红星、左建兵等;

第5章,余繁显、黄悦等。

城市二元水循环系统是一个复杂的、开放的巨系统,随着社会经济条件和自然环境的变化,它也在不断面临新的需求和挑战,需要研究者不断从广度和深度上推动研究加以应对。因此,本书中疏漏或不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2014年3月10日

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 总序                           |    |
| 序                            |    |
| 前言                           |    |
| 第1章 引言                       | 1  |
| 1.1 我国城市水问题的现状               | 1  |
| 1.2 我国城市水问题的未来挑战             | 3  |
| 1.3 传统城市水系统的局限               | 4  |
| 1.4 研究目的、技术路线和内容             | 5  |
| 第2章 基于二元循环的可持续城市水系统理论        | 7  |
| 2.1 基于二元循环的可持续城市水系统理论框架      | 7  |
| 2.2 基于水质的可持续城市水资源评价新模式       | 9  |
| 2.2.1 基于水质的城市水资源量化概念         | 9  |
| 2.2.2 基于水质的城市可用水资源量评价框架      | 10 |
| 2.3 多尺度城市水资源利用效率评价理论与方法      | 11 |
| 2.3.1 不同尺度水资源利用效率评价指标体系构建    | 13 |
| 2.3.2 不同尺度水资源利用效率的转化         | 16 |
| 2.4 可持续城市水系统规划设计运行理论与支撑工具    | 16 |
| 2.4.1 可持续城市水系统的内涵            | 16 |
| 2.4.2 可持续城市水系统的主要特征          | 17 |
| 2.4.3 可持续城市水系统的规划、设计及运行原则    | 20 |
| 2.4.4 基于二元循环的城市水系统数值模拟体系     | 21 |
| 第3章 多尺度城市二元水循环系统数值模拟体系的构建    | 24 |
| 3.1 基于水质的城市可用水资源量核算模型        | 24 |
| 3.1.1 建模方法                   | 24 |
| 3.1.2 模型概化                   | 24 |
| 3.2 基于 ABSS 的城市生活用水需求预测与管理模型 | 28 |
| 3.2.1 ABSS 建模方法              | 28 |
| 3.2.2 模型结构与功能                | 29 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 3.2.3 模型核心机理与子模块 .....             | 31 |
| 3.3 城市工业用水需求预测与管理模型 .....          | 36 |
| 3.3.1 I-WaDEM 模型结构 .....           | 36 |
| 3.3.2 模型核心计算模块 .....               | 37 |
| 3.4 城市给水系统水质模拟与风险评估模型 .....        | 43 |
| 3.4.1 建模方法与框架 .....                | 43 |
| 3.4.2 模型结构与功能 .....                | 44 |
| 3.5 基于 GIS 的城市排水系统和非点源污染模拟模型 ..... | 45 |
| 3.5.1 建模方法与框架 .....                | 45 |
| 3.5.2 模型结构与功能 .....                | 46 |
| 3.5.3 排水系统模拟的核心机理 .....            | 47 |
| 3.6 基于支付意愿的城市居民再生水需求模型 .....       | 50 |
| 3.6.1 研究的理论基础 .....                | 50 |
| 3.6.2 支付意愿函数的构造与分析 .....           | 51 |
| 3.6.3 居民对再生水的总和需求函数 .....          | 52 |
| 3.7 基于真实期权的再生水工程项目投资策略优化模型 .....   | 53 |
| 3.7.1 基本模型 .....                   | 53 |
| 3.7.2 再生水项目的价值 .....               | 55 |
| 3.7.3 最优投资规模的确定 .....              | 57 |
| 3.7.4 投资期权的价值及最佳投资时机 .....         | 58 |
| 3.8 城市污水系统可持续性估算模型 .....           | 59 |
| 3.8.1 基于成本效益分析的建模方法 .....          | 59 |
| 3.8.2 模型结构与功能 .....                | 60 |
| 3.9 城市污水系统布局规划决策支持模型 .....         | 61 |
| 3.9.1 多目标空间优化的建模方法 .....           | 61 |
| 3.9.2 模型结构与功能 .....                | 61 |
| 3.9.3 模型求解算法 .....                 | 63 |
| 3.10 基于事件驱动的流域分布式非点源模型 .....       | 65 |
| 3.10.1 模型结构与功能 .....               | 65 |
| 3.10.2 模型应用框架 .....                | 66 |
| 3.11 模型不确定性分析方法 .....              | 66 |
| 3.11.1 不确定性分析的基本方法 .....           | 66 |
| 3.11.2 基于 Sobol 序列的 GLUE 算法 .....  | 68 |
| 3.11.3 基于空间信息统计学的参数空间相关性分析方法 ..... | 69 |
| 3.11.4 基于图论的空间采样方法 .....           | 71 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第4章 城市二元水循环系统演化机制与规律研究 .....      | 73  |
| 4.1 基于水质再生的城市水资源量 .....           | 73  |
| 4.1.1 单个城市最大可用水资源量理论极限值 .....     | 73  |
| 4.1.2 多个城市全流域最大可用水资源量理论极限值 .....  | 73  |
| 4.1.3 考虑经济可行性的单个城市可用水资源量 .....    | 74  |
| 4.2 城市生活节水技术的扩散特征 .....           | 77  |
| 4.2.1 节水器具扩散规律 .....              | 77  |
| 4.2.2 居民用水结构变化和节水器具未来发展趋势 .....   | 78  |
| 4.3 工业节水技术的发展规律 .....             | 79  |
| 4.3.1 工业技术发展水平判断 .....            | 79  |
| 4.3.2 技术进步对节水潜力的影响识别 .....        | 81  |
| 4.4 常规处理工艺下城市饮用水水质风险特征 .....      | 82  |
| 4.4.1 城市饮用水水质风险评价标准 .....         | 82  |
| 4.4.2 饮用水源水质参数 .....              | 83  |
| 4.4.3 给水处理工艺参数 .....              | 84  |
| 4.4.4 不同水源水质条件下的饮用水安全风险 .....     | 84  |
| 4.4.5 海河流域的饮用水安全风险 .....          | 84  |
| 4.5 城市饮用水水质安全的社会和技术影响因素 .....     | 87  |
| 4.5.1 案例研究区域 .....                | 87  |
| 4.5.2 模拟情景设计 .....                | 88  |
| 4.5.3 模拟结果分析 .....                | 90  |
| 4.6 典型下垫面污染物初期冲刷效应 .....          | 91  |
| 4.6.1 颗粒物初期冲刷效应 .....             | 92  |
| 4.6.2 有机物和营养物质初期冲刷效应 .....        | 92  |
| 4.6.3 其他物质初期冲刷效应 .....            | 92  |
| 4.7 BMP 在城市径流污染控制中的去除规律 .....     | 94  |
| 4.7.1 控制措施的选择 .....               | 94  |
| 4.7.2 控制措施方案制订与模拟分析 .....         | 94  |
| 4.8 居民支付意愿对再生水需求的影响 .....         | 98  |
| 4.8.1 居民支付意愿的影响因素 .....           | 98  |
| 4.8.2 北京市再生水需求曲线 .....            | 99  |
| 4.9 投资再生水项目的最优规模和最佳时机 .....       | 101 |
| 4.9.1 污水再生利用工程的经济可行性 .....        | 101 |
| 4.9.2 再生利用工程经济可行性的敏感影响因素分析 .....  | 102 |
| 4.9.3 投资再生水项目最优规模和最佳时机的影响因素 ..... | 103 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 4.10 城市污水系统结构与布局对城市可持续性的影响 .....    | 105        |
| 4.10.1 城市污水系统结构对城市可持续性的影响 .....     | 105        |
| 4.10.2 城市污水系统布局对城市可持续性的影响 .....     | 112        |
| 4.11 污水再生利用条件下污水系统的理想服务规模 .....     | 114        |
| 4.11.1 污水系统单位成本曲线规律识别 .....         | 115        |
| 4.11.2 传统模式与污水回用模式污水系统理想规模的差异 ..... | 116        |
| <b>第5章 城市二元水循环系统调控机制研究 .....</b>    | <b>118</b> |
| 5.1 城市节水潜力预测与实现途径 .....             | 118        |
| 5.1.1 海河流域城市生活用水节水潜力分析与管理对策 .....   | 118        |
| 5.1.2 海河流域工业用水节水潜力分析与管理对策 .....     | 123        |
| 5.2 海河流域城市给水系统水质风险控制 .....          | 126        |
| 5.2.1 海河流域未来饮用水水质风险 .....           | 126        |
| 5.2.2 影响饮用水水质风险的关键因素识别 .....        | 128        |
| 5.2.3 饮用水水质风险控制策略的效果 .....          | 129        |
| 5.3 海河流域城市水资源利用效率评价 .....           | 130        |
| 5.3.1 各项评价指标和权重确定 .....             | 130        |
| 5.3.2 城市综合用水效率评价 .....              | 136        |
| 5.4 海河流域城市污染负荷总量控制对策 .....          | 137        |
| 5.4.1 城市污染负荷排放的估算方法 .....           | 138        |
| 5.4.2 海河流域城市污染负荷排放量的计算及调控路径识别 ..... | 140        |
| 5.4.3 城市区域污染负荷排放调控路径的选择 .....       | 153        |
| 5.5 海河流域城市排水体制的选择策略 .....           | 157        |
| 5.5.1 不同排水体制性能差异的识别 .....           | 157        |
| 5.5.2 海河流域城市排水体制分区 .....            | 160        |
| 5.5.3 城市特征与排水体制选择的关系 .....          | 162        |
| <b>第6章 成果总结与展望 .....</b>            | <b>164</b> |
| 6.1 基于二元循环的可持续城市水系统理论 .....         | 164        |
| 6.2 多尺度城市二元水循环系统数值模拟体系 .....        | 165        |
| 6.3 城市二元水循环系统演化机制与规律 .....          | 165        |
| 6.4 城市二元水循环系统调控机制 .....             | 167        |
| 6.5 对未来研究工作的建议 .....                | 167        |
| <b>参考文献 .....</b>                   | <b>169</b> |
| <b>索引 .....</b>                     | <b>172</b> |

# 第 1 章 | 引 言

## 1.1 我国城市水问题的现状

近 30 年，我国经历了快速的城市化发展过程。如图 1-1 所示，1978 ~ 2008 年，我国城市总数由 193 个增加到 655 个，城镇人口由 1.72 亿增长至 6.07 亿，城市化率由 17.9% 提高到 45.7%。相应地，城市供水规模由 78.75 亿  $\text{m}^3$  增长至 500.08 亿  $\text{m}^3$ ，如图 1-2 所示。虽然城市数量和供水规模从 20 世纪 90 年代后半期开始逐渐趋于稳定，但是城市规模的大型化和布局的密集化使得大型城市和城市群区域的局部水资源压力骤升。从图 1-1 可以看出，1996 年之后人口 20 万以下的小城市数量逐年下降，中等城市、大型城市的数量逐年增长，其中超大城市（200 万以上人口）的数量由 1996 年的 11 个增加到 2008 年的 23 个。大型城市的超常规发展推动了我国城市群的形成和发展，目前我国已经形成了以环渤海、长江三角洲、珠江三角洲等地区为代表的城市群，产业和人口在城市群区域高度聚集。以海河流域为例，2008 年时流域内超大城市和特大城市（100 万 ~ 200 万人口）各有 3 个，约占全国同类城市总数的 10%，同时覆盖了京津地区，是一个典型的城市密集区。而海河流域总体上属于资源型缺水地区，密集的城市和人口分布更加剧了流域的水资源压力。从图 1-3 可以看出，海河流域单位水资源承载的人口数量不仅远远高于国外典型流域，是莱茵河和琵琶湖流域的 20 多倍，也显著高于国内重点流域。因此，传统的城市

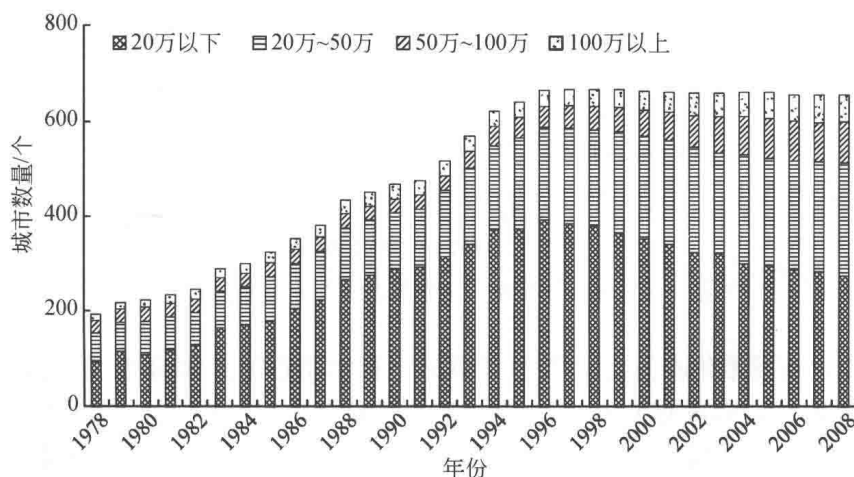


图 1-1 1978 ~ 2008 年我国城市数量和规模（按城市非农业人口统计）

资料来源：《中国城市发展报告》编委会，2009；任致远，2010

水系统是否能够应对大型城市和城市群区域未来发展过程中的水资源供需矛盾，以及如何应对这对矛盾，既是海河流域也是我国众多流域和城市群区域面临的共同问题。

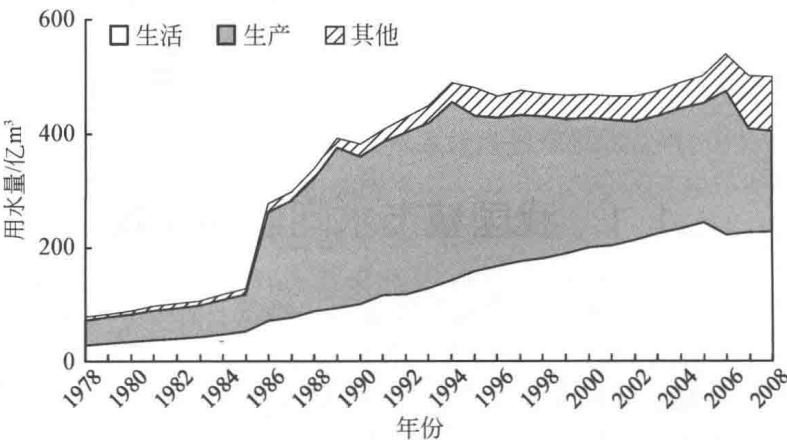


图 1-2 1978 ~ 2008 年我国城市供水量

资料来源：住房和城乡建设部，2009

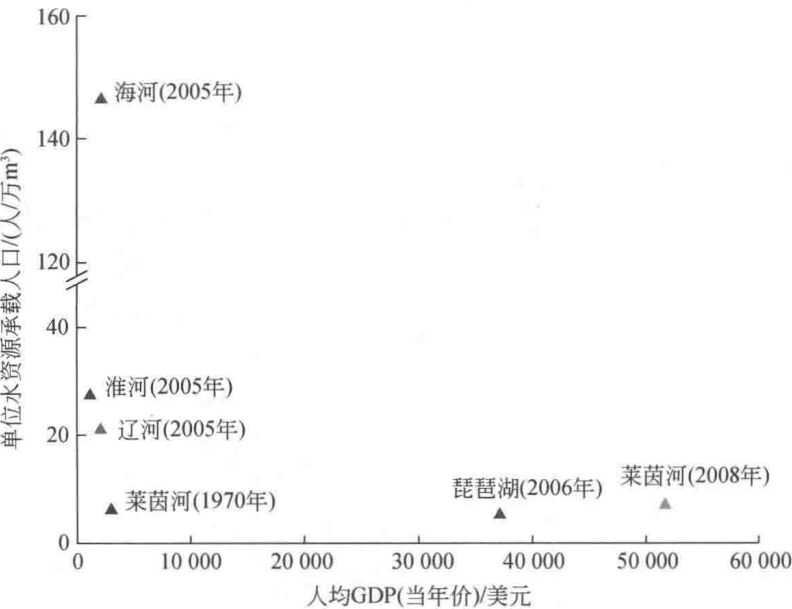


图 1-3 国内外流域经济发展水平与水资源承载力

快速工业化和城市化在消耗水资源的同时，其污染排放对水环境质量构成更大威胁。图 1-4 为我国 1985 ~ 2005 年 GDP 和主要污染物排放量变化趋势，图中数据均以 1985 年数据为参照取其倍数。从图中可以看出，我国化学需氧量（COD）排放量总体保持稳定，已经得到较为有效的控制，但是尚处于较高水平，而总氮（TN）和总磷（TP）排放量仍然随着 GDP 的增长而升高。从我国历年环境状况公报也可以看出，有机物和营养物质仍然是造成我国河流和湖泊水体污染的主要指标。与 COD 相比，城市污水处理设施对 TN 和

TP 的去除能力较为有限或者需要以较高成本实现高效去除,同时 TN 和 TP 在自然界中的迁移转化速度较慢,因此高负荷的 TN 和 TP 排放导致其在水体中累积,使其成为影响水环境质量持续改善的重要制约因素。同时,氮和磷也是重要的营养物质和资源,它们随污水进入水体实际上打破了其自然循环和平衡。因此,如何减缓和消除水环境中氮、磷污染累积,并最大限度地回收和利用氮、磷资源,是水污染防治的重要难题,也是传统城市水系统设施面临的巨大挑战。

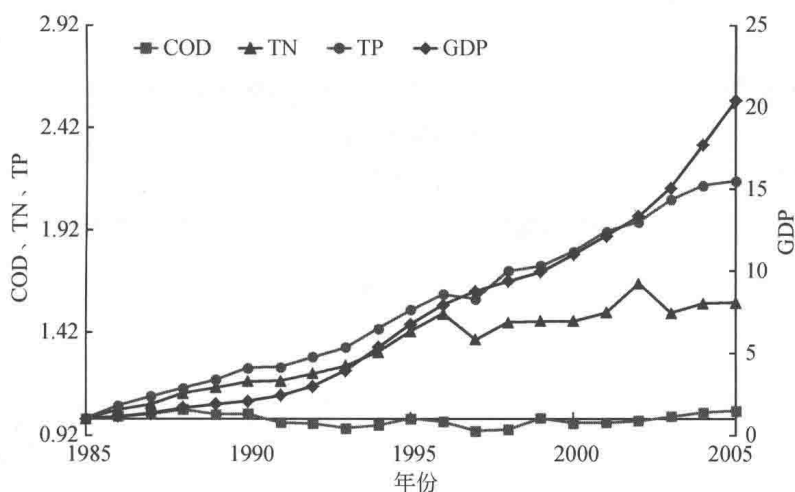


图 1-4 1985 ~ 2005 年我国 GDP 和主要污染物排放量 (以 1985 年为参照)

## 1.2 我国城市水问题的未来挑战

我国仍然是发展中国家,城市化和工业化进程仍将继续推进。根据中国工程院和环境保护部《中国环境宏观战略研究》的预测,我国人口将在 2030 年达到峰值,人口增长引起的资源环境问题将在其后一段时期更加凸显(中国工程院和环境保护部,2011)。同时,我国将在 2020 年完成工业化,到 2030 年时单位土地第二产业增加值将达到发达国家历史上同一发展阶段的 2 ~ 5 倍,工业化引起的资源和环境压力进一步增大(中国工程院和环境保护部,2011)。因此,总体来看,我国未来 20 年中资源和环境压力将持续增长,2030 年前后可能是我国未来资源和环境形势最为严峻的时期。如何应对这一严峻形势并在当前作出正确的社会、经济、技术等决策,既是一个具有长远战略意义的问题,也是一个具有现实紧迫性的问题。

这一严峻形势同样也给城市水资源和水环境带来了巨大压力。特别是,城市水系统既受短期政策因素影响,也受长期社会行为和技术的影响。由于服务寿命长,城市水系统具有很强的技术和设施锁定效应,因此当前的选择和决策一旦在短期内付诸实施,其影响将长达几十年甚至上百年(USEPA, 2002; Juuti and Katko, 2005)。另外,如果当前的选择和决策不能考虑到未来社会行为和技术变化可能给城市水系统调控带来的机遇,那么当这一机遇真正来临时,当前的选择和决策造成的锁定效应可能导致人们错失这一机遇。因

此，要应对我国城市水问题的未来挑战，一方面需要系统评估当前城市水系统的技术和设施、居民和企业行为方式、国家宏观政策等是否能够满足未来社会经济发展对水资源和水环境的需求，其可能性、潜力和差距有多大；另一方面也需要在长时间尺度下研究社会行为和技术变化对城市水系统的影响机制，并利用其中的规律进行合理调控，使得当前关于城市水系统的选择和决策仍能为未来的调控提供可能性。

### 1.3 传统城市水系统的局限

传统城市水系统的结构如图 1-5 所示。给水厂从水源取水，处理后通过给水管网输送到工业、家庭、市政设施等用户；用户排放的污水纳入污水管网，经污水处理厂处理后排入水体；雨水落到城市地面后形成径流，被雨水管网收集后排入水体，或者被雨污合流管网收集，经污水处理厂处理后排入水体。这种系统从 19 世纪末开始形成，一直沿用至今，现在仍被大多数发达国家和我国的大部分城市所使用。

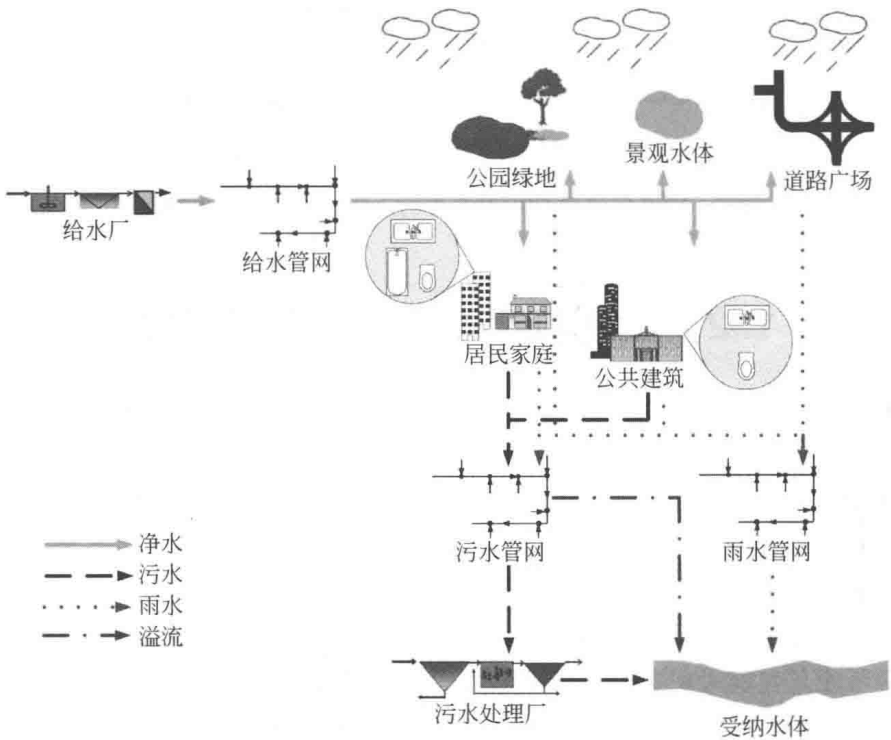


图 1-5 传统城市水系统结构示意图

但是，随着人们对城市水系统可持续性要求的提高，传统水系统的不足之处也日益受到关注。首先，传统水系统通常从经济角度考虑规模效应，因此城市的污水处理系统往往都具有规模大的特点，将污水收集后集中处理、集中排放。这样的方式虽然可以削减大量污染物，但是由于污水处理系统出水的排放具有点源特征，因此仍然会对局部水环境造成较大影响。其次，如果采用雨污分流体制，雨水管网收集的、未经处理的城市径流集中排