

中国城市科学研究系列报告
Serial Reports of China Urban Studies

中国城市水环境与水生态

四十年回顾与展望

China Urban Water Environment & Ecology
in the past 40 years: Retrospects and Prospects

中国城市科学研究会水环境与水生态分会 主编

中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

中国城市科学研究系列报告

中国城市水环境与水生态 四十年回顾与展望

中国城市科学研究会水环境与水生态分会 主编



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国城市水环境与水生态四十年回顾与展望/中国城市
科学研究会主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 7
(中国城市科学研究系列报告)
ISBN 978-7-112-23755-5

I. ①中… II. ①中… III. ①城市环境-水环境-生态
环境建设-研究报告-中国 IV. ①X321.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 095025 号

本书为中国城市科学研究会水环境与水生态分会年度系列报告的第一本。通过观察改革开放四十年来中国城市水环境与水生态的发展历程, 本书综合阐述了我国在四十年的历程中, 如何用极其有限的水资源完成了对全球最大规模的城市化和工业化进程的支撑。全书共分五章, 包括绪论、城市供水——水质与健康、城市排水——水质与循环、城市水环境——水质与生态、中国城市水环境与水生态未来展望。

本书可供从事水环境与水生态领域的专业人员、政府管理部门工作人员及大专院校师生参考使用。

责任编辑: 刘婷婷 王 梅

责任校对: 李欣慰

中国城市科学研究系列报告
中国城市水环境与水生态四十年回顾与展望
中国城市科学研究会水环境与水生态分会 主编

*
中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)
各地新华书店、建筑书店经销
北京佳捷真科技发展有限公司制版
北京同文印刷有限责任公司印刷

*
开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7½ 字数: 93 千字

2019年7月第一版 2019年7月第一次印刷

定价: 60.00 元

ISBN 978-7-112-23755-5

(34076)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

《中国城市水环境与水生态四十年回顾与展望》 编写委员会

主任：曲久辉（中国工程院院士、中国城市科学研究会副理事长、水环境与水生态分会会长）

副主任：余刚（中国城市科学研究会秘书长、水环境与水生态分会副会长兼秘书长、清华大学环境学院教授）

俞汉青（中国科学技术大学化学与材料科学学院教授）

委员：（按姓氏笔画为序，以下人员均为水环境与水生态分会委员）

王森 王志新 王凯军 王洪臣 王颖哲 韦朝海

车伍 毕军 任仁 任洪强 全新丽 刘书明

刘正洪 刘会娟 刘秋琳 江瀚 许国栋 李力

李涛 李激 李爱民 李瑞玲 李蓉蓉 余刚

张敏 张学洪 张徐祥 陈湘静 武俊良 郑兴灿

柯兵 俞汉青 徐祖信 高嵩 席北斗 黄霞

崔保山 崔福义 曾凡付 谢琤琤 霍明昕

指导：仇保兴 张悦 邵益生 刘永定 孟庆义 骆建华

秦伯强 曹业始

执笔：（按章节顺序）

高嵩 武俊良 陈湘静 全新丽 张敏 张徐祥

说明：本报告图片除另有说明外均来自网络。

序

我国的城镇化经历了四十年的快速发展，这是人类历史上规模最大的城镇化。在城镇化前半场，我们差不多把相当于两个美国的人口从农村搬到城市，在这样一个巨大的人口移动过程中，我们避免了先行国家和发展中国家四类严重的城市病：避免了先行工业国家，在城市化初期基础设施严重不足，造成了疾病流行这样悲惨的历史；避免了一些发展中国家，将大量人口单向移到城市，但不能提供相应的就业岗位，经济系统脆弱化从而陷入“中等收入陷阱”；避免了现代发达国家，在城镇化过程中造成的城市病蔓延，城市能耗比全球平均能耗高出几倍的情况；也避免了非洲等国的城镇化造成了贫民窟遍地，城市 60%~70%的人口在贫民窟中居住的现象。

作为城市的“血管”，在过去四十年的城镇化过程中，我们的供排水体系，无疑是中国城镇化进程的一个突出成就。目前，城市供水能力达 2.7 亿立方米/日，30 年来增加了近 10 倍。供水服务覆盖人口不断扩大，城市用水人口达 4.1 亿，其中公共供水服务人口达 3.8 亿，用水普及率 97.2%，公共供水服务普及率 90.6%。城市用水量基本保持稳定，与 2001 年相比，2012 年全

国城市用水人口增长了 65.4%，城市年用水总量的增长仅为 11.5%，基本稳定在 500 亿立方米，人均用水量下降至 172 升/人·天。水质标准大幅提高，指标从 35 项提高到 106 项，指标限值更严格，膜技术、臭氧活性炭等深度处理技术得到广泛应用。城市污水处理能力快速增长，2012 年已达 1.2 亿立方米/日，城市污水处理率从 2001 年的 36.4% 提高到 2012 年的 87.3%。城市污水年处理量达 343 亿立方米，COD 减排量超过 1000 万吨。

从水的方面来看，我国人均水资源量约 2100 立方米，仅为世界平均水平的 28%，在这样一个水资源缺乏的国家，2016 年，我们的农业用水占了 62.4%，工业用水占 21.6%，城镇用水占 13.6%。而根据国际上城镇化的一个规律，城镇化一旦越过中期进入后半场，城镇的用水量会恒定，会慢慢减少，不会再增加，这是由用水价格的弹性及节水器具、水循环利用不断发展带来的。

不过，这样的好消息并不能带给我们足够的安慰，因为我们未来仍存在两个巨大的用水方面的挑战。第一，由于极端气候出现，可能突发性地造成大面积降雨或者大面积旱涝，极端天气的出现使许多旱情超过以往千年的记录。另一个更大的挑战是，深入城市核心的化工企业如出现事故将造成大面积、突发性的水体污染，这个时候，下游的城市就必须把供水关掉，大面积的缺水就会突然出现。所以，我们应该有这个阶段更具针对性的措施。从发达国家的发展历史来看，以 2000 年欧盟的水框架指令（WFD）颁布为标志，欧美的水体污染治理与水生态修复行动已经从点源控制系统的完善阶段、面源控制系统的应用（TMDL）阶段过渡到流域综合管理与保护的阶段。这一阶段更加注重一体化地管理水资源、水生态、水环境和水安全等各个要素，如果说

前四十年，我们主要以工业化的线性思维来解决水的问题；那么下一阶段，正确认识水的复杂性，拥抱水的复杂性，将水生态和水环境当作是一个生命共同体来看待，以生态思维来正确认识水环境和水生态，进而指导我们的下一阶段的实践，无疑是非常重要的和紧迫的任务。

中国城市科学研究会于2017年成立了水环境与水生态分会，这是城科会最年轻的分会之一，也是下一阶段城科会重点建设的分支机构。成立的第一年，在曲久辉院士领导下将“四十年回顾”作为首个年度报告的主题，是一项非常有勇气，也是非常必要的工作。这份报告，也是行业的一次集体反思与展望，希望通过报告的思考、研究和出版，能够引起全社会的共同讨论，一起关注并参与中国城市水环境和水生态建设。我相信，下一个四十年，中国的水故事一定更加精彩，更加令人期待。



2019年3月28日

前 言

中国城市科学研究会水环境与水生态分会于 2017 年 11 月成立。在学会成立之初，我及我的同事们就决定编制一份《中国城市水环境与水生态年度报告》，希望能从客观和理性的视角，剖析、总结和研判我国水环境水生态的状况和趋势。基于这样的初衷和情怀，我们以改革开放 40 年作为第一个年度报告的纵览时段和今后系列年度报告的时间起点，编写了这本《中国城市水环境与水生态四十年回顾与展望》，总结过去以更好地关注未来。

城市水环境水生态与人类活动密切相关，在自然主导逐渐演变为人类主导的过程中，水及其环境的服务功能便被牢牢地绑架在人类疯狂追求福祉的战车上，在深刻考验人类良知的同时，也不断启发了当代人变污染为清洁的智慧，这也正是过去 40 年中国城市水环境水生态变化的可标记历程。为此，本报告从矛盾与统一的多维视角，以供水—排水—水环境为主线，分析和总结了城市供水——水质与健康、城市排水——水质与循环、城市水环境——水质与生态的基本层面，客观地表达了编写组及相关同行们对 40 年来我国城市水环境与水生态变化的主体观点：我们用

极其有限的水资源实现了对全球最大规模的城市化和工业化进程的支撑；经历并不断化解了人类史上最为复杂的水问题挑战，建成并良好运行着全球最大规模的水基础设施，拥有并发展了全球最大规模的水务产业，培育了全球最大体量的科技人才队伍，投入了全球最多的科技资源，坚定地发起了水污染防治攻坚战，努力从生态破坏走向生态文明，取得了举世瞩目的伟大成就。然而，我们仍然面临着水环境质量不高、水生态系统受损、水污染形势严峻的现实挑战，诸多历史性、结构性和不可预见性的水环境问题将长期存在，水资源、水环境和水生态问题将长期成为中国城市发展的制约性因素，我们能看到的只是一个短期节点。但展望未来，我们充满信心。在生态文明的引领和复杂挑战的鞭策下，中国全社会的共识将化为城市水环境保护与修复的强大合力，生态优先将由理念变为普遍认可并持续体验的现实，鱼游之境将不再是我们遥不可及的梦想，城市流水将与我们血脉相通。期待我们描述的不再是一个美丽的图画，而是一个用事实全方位表达的未来。我们必须为此而艰苦奋斗。

虽然我们努力做到全面、客观和准确，但用一个年度报告的形态浓缩 40 年的复杂历程确有难度，报告定多有疏漏。部分参考资料来自互联网，导致部分文献原作者无从查证。我们会汲取此次报告编制的经验和教训，力求在下一年度的报告中少些遗憾和不足。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized characters, positioned above a horizontal line that extends to the left and a vertical line that extends downwards.

2019 年 3 月 28 日

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
一、水与城	1
二、水环境与水生态	2
三、国外城市水管理	3
四、我国城市水管理：40年（1978~2018）简史	5
第二章 城市供水——水质与健康	13
一、污染与保质博弈	13
二、修标与保质同行	15
三、技改与修标协同	20
四、水质与能力剧增	27
五、挑战与创新同行	30
六、科学高效的饮用水管理机制	31
第三章 城市排水——水质与循环	34
一、污水处理事业高歌前行	35
二、环保倒逼排放标准提升	36
三、科技支撑工艺技术进步	40

四、提标助推工艺升级改造	44
五、均衡投入提升综合水平	46
六、理念引领先进发展方向	49
七、产业发展蓄积深厚力量	53
第四章 城市水环境——水质与生态	60
一、水体——从清洁到黑臭	60
二、路径——从分治到综合	62
三、调控——从控污到循环	68
四、理念——从环境到生态	70
第五章 中国城市水环境与水生态未来展望	87
一、健康安全保障是饮用水供给的无终点诉求	89
二、城镇污水处理厂是未来城市的重要资源与能源工厂	90
三、城市河湖水环境治理目标将由水质达标转向水生态安全保障	90
四、新一轮科技革命和产业变革将助推中国城市水环境与水生态 技术持续创新	91
五、中国未来城市水环境与水生态是安全健康的城市水循环系统	91
附录一 大事记	93
附录二 首届城市水环境与水生态科普创意大赛概况	105

第一章 绪 论

一、水与城

水是自然给予地球的馈赠，正因为有水，地球的生命才有了可供栖息的理想环境。水也同样孕育了人类，人类社会的发展史，同样也是一部人与水关系的发展历史。

自古以来，人类逐水而定居，傍水而建城。伦敦有泰晤士河，巴黎有塞纳河，纽约有哈德逊河，维也纳有多瑙河，布拉格有伏尔塔瓦河，上海有黄浦江。这些城市因河流而诞生，这些河流又因城市而闻名。城市是人类社会发展的伟大产物，也是人类最重要的家园。城市与水的关系也就成为人类生活中最重要的关系之一。

城市作为人类的家园，对于水的功能诉求也会体现出不同的层次，这些诉求大致可分为：**水源功能、环境容量功能和文化经济功能**三种。其中水源功能为城市的基本诉求，水为城市的生活和生产活动提供基本的物质来源；环境容量功能则体现了城市排放与水环境的互动关系，人类的**城市活动**必须在符合环境容量功能的前提下进行发展；文化经济功能则体现了人对精神生活的追求，即依靠水来实现更加美好的生活体验。

水圈是地球独有的生态系统，借助于水独特的化学物理性质，地球拥有了一个复杂的生命共同体。这种系统是非线性的，即一部分要素的变化，通常不会造成系统的即刻变化，而显性的

水环境和水生态的问题，通常是某些要素持续累积到一定程度而产生的突变和爆发。

这种非线性变化的生态系统，是我们的城市水管理面临的最巨大的挑战，即认知—实践—反馈的周期很长。对于某一类水环境的问题，人们总是在开始时知之甚少，随着结果的显现和经验的积累，逐步了解并优化实践。

二、水环境与水生态

随着城市的兴起，城市水环境的概念也随之产生，城市中的各类水体、水域都可以统称为水环境，这是一个以城市为中心进行阐释的概念；生态则是统一的自然系统，是各种自然要素相互依存而实现循环的自然链条，即只有相互关联并构成统一整体的系统才能称之为生态。从上面的定义可以看出，人类活动与城市水环境的互动（这种行为通常称为城市水管理），形成了城市水生态体系。如图 1-1 所示。

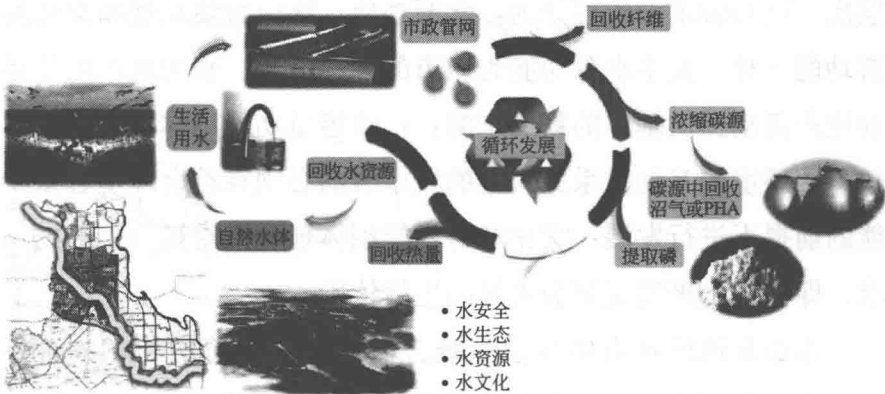


图 1-1 城市水环境与水生态示意图

三、国外城市水管理

人类与水的互动过程，是一个认识—实践—反馈—再认识—再实践的过程，水始终是城市发展的核心制约要素。成功的治水工作，总能反映出人类当时最高等级的智慧，而每一次城市水问题的解决，都能带来城市发展规模和承载空间的巨大变化。

根据城市与水的关系，美国科学家戴维·赛德拉克（David Sedlak）将城市的发展历程大致分为四个阶段：

以管道和排水沟为核心的 1.0 时代。即早期的古罗马沟渠、喷泉和下水道。大约公元前 300 年，罗马城市人口已增长到大约 50 万，居民用水需求猛增。为此，接下来的 500 年里，古罗马的工程师们修建了一套水系统——通过管网将给水系统、输水系统和回水系统形成一个完整的系统，它们的正常运作使得人们可以在人口稠密的城市里生存，这是最早的城市水系统。他们在城内通过管道输送饮用水以及排出污水，这一方法发展至整个欧洲和北美的城市。随着这些城市的持续扩增，大量废物随排水沟排出，一些水媒疾病（如霍乱和伤寒等）肆虐，严重威胁公众的健康。

以供水设施为核心的 2.0 时代。对饮用水进行处理以杀死致病微生物——采用水过滤技术和氯化处理相结合的方法使得日益增长的城市获得安全的饮用水，保护数百万城市居民免受霍乱、伤寒和其他疾病的困扰。水处理技术的巨大进步是在 19 世纪 90 年代到 20 世纪 40 年代之间取得的：从 1890 年，当马萨诸塞州的劳伦斯市为抗击伤寒，首先向塞奇威克教授寻求帮助开始；到

1940年，过滤和氯化相结合的处理工艺成为水务部门为用户处理地表水的规范为止。通过这些努力，在美国基本上消除了伤寒和霍乱等水媒疾病。正如海森定理所总结的，一个地区的死亡率的大幅下降，很明显是由于在那里修建了水处理厂。第二次变革彻底改变了城市的水系统。

以污水处理为核心的3.0时代。即污水处理厂的广泛应用。人们意识到城市已经太大，不可能仅仅依靠水体的自净能力来解决污水问题。起初，初级污水处理厂的建立是为了消除由溶解氧的耗损而引发的恶臭。但是，随着人口的增长，城市需要兴建更复杂的污水处理厂，以保护下游的供水和水生态免遭污水的负面影响。经过劳伦斯试验站和曼彻斯特大学等单位的工程师们的努力，利用微生物净化污水的技术被开发出来。但是，在水污染被公认为主要危机之前，人们不愿意在处理污水上花费每人每月多于1美元的投资。最终，多数人认为污水处理应该全国统一来解决，加上一系列配套的法律和联邦政府的拨款，这才扭转了美国水污染的局面。第三次变革是城市污水处理厂的出现，它极大地改善了污水对下游地域造成的污染。

目前正在进行的，以应对气候变化为核心的4.0时代。随着城市的持续扩大，人们意识到污水处理厂还必须去除污水中的营养素、有毒金属和合成有机化合物。人们的注意力也转移到了其他新的挑战，如控制温室气体排放和应对气候变化。

城市人口飙升和气候变化造成了一些城市水资源短缺，而其他城市水资源过量。一些污染物虽然浓度极低也对水系统构成危害。这些迹象表明即将出现第四次变革，即“水4.0”。只是在这个阶段，决策者们对城市水问题的性质知之甚少。在那些水系统显示出最大压力迹象的城市，这些问题已通过不同方式显现出来。有些地方，水肆虐泛滥；而另外一些地方，却长

期干涸；还有的地方，虽然经费不足，但仍在努力维持那些濒于散架的管道和水处理厂。第四次变革仍然在循序渐进的准备过程中，如果我们愿意投入资源、人力，加上政府有意愿把这些变革变成现实，依靠科技，多管齐下，就可以造就更好的城市水系统。

四、我国城市水管理：40年（1978~2018） 简史

柏杨在《中国人史纲》中的分析认为，有一个强有力的政府兴修水利、革除水患，是中国形成大一统帝国的主要原因。在中国的历史进程中，从不缺少治水的传说和记忆。当中国开启现代化发展之路时，中国的水管理也面临着人类治水历史上最大的挑战。

始于1978年的改革开放，让中国得以开启了全球有史以来最大规模的城市化与工业化进程，此阶段的中国城市水管理也是全球有史以来规模最大、最为复杂的一次水管理实践。在这40年中，中国要利用极其有限的水资源量，支撑数百座城市的现代化改造；要在全球人口最稠密的地区，建设规模最大的供排水系统，有效地防范健康风险；要在有限的时间内，完成城市水环境保护与修复，建设城市水生态，使之能够满足日益增长的城市生活的需求。经过40年建设实践，中国取得了举世瞩目的成就。但应该看到，我们也付出了巨大的代价，其中不乏遗憾。时至今日，中国城市水环境普遍已经到达环境容量的极限，城市的水生态需要较大的努力才能恢复到健康状态，道路依然漫长。

(1) 发展历程

回顾中国水环境的发展，可以大致分为开发为主、综合利用和保护修复三个阶段。展望未来，预计到 2050 年，可以实现我国水环境的全面好转。

1949~1978 年：开发为主阶段。在新中国成立以后到改革开放前，中国的水管理主要围绕水利建设展开，大规模的修建水库、围湖造田和退林造田，是这一时期的主要工作。水利建设基本消除了过去常年存在的洪涝灾害阴影，为城市发展做出了极大贡献，但也造成了环境破坏和水土流失，为后续的环境报复埋下了种子。

得益于苏联城市规划系统的有效推广，中国成功地避免了城市人口聚集引发的公共卫生问题。但这段时间忽视了城市污水排放和排水管网的科学规划，这个时期的排水管网基本都是雨污分流，并且普遍按照一年一遇的强度来应对降雨，这为后期频发的“城市看海”留下了隐患。

1978~2010 年：综合利用阶段。由于工业化的发展，生活与工业的用水量都处于快速增长阶段，城市的水质型缺水与水量型缺水开始不同程度地显现。比较典型的案例是“引滦入津”工程，由于用水激增造成了海水倒灌，进而引发了饮用水问题。当时天津市应用大规模调水比较成功地解决了问题，并带动了国内一批类似工程的出现。

得益于 20 世纪 90 年代初的援华贷款项目，中国开始逐步开展污水处理厂的建设工作。作为重点发展的城市基础设施建设项目，借助社会资本介入拉开了污水处理厂建设的大幕，中国的污水处理事业得到极大发展。在后续的十余年里，地方政府都将