



可持续城市水环境 系统规划方法与应用

陈吉宁 曾思育 董欣 著

中国建筑工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

可持续城市水环境系统规划方法与应用

陈吉宁 曾思育 董欣 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

可持续城市水环境系统规划方法与应用/陈吉宁,
曾思育,董欣著. —北京:中国建筑工业出版社,
2016.10

ISBN 978-7-112-19659-3

I. ①可… II. ①陈… ②曾… ③董… III. ①城市环
境-水环境-环境规划-研究-中国 IV. ①X321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 185022 号

本书在对以传统污水处理系统、污水回用系统、污水源分离系统为代表的三
种典型系统模式进行潜力判断分析的基础上,突破传统规划流程,构建了多层次、
多目标、多方案计算的可持续性城市水环境系统规划方法,并根据该方法的科学
问题本质需求,开发了相应的规划工具。

本书可供相关设计院、供水排水管理部的工程技术人员参考,也可供给水排
水、环境工程等相关专业的高年级本科生和研究生作为教材或教学参考书。

责任编辑:于莉 田启铭 姚荣华

责任设计:谷有稷

责任校对:党蕾 张颖

可持续城市水环境系统规划方法与应用

陈吉宁 曾思育 董欣 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

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

北京建筑工业出版社印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:9½ 字数:234千字

2016年10月第一版 2016年10月第一次印刷

定价:36.00元

ISBN 978-7-112-19659-3

(29172)

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)

前 言

城市水环境系统是城市重要的基础设施之一，它是在一定人类社会经济活动影响和资源环境约束下，保证城市卫生条件、公众健康安全及城市自然环境质量的一系列设施单元的组合。城市水环境系统是城市自然水循环与社会水循环的耦合点，承载了水量与水质两个维度的多种频率复杂交互，其可持续性除了直接影响到城市的可持续发展进程外，还直接关系到城市乃至整个流域二元水循环的健康性。

新技术的开发，水与物质良性循环的需求以及城市可持续发展的实践使得城市中逐渐出现了空间结构和功能目标都比传统系统更为复杂的新型城市水环境系统。面对新形势，目前通用的、基于经验的情景规划方法无法有效解决系统规划的复杂性问题。如何合理规划城市水环境系统进而促进城市可持续发展成为城市水管理中迫切需要解决的问题。基于上述需求，本书以实现城市水环境系统可持续性为原则，促进规划的合理性和科学性为目的，针对城市水环境系统规划方法及其支撑工具开展了相关研究与探讨。

本书在对以传统水环境系统、污水回用系统、污水源分离系统为代表的三种典型系统模式进行潜力判断分析的基础上，突破传统规划流程，构建了多层次、多目标、多方案计算的可持续性城市水环境系统规划方法，并根据该方法的科学问题本质需求，开发了相应的规划工具。

书中建立的可持续性城市水环境系统规划方法的关键突破是在原有规划体系中扩充了概念层次和布局层次规划两个环节。概念层次规划以城市水环境系统的可持续性为准则，以自主开发的基于不确定性分析的多属性决策模型——城市水环境系统模式筛选模型为工具，为规划区域定量筛选具有可持续性优势的系统模式，解决规划中因为决策目标和系统模式多样性造成的复杂性问题；布局层次规划在系统模式确定的基础上，以系统的可持续性为目标，以多目标空间优化模型——城市水环境系统布局规划模型为工具，利用遗传—图论集成算法实现多方案连续计算，为既定系统模式进行空间布局，确定设施规模、位置、处理技术、用户空间关系等信息，解决规划中因为决策目标和空间格局多样性而带来的复杂性问题。

运用建立的可持续城市水环境系统规划方法和工具，本书对某新兴城市区域的水环境系统开展了规划研究，确定了该区域水环境系统的模式，提供了系统的空间布局方案，并为确定污染负荷控制率、再生水使用率等规划关键变量提供了决策依据。

本书的写作参考借鉴了大量的文献资料，在此向这些参考文献的作者表示诚挚的敬意与感谢。我们在整理参考文献的过程中，难免有个别文献遗漏或处理不当的地方，在此向文献作者表示歉意。

城市水环境系统规划是一项复杂的系统工程，涉及市政工程、环境工程、城市规划、空间科学、社会学等多学科、多领域的工作。目前，国内外在此领域的研究也处于起步阶段，可用于指导实践的理论与方法尚不成熟，迫切需要广泛而深入、细致的研究工作。本书虽然在城市环境系统规划方面进行了一定的探讨，但难免存在不足之处，敬请读者谅解并给予批评指正。

目 录

第 1 章 引言 1

1.1 城市水环境系统面临的挑战 1

1.1.1 新型城市水环境系统的出现 1

1.1.2 城市可持续发展的要求 2

1.1.3 系统新建与修复的双重压力 3

1.2 城市水环境系统规划设计面临的问题 4

1.3 本书的目的、内容及意义 5

1.3.1 研究目的 5

1.3.2 研究内容 5

1.3.3 研究意义 6

1.4 本书的结构 6

第 2 章 文献综述 8

2.1 城市水环境系统 8

2.1.1 传统城市水环境系统 8

2.1.2 污水回用系统 9

2.1.3 污水源分离系统 11

2.2 城市水环境系统规划 13

2.2.1 城市水环境系统规划的现状 13

2.2.2 现阶段城市水环境系统规划的不足 14

2.3 城市水环境系统规划的相关技术研究 15

2.3.1 城市水环境系统评估技术 15

2.3.2 城市水环境系统空间布局技术 22

2.4 本章小结 28

第 3 章 城市水环境系统潜力的判断分析 30

3.1 城市水环境系统潜力判断分析的方法 30

3.1.1 基本概念 30

3.1.2 方法框架概述 30

3.2 城市水环境系统的成本效益分析（CBA） 31

3.2.1 系统性能的成本效益分类 31

3.2.2 系统性能的货币化 32

3.2.3 系统成本效益的综合比较	37
3.3 三种模式城市水环境系统在我国建设的潜力分析	37
3.3.1 潜力分析的情景设计	37
3.3.2 潜力分析的输入和参数	38
3.3.3 全国层面潜力分析的结果	40
3.3.4 各地区潜力分析的结果	44
3.4 本章小结	47
第4章 可持续性城市水环境系统规划方法的研究	49
4.1 城市水环境系统的演变及其驱动力分析	49
4.1.1 系统的演变	49
4.1.2 驱动力分析	51
4.2 可持续性城市水环境系统的基本概念解析	53
4.2.1 系统的定义	53
4.2.2 系统的性质	53
4.3 可持续性城市水环境系统的规划及其原则	56
4.3.1 规划的定义	56
4.3.2 规划的原则	57
4.4 可持续性城市水环境系统规划的方法	58
4.4.1 问题识别	59
4.4.2 信息预测	60
4.4.3 概念层次规划	60
4.4.4 布局层次规划	61
4.4.5 工程层次规划	62
4.5 本章小结	63
第5章 可持续性城市水环境系统规划工具集的开发	64
5.1 可持续性城市水环境系统规划工具集的组成	64
5.2 城市水环境系统模式筛选模型 (WaSPaM)	65
5.2.1 模型的基本框架	65
5.2.2 属性指标体系的构建	66
5.2.3 属性指标的量化及预处理	67
5.2.4 集结算子的确定	69
5.2.5 属性指标权重的确定	69
5.2.6 属性指标的集结	71
5.3 城市水环境系统布局规划模型 (WaSLaM)	72
5.3.1 模型的基本框架	72
5.3.2 模型的假设	74
5.3.3 模型的输入	77

5.3.4	模型的数学表达	84
5.3.5	模型的算法	95
5.3.6	模型的输出	106
5.4	本章小结	106
第 6 章	可持续性城市水环境系统规划的案例研究	108
6.1	案例区域概况	108
6.2	大兴新城水环境系统概念层次规划	109
6.2.1	WaSPaM 模型属性指标的量化	110
6.2.2	WaSPaM 模型属性指标权重的确定	112
6.2.3	WaSPaM 模型的输出结果	114
6.3	大兴新城水环境系统布局层次规划	115
6.3.1	区域概化	115
6.3.2	WaSLaM 模型的输入	119
6.3.3	WaSLaM 模型的输出	122
6.4	本章小结	129
第 7 章	结论和建议	131
参考文献		134

第 1 章 引 言

1.1 城市水环境系统面临的挑战

1.1.1 新型城市水环境系统的出现

城市作为水与营养物质在空间上高度富集和转化的节点,随着人口的增加、城市化进程的加快、工业化的推进以及全球气候的变化,正面临着日益严峻的水与营养物质失衡危机,由此带来的水短缺和水污染问题已经成为继温室效应之后,人类 21 世纪所面对的最为紧迫的环境问题^[1]。

2003 年联合国的《世界水资源综合评估报告》指出,到 2025 年,全世界人口将增加至 83 亿人,生活在水源紧张和经常缺水国家的人数将从 1990 年的 3 亿人增加到 30 亿人,除非更有效地利用淡水资源,否则全世界将有 1/3 的人口承受中高度或高度缺水的压力;而在这 83 亿人口当中,有近 2/3 的人口将生活在城市地区^[2]。城市缺水无疑是未来水问题的核心。

我国属于水资源极度紧缺的国家之一。从 1990 年到 2006 年,我国城市的数量由 467 座增加至 656 座,城市人口由 3.02 亿人增长至 5.77 亿人,城市化率由 26.4% 增加到 43.9%,城市的年用水量也从 361.8 亿 m^3 增长到 811.2 亿 m^3 ^[3],其增长速度是城市人口增长速度的 1.2 倍。城市用水规模的快速扩大以及持续的干旱使得全国 660 余座城市有近 400 座面临供水不足的问题,比较严重缺水的城市达到 110 个,影响城市人口约 4000 万人^[4,5]。住房和城乡建设部的内部调研报告中指出,山东省大多数城市出现了不同程度的缺水,内蒙古 18 座城市的 632 万人饮用水出现短缺,京津冀和东北部分地区的城市水源紧张。根据中国工程院《中国可持续发展水资源战略研究》的成果,到 2050 年,我国人口总数将达到 16 亿人的高峰,城市化水平将达到 60%,城市的数量将增至 1000 座以上,城市人口将达到 9.6 亿人^[6,7],如果保持现有的用水模式,我国城市的年需水量将达到 1350 亿 m^3 ,水资源短缺的问题将更加突出。

与此同时,与大多数发展中国家相似,我国还面临着由于水质不断恶化而带来的日益严峻的水环境危机。我国 2007 年的环境状况公报^[8]显示,我国七大水系 407 个地表水监测断面中,符合饮用水水源地标准的断面比例仅为 49.9%,23.6% 的断面水质属于地表水劣 V 类水质。我国约 90% 的城市水域受到不同程度的污染,在七大水系流经的 15 个主要大城市河段中,超过 87% 的河段被严重污染^[9]。全国 113 个环保重点城市的月平均不达标取水量占 20%,其中约 45% 的城市集中式饮用水源地水质存在超标现象,个别城市甚至全年超标^[10]。从整体上看,我国城市水体的污染已经处于十分严重的状况。

另一方面,近年来,随着对环境问题认识空间尺度的扩大和整体性的深化,人们也开

始关注进入城市的氮、磷等营养物质。这类物质的传统转移方式是营养物质通过工业化生产,将环境中稳定存在的氮和磷,以化肥的形式施入农田,再通过食物链由农村地区进入城市,经过城市的代谢后,大多以水作为输送介质,通过城市水环境系统进入城市的周边水体。据估算,即使采用目前最可行的污水处理技术,仍有 20% 的氮和 5% 的磷会最终存留在水环境中^[11]。显然,这种长期持续的营养物质线性转移方式打破了地球氮、磷等物质的自然循环平衡,也破坏了营养物质在人类社会代际之间的公平分配,是城市可持续发展的重要障碍。相关研究表明,根据开采方式的不同,世界上现有的磷矿石储量只能维持 100~1000 年左右的时间,当前这种使用磷的方式将使其面临被耗竭的危险,从而带来更具有挑战性的粮食安全问题^[12,13]。而对于氮元素来说,尽管自然界中氮的来源是无限制的,但无论是氮的利用还是从水介质中将氮去除都需要较大的能源投入,从本质上看,这种氮再生的过程不具有有效性,是不可取的。

为了缓解上述水与营养物质的危机,近年来,人们越来越关注城市系统中水与营养物质的循环利用,并将其视为缓解资源危机和保证资源可持续利用的重要途径。与此同时,与其相关的各种新技术的开发日新月异,也为城市系统中水与营养物质的循环提供了可行的技术保障^[14-17]。这些理念、方法和技术上的变革,使得处于水与营养物质流动耦合节点的城市水环境系统也发生了质的变化,从传统的由污水管网和污水处理厂组成的直线型、开环式、空间布局集中的简单系统,向以污水再生利用和污水源分离为典型代表的新型可持续系统转变。

除此之外,近年来,随着膜技术、自动控制技术和传感器等技术的快速发展和应用,城市污水处理的经济规模效应显著下降,污水处理厂正逐步向小型化和分散化的方向发展^[18]。与此同时,在经过几十年的运行后,传统集中式污水处理维护和管理问题日益突出,在污水的收集和输移过程中减少对管网系统的依赖已经成为一种新的技术需求^[19],这也使得城市污水处理出现了与传统大规模系统不同的,相对小规模的组织式新系统。

综上所述,为了缓解城市所面临的、日益严峻的水与营养物质的危机,以污水再生利用和污水源分离为典型代表的新型城市水环境系统开始出现。同时,材料、生物、自动控制等新技术的开发与应用为这些新型系统的使用及其小型化提供了技术保障。这些新型城市水环境系统的出现满足了城市内不断增加的水与营养物质循环的需求,也使得历时百年的单一结构特征的传统系统在结构和布局上开始呈现多样化的需求,城市水环境系统空间布局的复杂性显著增加。这种变化导致传统的系统规划方法不能满足系统的需求,迫切需要开发新的城市水环境系统规划方法和工具。

1.1.2 城市可持续发展的要求

城市水环境系统是城市可持续发展的重要基础设施之一。可持续发展的目标要求水环境系统具有多样化的功能,除了具有传统系统保证城市卫生条件、保障公众健康安全的基本功能外,还应当具有环境、资源、经济、技术和社会等多方面的可持续性。

1996 年,Beck 等人首次提出了城市水环境系统应当具有可持续性^[20],城市污水处理应当对污水及其中的营养物质进行回收再利用,以减少人类活动对自然水循环和营养物质循环的干扰。随着众多国家开始实施城市的可持续发展战略,包括城市水环境系统在内的

城市水系统开始面临着如何实现可持续性的问题,可持续性城市水系统(Sustainable Urban Water System, SUWS)的概念被提出。针对SUWS,瑞典、英国、德国、澳大利亚、新西兰等国家都开展了大量的研究^[21-27],但目前对于SUWS来说,还没有统一明确的定义。研究中普遍认为, SUWS是与以经济性为唯一决策目标的城市水系统相对应的系统,它要求城市水系统应当同时满足环境、经济和社会等方面一系列的要求,例如系统资本投资、资源使用、可接受性等方面的要求^[28];要求城市水系统在为城市的公众健康和环境提供可靠保护的同时,尽可能少地使用资源^[29],在物质循环中力求城市水系统是一个闭环的系统^[30]。

根据上述SUWS的特征,城市的可持续发展要求城市水环境系统所具有的多种功能,包括:

(1) 基本功能:城市水环境系统能够有效地保证城市的卫生条件,保障公众的健康安全。

(2) 环境可持续性:城市水环境系统应尽可能少地向城市环境中排放污染物,尽可能地改善城市的环境质量。

(3) 资源可持续性:城市水环境系统应当尽可能少地使用资源,并且尽可能多地回收进入系统的资源。

(4) 经济可持续性:城市水环境系统应当能够被支付,具有经济可行性。

(5) 技术可持续性:城市水环境系统对未来技术的变化应当具有较强的适应性。

(6) 社会可持续性:城市水环境系统能够被公众所接受。

在这些众多功能的要求下,与传统系统相比,可持续发展将使得城市水环境系统的功能目标复杂化。

1.1.3 系统新建与修复的双重压力

1999年的联合国《世界人口展望》^[31]中指出,从2000年到2030年,世界人口的增长将主要集中在城市。城市人口的增长使得城市的规模扩大、密度增加、空间变异性增强,这就要求未来的城市必须新建大量的城市水环境系统,以满足城市发展的需求。英国政府预测,到2016年,英国城市将新增400万居民,这给城市水资源和环境将带来巨大的压力,如何选择合适的城市水环境系统来应对城市人口的增加,并能够促进城市的可持续发展成为英国城市水管理者亟待解决的问题^[32]。对于发展中国家,新建城市水环境系统的压力更为突出。由于资金匮乏等原因,发展中国家城市水环境系统建设较晚,现有普及率较低,而且在未来,世界人口的增长将主要集中在发展中国家的城市^[33],这意味着对城市水环境系统的需求更为强烈。根据我国环境保护部的统计数据^[34],2007年我国建制市的污水排放量为556.8亿 m^3 ,化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)为1381.8万t,氨氮(Ammonia Nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)量为132.4万t。而同期我国的污水处理能力只有377.3亿 m^3/a ,占污水排放总量的68%,运行过程中又由于污水管网不健全,运行费用困难等问题,2007年我国实际的城市污水处理率只有49.1%。也就是说,2007年,我国城市有280亿 m^3 的污水未经处理,直接排入城市水体中,城市污水排放已经成为城市水环境质量不断恶化的主要原因之一。根据中国工程院的研究结果^[6]估算,到2050年,我国城市污水排放量将达到1080亿 m^3 ,根据现有的污水处理水平,COD的平均去除率

为 80%， $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率为 70%^[35]，2050 年全国城市的 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量如果要维持 2007 年的水平，城市污水处理率至少要达到 95%。如果要在目前的城市水环境系统建设状况下实现该目标处理率，根据《城市污水处理工程项目建设标准》^[36]，到 2050 年，我国城市污水处理的累计投资至少要达到 3100 亿元，如果再考虑配套管网的建设，系统的投资将更大。

此外，随着时间的推移，已经建成的城市水环境系统将面临日益严峻的修复压力。澳大利亚^[37]根据城市水系统建设材料的寿命、系统运行的环境以及工况等因素，建立了城市水系统的寿命矩阵，其研究表明，污水管网的平均寿命大约为 80~100 年，处理设施等其他构筑物的平均寿命为 15~50 年。根据这个结论，现有的城市水环境系统，特别是系统普及较早的欧洲和北美发达国家城市的系统已经开始老化，普遍进入系统的修复期或者重建期。在过去的 20 年中，美国已投入了近 1 万亿美元进行城市水系统的修复和重建，但美国环保署（United States Environmental Protection Agency, USEPA）的相关研究表明，即使保证这样的投资强度，到 2020 年，美国在城市水系统修复和建设方面仍将会出现 5000 亿美元的资金缺口^[38]。在我国，随着近些年城市人口的增长，环境标准的严格，20 世纪八九十年代建设的城市水环境系统也开始进入升级和改造阶段。

由此可见，不论在国际还是国内，城市水环境系统都面临着新建、修复和升级改造的多重压力，如何在建设和修复中改造传统系统的弊端，提高系统的可持续性，也是摆在我们面前的一项迫切任务。

1.2 城市水环境系统规划设计面临的问题

新型城市水环境系统的出现，城市可持续发展对城市水环境系统可持续性的要求使得系统的结构、布局与功能目标等开始出现多样化的趋势。这些变化显著增加了系统规划的复杂性，主要表现在以下三个方面：一是由于系统结构多样化而导致的规划过程中系统可选模式的多样化；二是由于系统布局多样化而导致的系统空间格局的多样性；三是由于系统功能目标多样化而导致的规划决策目标的多样化。对于这一系统规划的复杂性问题，现有的以系统经济性为唯一目标，基于经验的情景规划方法显然不能有效地对其进行解决。因此，如何合理地对城市水环境系统进行规划进而促进城市的可持续发展已成为了城市水系统管理中迫切需要解决的问题。

要合理地对城市水环境系统进行规划，其核心是要在系统规划的过程中解决上述系统规划所面临的复杂性问题，主要包括以下三个方面：

（1）如何正确地认识包括传统系统、回用系统以及源分离系统在内的多种模式城市水环境系统之间的差异？该问题的核心是要对各种模式系统的潜力进行判断分析，进而明确各种模式系统适用的条件。

（2）为了促进城市的可持续发展，使城市水环境系统具有可持续性，应当构建什么样的规划方法来逐一解决系统规划过程中所面临的由于可选模式、空间格局及决策目标多样性而带来的规划复杂性问题？该问题的核心是在明确可持续性城市水环境系统定义、功能和特征的基础上，确定系统规划的目标和基本原则，进而建立能够解决系统规划复杂性问题

题的规划方法。

(3) 应当开发什么样的辅助规划工具来解决城市水环境系统规划的复杂性问题, 并且提高系统规划的合理性和科学性? 该问题的核心是根据所构建的系统规划方法的科学问题本质, 建立能够解决系统规划复杂性的相关模型工具, 为建立的规划方法提供实际操作的技术保障。

上述三个方面无疑是解决城市水环境系统规划复杂性问题的关键, 对它们的科学回答将为城市水环境系统的规划提供合理的决策依据, 将促进城市水系统的可持续性建设。

1.3 本书的目的、内容及意义

1.3.1 本书的目的

本书针对 1.2 节提出的城市水环境系统规划复杂性所迫切需要解决的三个方面的问题, 分析了不同模式城市水环境系统的潜力, 开展了可持续性城市水环境系统规划方法的研究, 并开发了相应的规划工具。本研究的目的是建立一套科学合理、满足城市可持续发展需求、能够为城市水系统管理提供决策支持的城市水环境系统规划方法及规划工具, 并将其应用于具体的城市水环境系统规划实例研究当中。

1.3.2 研究内容

根据 1.2 节提出的城市水环境系统规划亟待解决的三个方面问题, 本书的研究内容包括以下四个方面:

(1) 各种模式城市水环境系统的潜力判断分析

在成本效益分析的框架下, 利用物质流分析、工程经济学相关知识及不确定性分析方法, 建立考虑城市水环境系统规划不确定性影响的、能够对系统进行长远潜力判断的系统潜力分析方法, 并利用该方法对传统系统、回用系统和源分离系统在全国层面和分地区层面的潜力进行估算, 初步分析在我国使用回用及源分离两种新型城市水环境系统的时空条件。

(2) 可持续性城市水环境系统规划方法的构建

基于对城市水环境系统演变的驱动力分析以及可持续性城市水环境系统基本概念的解析, 提出可持续性城市水环境系统规划的目的及原则。依据规划原则, 在现有系统规划方法的基础上, 构建概念层次规划和布局层次规划两个重点规划环节, 提出以系统可持续性为目标, 以多层次、多目标、多方案计算为特征的可持续性城市水环境系统规划方法, 解决城市水环境系统规划过程中因为系统模式、空间格局和决策目标多样性而带来的复杂性问题。

(3) 可持续性城市水环境系统规划工具集的开发

根据所建立的可持续性城市水环境系统规划方法的需求以及科学问题的本质, 开发可持续性城市水环境系统规划工具集, 包括用于系统概念层次规划的、不确定性分析框架下的多属性决策模型——城市水环境系统模式筛选模型; 用于系统布局层次规划的、多目标

空间优化模型——城市水环境系统布局规划模型，并为城市水环境系统布局规划模型开发用于多目标空间优化的图论—遗传集成算法。

(4) 可持续性城市水环境系统规划案例研究

利用所建立的可持续性城市水环境系统规划方法以及开发的相关规划工具，对某新城水环境系统进行规划研究，确定当地城市水环境系统的模式与空间布局，完成系统概念层次和布局层次的规划，为该地区水环境系统工程层次的规划提供推荐方案。同时，案例研究将对本研究工作的实用性进行检验。

1.3.3 研究意义

首先，本书建立的城市水环境系统潜力判断分析方法能够对各种模式城市水环境系统的长远潜力进行判断，加深了对各种模式系统的认识。利用该方法对三种模式系统（传统系统、回用系统以及源分离系统）在全国及各地区两个层面进行潜力估算的结果，明确了三种模式系统适宜建设的时空条件，为我国可持续性城市水环境系统规划政策的制定提供了依据，与此同时，还反映了可持续性城市水环境系统规划方法及工具集构建的必要性。

其次，可持续性城市水环境系统规划方法和工具集的构建解决了可持续性城市水环境系统规划过程中因为决策目标、模式选择和空间格局多样性而带来的系统规划复杂性问题；解决了在空间上生成和筛选出多目标、多模式的可持续性城市水环境系统规划方案的技术难点；降低了城市水环境系统规划过程中的主观性和经验性，提高了科学性和定量化水平，为城市水环境系统的规划决策提供了有效的工具。

最后，应用所建立的规划方法和规划工具进行的城市水环境系统规划的案例研究进一步体现了本研究在城市水环境系统规划过程中的决策支持作用以及实际意义。

1.4 本书的结构

本书一共分为 7 章，结构如图 1.1 所示。第 1 章即本章，介绍了开展可持续性城市水环境系统规划方法与规划工具研究的背景、目的、意义、内容以及本书的结构。第 2 章在广泛文献调研的基础上，介绍了传统城市水环境系统以及污水回用和污水源分离两种新型城市水环境系统的组成、结构及特征，较为系统地综述了国内外关于城市水环境系统规划的现状以及规划技术研究的进展，分析了现有研究成果与本研究需求之间的相似与不同。第 3 章建立了城市水环境系统潜力分析判断的方法，并利用该方法对传统系统、回用系统以及源分离系统三种模式的城市水环境系统在全国及各地区的潜力进行了分析。第 4 章提出了可持续性城市水环境系统的定义，分析了其特征，并在此基础上制定了可持续性城市水环境系统规划的原则，构建了可持续性城市水环境系统规划的方法。第 5 章根据可持续性城市水环境系统规划方法的需求，开发了包括城市水环境系统模式筛选模型和城市水环境系统布局规划模型在内的可持续性城市水环境系统规划的工具集。第 6 章开展了城市水环境系统规划的案例研究，检验了本研究构建的规划方法和开发的规划工具的实用性。第 7 章为结论与建议，总结了本研究取得的主要研究成果，并对后续研究提出了建议。

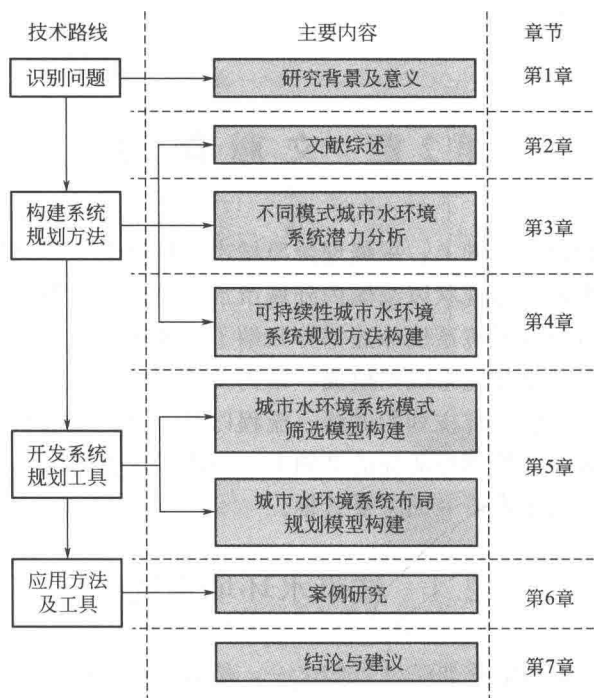


图 1.1 本书结构

第2章 文献综述

本章在广泛文献调研的基础上,根据现阶段城市水环境系统研究的热点,对城市水环境系统、城市水环境系统规划现状以及国内外城市水环境系统规划方法和技术的研究进展进行了综述。其中,城市水环境系统综述部分归纳了传统城市水环境系统以及污水回用和污水源分离两种新型城市水环境系统的组成、结构及特征;城市水环境系统规划现状综述部分总结了现有城市水环境系统规划的方法、流程以及不足;城市水环境系统规划方法和技术研究进展综述部分在介绍现有研究的基础上,分析了现有研究成果与本研究需求之间的相似与不同,进而提出了本研究的主要目标。

2.1 城市水环境系统

城市水环境系统是城市的重要基础设施之一,是城市水系统主要的子系统,其雏形可以追溯到公元前 5000 年古希腊克里特岛上弥诺斯居民修建的简单下水道系统。1887 年,德国第一座污水处理厂在法兰克福建成并运行,标志着以管网和处理设施为主要组成,以收集、输送、处理和排放城市污水为一体的传统城市水环境系统开始形成并普及^[39]。

城市水环境系统在结构上连接了城市自然水体和用水用户,在功能上受到城市自然水体与用水用户需求的驱动,具有自然和人工的复合性。同时,城市水环境系统将水与营养物质的自然循环和社会循环在城市节点耦合,是城市可持续发展的重要保障之一。

2.1.1 传统城市水环境系统

传统城市水环境系统(下文简称“传统系统”)诞生于 19 世纪的欧洲,沿用至今已有 100 多年的历史,目前仍被大多数城市广泛使用。传统系统的典型结构如图 2.1 所示,包括污水管网和污水处理厂两部分。城市生活用水用户,包括居民生活用户和公共行业用户,以及工业用户的混合排水是传统系统的输入,各用户将产生的污水排入城市污水管网,经过管网的输送,进入污水处理厂,处理后污水直接排入城市水体。传统系统能够将城市产生的污水进行有效、快速地收集、输送和处理,使得城市污水得到及时安全的排放,保障了城市的卫生条件和公众健康安全。

根据传统系统的输入、结构及其建设的规模可以发现,传统系统具有混合排水、开环结构和集中布局三个典型特征^[40]。

(1) 混合排水

所谓“混合排水”是指传统系统以水为介质,水与人类的排泄物等物质的共同排放。

传统系统的这一特征主要是因为传统系统的形成是基于 19 世纪欧洲发展起来的以水冲厕所为特征的生活污水的排放系统^[41],它使用水将城市主要的代谢物质——人类排泄物排出城市,在防止疾病传播和改善城市卫生条件方面起到了巨大的作用。然而,

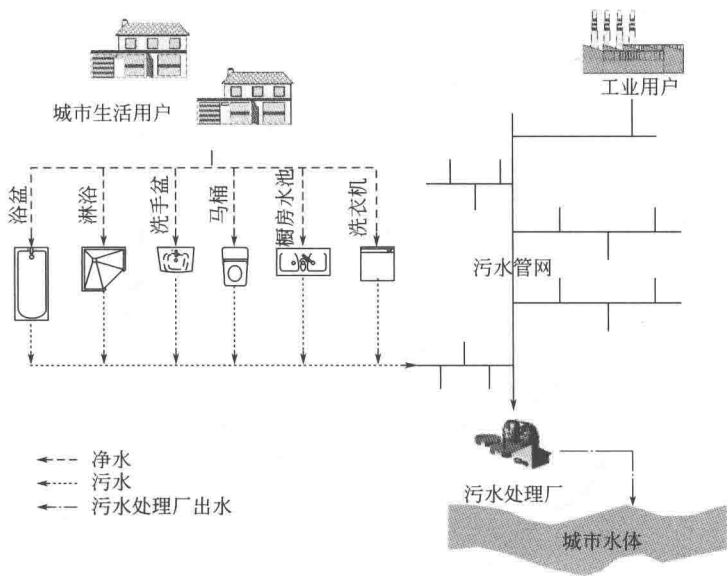


图 2.1 传统系统的典型结构

传统系统这种将水与物质耦合的排放方式使得城市污水的产生量大幅度增大，不仅增加了城市水环境系统的输送负担，也要求系统具有更高的处理能力和处理效率，这些都导致系统的建设和运行均须付出更多的经济代价，才有可能实现系统其保障城市的水环境质量的函数。

(2) 开环结构

从图 2.1 中可以看出，传统系统是一个直线型的开环系统，不论是水还是以水为介质输送的城市代谢物质，一旦进入系统，经过输送和处理后，都将排入城市水体进入下游，不再返回城市系统。这种简单直线型的开环系统结构强调了传统系统的排污治污能力，同时也使得城市水环境系统直观明了，易于规划、控制和管理。但对于水来说，这种系统结构难以为其提供再次进入城市的路径；对于城市代谢物质来说，也没有提供其有效回收利用的节点。

(3) 集中布局

传统系统的空间布局形式大多为集中型，即污水处理厂通常建设在系统服务区域的下游、地势较低的地方，区域内所有用户的排水通过污水管网输送到污水处理厂进行集中处理。传统系统集中的布局形式遵循了污水处理厂的规模效应，使得系统的建设具有一定投资和运行优势。然而，集中的传统系统中庞大的污水管网使得污水在管道内的停留时间过长，增大了地下水渗入管网的可能，使得污水量增大，增加了污水处理成本。此外，集中系统中局部干管的堵塞和断裂将影响整个系统的运行和区域的正常排污，使得城市水环境系统的可靠性降低。

2.1.2 污水回用系统

污水回用系统（下文简称“回用系统”）是在传统系统的构成上添加了再生水厂和再生水管网所组成的新型城市水环境系统，如图 2.2 所示。回用系统中收集的污水经过城市

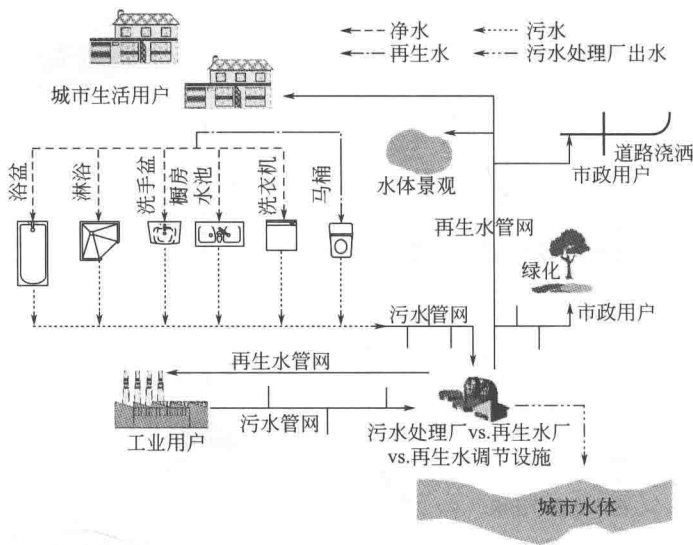


图 2.2 回用系统的典型结构

污水处理厂处理后，一部分排入城市水体，另一部分进入再生水厂，经过进一步处理后，由再生水管网输送给城市中各个再生水用户。城市中主要的再生水用户包括居民家庭用户和公共行业用户，主要使用再生水进行冲厕；市政用户，主要使用再生水进行道路浇洒和绿化；工业用户，主要使用再生水进行生产过程中的冷却、洗涤、锅炉用水等；城市景观，主要使用再生水进行景观河湖或湿地的补水^[42]。对于不同的再生水用户，再生水需求水量的季节性变化和水质也不相同。

在回用系统中，再生水厂所采用的处理技术包括两类，一类为污水的深度处理技术，例如化学除磷、过滤、膜技术等，它将进一步去除污水处理厂出水中的污染物，使其满足再生水用户的水质需求；另一类为污水消毒技术，包括氯消毒、紫外消毒等，它将去除污水处理厂出水中的微生物，以保证再生水使用的卫生安全性。此外，再生水的供给与传统水源的供给明显不同，由于再生水的产生是连续的，而且在大多数情况下，再生水产生量与需求量的峰值之间并无相关性，产生的再生水如果不能立即利用，就必须进行储存，因此，在回用系统中，再生水调节设施，特别是季节性调节设施，也是系统的重要组成部分之一。再生水管网属于有压管，但与传统给水管网不同，它可以采用枝状管网进行铺设。

从图 2.2 所示的系统结构和上述对系统的描述中可以看出，与传统系统相比，回用系统最大的特征是为进入城市的水资源构建了循环路径，使得城市水环境系统的结构由开环变化为闭环。回用系统的这一特征降低了城市对新鲜水资源的依赖性，减缓了人类社会对自然水循环的干扰，也减少了城市水体的污染物接纳量，有助于改善城市的水环境质量。由此可见，回用系统既可以节约水资源又可以减少城市的水污染负荷排放，是一种同时具有资源效益和环境效益的新型城市水环境系统。

回用系统结构上的变化使得其与传统系统相比，在系统空间布局特征上也存在着差异。传统的集中系统布局必然导致回用系统具有大规模的有压再生水管网，这使得城市水环境系统的经济投资大幅增加。如果只考虑经济影响，通过计算规模效应下城市水环境系统的理想规模，可以发现，回用系统的理想规模要小于传统系统的理想规模^[43]。除了经