

城市河网连通循环净化系统构建及其关键技术

马超¹, 于博¹, 宾零陵^{1,2}, 乔雅男¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津师范大学 地理与环境科学学院, 天津 300387)

摘要: 针对城市河网连通性欠佳、水环境质量下降及河网调控难度大等问题, 提出基于活水循环耦合高效净化的城市河网水环境改善新模式, 并提出河网整治过程中待解决的关键问题, 即城市河网全局补水调控技术、量化整装净化技术、精细化水环境模拟与信息互馈机制、信息集中与全局处理。在此基础上, 阐述了新发展形式下城市河网连通活水循环净化系统的内涵与总体需求, 提出了涵盖河网整治、河网水体净化、河网水流-水质模拟评价、水质在线监测等4个方面的系统架构, 明确了城市河网水体动态连通调控-定量整装成套净化耦合技术、河网水体动态监测-精细化模拟耦合技术、城市河网水环境全局信息管理与全面互联等关键技术问题, 给出了城市河网未来的规划治理方向。

关键词: 城市河网; 连通循环; 水质净化; 综合调控; 系统架构

中图分类号: TV212.5⁺1; X552

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0007-08

Construction and key techniques of circulating water purification system connected with urban river networks

MA Chao¹, YU Bo¹, BIN Lingling^{1,2}, QIAO Yanan¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Focusing on the problems faced by urban river networks, such as the lack of connectivity, deterioration of water quality and difficulty in river network regulation, a new comprehensive improvement method of water environment in urban river networks is proposed based on the techniques of running water circulation coupled with efficient purification. Some technical problems demanding immediate attention in the process of river network regulation are discussed, which are overall water supply regulation technique for urban river networks, quantitative and integrated purification technique, refined water environment simulation and information mutual feedback mechanism and information centralization and global processing scheme. Based on these problems, we expounds the connotation and overall requirements of the purification system connecting urban river network with running water circulation under the new situation, and puts forward the framework covering four aspects of the system, including river network restoration, river network water purification, river network water flow-water quality simulation evaluation and water quality online monitoring. The key technical issues such as the coupling technique of urban river network water dynamic connection regulation-quantitative integrated purification, the coupling technique of river network water dynamic monitoring-refined simulation, as well as the global information management and connection of river network water environment. This study can shed some light on the direction of future planning and management of urban river networks.

Key words: urban river network; connected cycle; water purification; comprehensive regulation; system framework

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-06-01

基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX07106004)

作者简介: 马超(1981-), 男, 湖南株洲人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂水利工程综合调控理论与方法研究。

通讯作者: 宾零陵(1987-), 女, 湖南湘潭人, 博士, 讲师, 研究方向为水文学及水资源。

1 研究背景

城市河网作为城市重要的资源储备和环境载体,能够满足防洪排涝、人文景观等社会需求,对经济和社会发展起到至关重要的作用。城市化进程中为满足发展需要,人们对城市河流进行了不同程度的人为改造,直接改变了城市河网的自然连通结构,对其功能产生了很大影响^[1-3]。许多城市河网的结构连通性下降,河道主干化趋势明显,河网部分河段水流流速缓滞,水体置换周期增长,自净能力下降^[4-7]。此外,同期水环境保护措施滞后,且河道外源污染严重,水质恶化严重。相关部门利用污染控制与集中处理、生态补水、水体净化等措施改善城市水环境,取得了初步成效^[8-9]。但生态补水技术成本较高,且在部分水源短缺城市难以维持,补水效果受水源水量、水质和河网特性等多因素影响^[10];而生态浮床、生物膜技术等常见的水体净化措施改善周期长,且净化效果受环境影响明显^[11]。目前多类型技术组合实现城市河网水质改善目标的治理效果良好^[12],但是针对城市水环境治理,仍缺乏指导性的城市河网水环境治理的系统架构及技术体系。在我国推进建设“美丽中国”的战略背景下,如何结合前人治理成果,创新河网水环境治理模式,提出将水

质现状、河网特征和水质目标有机融合的架构体系,是亟待解决的现实问题。

本文明确了新时期城市河网连通活水循环净化系统的内涵与总体需求,提出了涵盖河网连通整治、水体净化、水流-水质模拟评价以及水质在线监测等4个方面的连通活水循环净化系统总体框架,提出了城市河网动态连通-定量净化耦合技术、动态监测-精细模拟耦合技术、动态决策-全局管理耦合技术等关键技术,以期城市河网水环境修复提供参考。

2 城市河网水环境治理的现状和问题

2.1 城市河网水环境治理现状

从20世纪中后期开始,研究者们以平原河网为对象,先后对台州市温黄平原、杭州市江干区、张家港市中部等地城市河网水环境改善方式进行了研究,主要围绕“源头治理”、“过程控制”、“终端净化”等方面开展研究工作^[13-26],不同河网改善方式及效果分析如表1所示。源头治理是通过减少入河污染物从而减少河道污染,过程控制是利用水利设施等来改变河网连通结构和水力联系从而促进污染物的扩散和稀释,终端净化是依靠自然界物理-化学-生物反应实现污染物的有效降解。

表1 不同河网改善方式及效果分析

河网位置	改善方式			效果	文献来源	
	源头治理	过程控制				终端净化
	减少污染物来源	改变连通结构	改变水力联系	物-化-生措施		
台州市温黄平原河网	改变入河污染物削减率	无	改变水源数量、引水量	无	河网整体平均水质能够得到良好改善,部分区域改善效果不明显	杜文娟等 ^[13]
杭州市江干区河网	无	无	改变水源水质、引水量	无	随着水量的增大,水质改善幅度逐渐变小;随着水质的提升而改善幅度提高	陈振涛等 ^[14]
张家港市中部河网	无	控制内河节制闸调度工况	改变引水天数	无	随着引水天数增加,氨氮浓度改善率日均提升幅度逐渐降低,节制闸调度工况对改善水质起到一定促进作用	许益新等 ^[15]
江苏里下河地区河网	无	无	改变引水量	无	调水对氨氮浓度的影响最明显,对水质的改善存在时空异质性,调水结束后水质又恢复到调水前水平	马小雪等 ^[16]
苏州城市中心区河网	无	无	改变引水季节	无	大部分区域的水质都能达到更优一级标准,各站点污染物浓度都有大幅减少,最多减少了49.7%	李晓等 ^[17]

续表 1

河网位置	改善方式			效果	文献来源	
	源头治理	过程控制				终端净化
	减少污染物来源	改变连通结构	改变水力联系			物-化-生措施
天津市中心城区河网	无	新建泵站	改变流量配比、补水进出口、分时分区补水	无	可利用有限的补水资源有效地改善水环境,推荐补水调度方案的年度补水调度需水量 $3.19 \times 10^8 \text{ m}^3$	马超等 ^[18]
太湖流域河网	无	控制闸泵水利工程	改变引水格局、引水水源	无	通过合理调控闸泵水利工程,辅以太引水,可以保持适当的水位差,促进水体流动,对水环境改善起到了一定作用	蔡梅等 ^[19]
南通市河网	消减污染源	无	改变引水轮次	无	第 2 轮引水和第 4 轮引水后不同区域对应水质改善	陈建标等 ^[20]
昆山主城及周边区域	削减污染源	控导节制闸	改变引水水源	无	基本消除黑臭,辅以控源截污工程后,水质基本达到水功能区目标要求,河道黑臭消除得到巩固	尚钊仪等 ^[21]
常熟市城市河网	无	改变水利工程调度方式	改变引水量	无	河道整治使结构连通性增强,水质平均改善率提升至 30% ~ 50%。结构性连通提升提高了调水效率,促进了水力连通与水质改善	崔广柏等 ^[22]
台州市东官河河网	改变入河污染物削减率	控制河网内的闸坝	改变引水量	无	近期区域内污染物削减 60%,控制调水量为 $2000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时,水质可达Ⅳ类;远期区域内污染物削减 90% 时,水质基本可达Ⅲ类	逢勇等 ^[23]
常州市平原河网	削减污染源	控制上游开闸	改变引水量	自净能力	上游引水水质良好的情况下,上游开闸引水有利于主干河道水环境的改善,对于内部支河,需提高上游污水厂出水水质,改善水生态环境	赵轩等 ^[24]
上海世界博览会园区河网	控制排污量	控制泵闸	改变引水量	生态浮岛、河道底质	对河网常规污染、初期雨水污染、突发水污染和泵闸故障 4 种情况下的调度方案进行模拟,提出适应小区、多节点控制河网水环境治理应急调控预案	刘贵平等 ^[25]
苏南河网	无	无	无	生态修复等 3 种技术	3 种工艺技术对水中氮、磷等污染物质的去除效果较好,并具有良好的生态景观效果	陈众等 ^[26]

2.2 城市河网治理过程中存在的问题

2.2.1 河网循环连通性差,补水利用率低 多类型闸坝工程的建立使城市河网连通特性与自然河道相差较大^[27]。河网连通逐步由传统“自然坡降”驱动结构演变为“人工闸控”驱动结构,河道多发展形成

“水库型河道”。同时,闸泵调控下水体流向不定,自然形成的树状河网被赋予环状河网属性,水流容易沿最短水力路径流出河网,可能存在引调水量大、补水效率低的状态^[28-29]。

2.2.2 河网水体净化缺乏定量化整装成套技术

目前,河网水环境治理主要通过物理、化学及生物措施进行修复改善^[30]。物理措施常采用曝气复氧或修建跌水建筑物,改善效果好且成本低,但是需要外接电源供电^[31-32]。基于化学和生物原理的生物膜、生态浮床和微生物强化技术也是改善河道水质的有效方法^[33-39]。生物膜法处理效率较高,接触停留时间长,能有效降低水体污染物浓度,但置于河道内的生物膜载体可能会影响到水域的航运和泄洪等功能^[40-41]。生态浮床技术和微生物强化技术分别通过植物和微生物来净化水质,属于近自然修复,但区域针对性强,存在外来物种入侵风险,且污染物吸收饱和后,需要进行定期采摘和补充更新。鉴于单一水质净化技术存在着一定的缺陷,研究者针对具体的水质污染指标,提出定性组合方案,但缺少实验模拟净化效果与实际河道净化效果比尺的关系,难以综合考虑河网结构连通性、水深、流速等其他水力学参数给出定量的工程规模和布置策略^[42]。因此,研究综合净化措施的水动力特性及净化规律和标准化的河道净化技术,并研发定量整装成套模块化净化技术是未来城市河网改善的主要研究方向。

2.2.3 精细化模拟存在盲区,与治理效果的动态互馈机制不明确 为了掌握城市河网污染物的浓度变化及迁移转化趋势,研究者常采取水质数值模拟方法进行分析,但是目前河网中许多净化措施的参数化表达难以用数学方法实现。建模过程中对部分内容的概化处理,容易失真;求解时方程的离散与边界条件的处理,以及基础数据的真实性和完整性也会影响模型的精度和预报的准确性^[43]。以上不足造成城市河网水环境精细化模拟存在盲区,不能全面科学地支撑城市河网水环境全局改善调控决策,与实际治理效果间动态互馈机制不明确,难以保证水流运动及水质演变规律得到全面的总结和探索。

2.2.4 信息管理独立分散,统一决策难度大 城市河网中水环境改善方案的制定主要参考水质信息和相应水质目标。随着信息化技术手段的不断发展,近年来建设了一大批水利信息化系统工程,但是受管理方式、投资力度、技术水平等原因的限制,目前大多数城市河网水环境信息系统存在重复建设、各自为战的现象^[44-45]。河网水环境决策主要聚焦管辖片区内局部河道水质监测信息,水环境信息由多个职能部门管辖,而各部门之间可能缺乏有效的统筹协调机制,数据不能实现有效共享,难以对水体信息进行全局分析处理,缺乏对整个河网连通结构特征及污染物扩散传输的考虑,难以把控全局水质演

变情况,做出合理决策。最终呈现出水环境治理决策局部化、片面化的现象。

3 城市河网连通循环净化系统的构建目标和基本要素

城市河网连通活水循环净化系统的构建以实现最大限度恢复水体自净能力为目标,探究河道水系连通循环与水体净化的动态变化规律;同时,根据水动力特征与水质净化效果的关系提出综合调控方案,以达到提高补水循环利用率、改善河网水质的效果。城市河网连通循环净化系统的构建包括以下4个基本要素:

(1)实现河网结构性与功能性连通,在城市河网发挥基本功能的基础上,基于城市河网闸泵调控特性,变单向排水为双向输水;建立动态溢流堰等水利设施,实现河网连通,进行水资源科学调度,提高水体流速。

(2)改善河网水体流动性,结合河网特征利用闸泵实现水循环调控,加速河道水体流动,提高水体复氧能力,改善滞缓河道水体流动置换效率。

(3)强调城市河网工程治理与生态净化手段,针对不同类型河道提出相应的改善策略,促进城市河网由工程化向近自然化转变,最终达到修复水环境、改善水质的效果,促进城市与水系融合。

(4)以管理决策为保障,强调智慧水务在城市河网治理中的重要地位,利用低空遥感影像、无人机巡查、河道水质监测设备等多种手段实现对河网水质的实时监控,通过整合河网水利工程来实现水量的精细控制,开发兼具多元数据采集、数据库管理、水量精准调控与水质实时监测多项功能的智慧水务管理平台,最终实现“河网连通-活水循环-体内净化-动态决策”。

构建需要解决3个关键问题:

(1)需系统地考虑河网特性、河网连通的演变趋势、水质现状和水质目标,综合把握城市河网水环境的特征;

(2)需正确把握时空特性下的河网格局与功能变化关系,满足城市河网水体的自然净化、社会服务与景观娱乐功能;

(3)需明确水动力条件、净化措施对水质净化效果的影响以及三者之间的互馈机制。提出服务城市河网全局水环境改善的分区分类的循环净化预案,提高河网水体自净能力。河网水循环净化系统如图1所示。

4 城市河网连通循环净化系统构建的技术框架与关键问题

4.1 城市河网连通活水循环净化系统总体技术框架

城市河网连通循环净化系统通过连通整治疏通河网结构,最大限度地利用自然地理条件挖掘自调节能力,辅助科学调度以及整装成套净化技术,为河网水环境改善制定净化预案。同时,综合运用在线监测、软件模拟、大数据和云计算等现代信息工具,构建综合调控决策系统。城市河网连通活水循环净

化系统总体技术框架如图 2 所示。

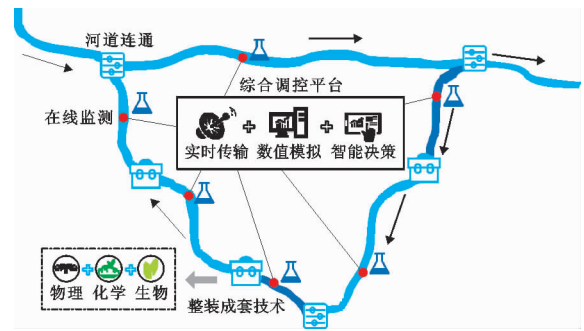


图 1 河网水循环净化系统示意图

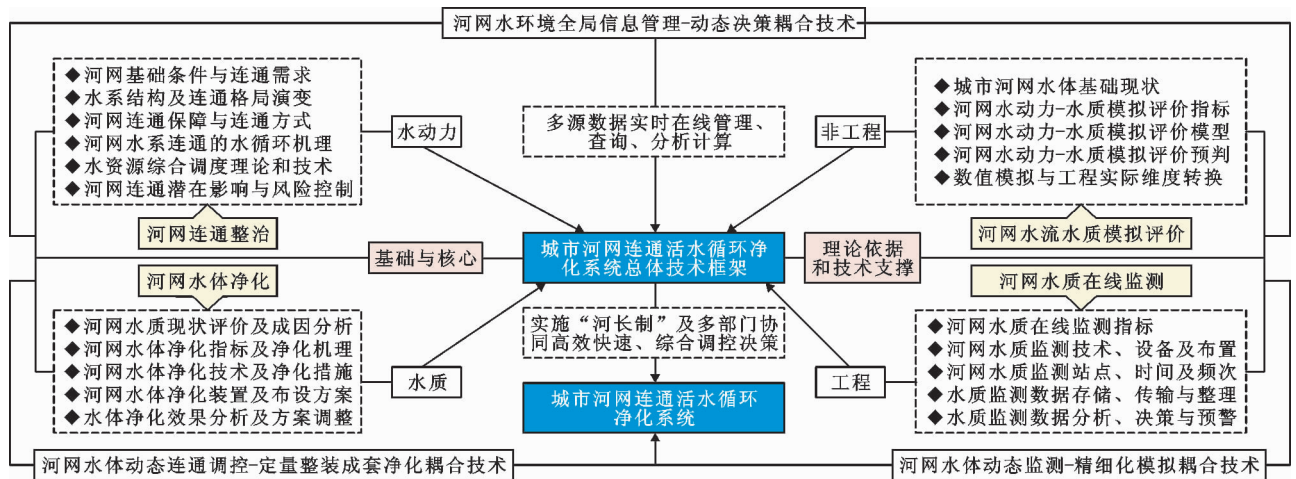


图 2 城市河网连通活水循环净化系统总体技术框架

城市河网连通循环净化系统总体技术框架包括:以调节水动力,改善水质为主线,进行城市河网连通整治和河网水体净化。河网连通整治是在满足区域基础条件与连通需求的情况下,正确识别河网的水系结构及其连通格局的演变,明确河网水体连通的保障与连通方式,遵循城市河网水系连通的水循环机理,综合水资源综合调度理论和技术,明确河网连通潜在的影响与风险,探寻适宜的河网连通方式。同时,对河网水系连通的潜在影响与风险提出解决方案。河网水体净化是在河网水质现状的基础上,按照净化机理,筛选合适的技术及措施,为河网治理提供合适的净化方案。

将非工程措施与工程措施结合,计算机模拟辅以实时动态监测。利用河网水动力-水质耦合模拟,将河网连通整治技术及河网水体净化方案嵌入水动力-水质模拟模型,对现有的河网水质进行模拟评价,对未来的河网水质进行预判。同时,结合河网水质在线监测技术,将模拟结果与实际监测结果进行对比分析,建立互馈机制,并及时进行方案的调整,为河网水环境修复提供精准预案。

4.2 新时期城市河网连通活水循环净化系统构建的关键技术

4.2.1 城市河网水体动态连通调控-定量整装成套净化耦合技术

(1)河网水体动态连通调控技术:打破传统的固有河网连通方式,综合考虑水利工程、河网特征、连通特性、水域规模、补水来源和补水水量等因素,改善水体连通情况,减少由于水资源不合理分配而导致的影响^[46],重新识别城市河网中潜在的循环通道,建立闸泵群调控下的循环连通快速识别机制,增加区域调蓄以及水生态环境承载能力^[47]。根据不同循环通道下的水动力学参数计算结果,耦合净化技术适用的水动力阈值,合理选择净化装置的类型、规模和布局。根据净化工程实施后污染物浓度的衰减规律,及时调整河网连通循环调度方案,形成动态连通调控技术^[48]。

现状水环境治理未充分考虑补水的循环利用,河网补水主要起到促进水体稀释和提高置换速度的作用,部分水资源缺乏的城市难以利用补水的方式长期维持城市河网水质,河网可能存在引调水量大、

补水利用率低的状态。若能考虑河网结构与闸泵性能,依靠闸泵调控的方式适当调整河网的水力联系,使补水循环再利用,依此可达到降低补水水量,带动水体流动,提高水体复氧能力的效果。以天津市中心城区河网为例,该河网每年消耗大量的环境用水

以改善其水质状况^[49-50],图3给出了天津中心城区河网原始流向及改变闸泵调控下可能的循环流向。如图3(b)所示,若能考虑河网水系连通,形成循环回路,可起到提高补水循环利用率和节约环境补水的作用。

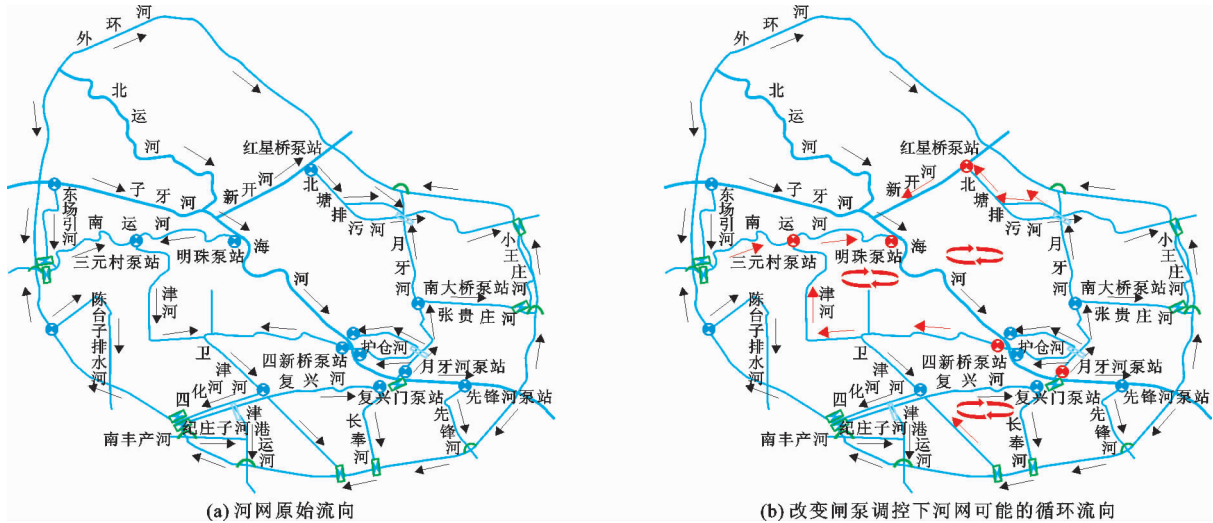


图3 天津中心城区河网流向示意图

(2)河网水体定量整装成套净化技术:集成改善不同水质指标分时分类分区的净化技术库,研发循环水动力条件下适用于类似水动力学范围阈值的整装成套净化技术;开发适用于河网循环水流条件下的整装成套净化装置模块。研究开展适用阈值内河网水质不同污染程度下的整装成套净化技术净化效果实验,定量提出成套净化装置与水流运动之间的相互影响关系以及模块化净化对污染物的定量综合净化效果等。并针对性地制定可行的布局方案,以保证水质改善效果。

4.2.2 城市河网动态监测-精细化模拟耦合技术

开展城市河网动态监测-精细化模拟耦合技术的研究,能够对河网水体流动特征、水量给排、污染物沉降及传输等变化进行全方位把控,为制定合理的河网水环境改善方案提供依据及参考^[51-52]。此项研究需要重点突破以下两个方面:

(1)制定服务于城市河网水体的动态监测机制,形成监测内容涵盖河网基础信息、河网水动力信息、河网水质信息、河网沿线工程信息、城市气象信息在内的河网监测体系,实现对河网信息的精确把控和快速识别。

(2)建立城市河网水环境精细模拟系统,开发不同河网连通情况下的水动力-水质-水生态模型,基于数据库和河网实时信息,形成不同河网条件

下的水量给排和闸泵调控方案,应用并记录不同活水循环条件下净化组合技术、规模、布局的整装成套净化装置的设计方案和水动力-水质-水生态的影响规律。

4.2.3 城市河网水环境全局信息管理与全面互联

随着大数据时代的推进和国家“一张图”工作的深入,对水利信息数字化程度的要求日益提高,水利信息的存储、分析和综合管理对制定城市河网水环境改善综合调控方案的作用愈加显著^[53]。发展城市河网水环境全局信息管理-动态决策耦合技术和实施信息全面互联有助于实现河网信息的整合和共享,形成新的数据使用格局。此项研究需主要突破以下两个方面:

(1)开发具有强兼容性的多源数据实时在线储存、管理、查询、分析计算的信息管理平台,建立基于河网尺度的环境管理机制以及多功能协同联动机制,结合现有信息处理技术,实现更准确的河网水情预警预报,提出具有针对性的解决方案。

(2)全面加强信息互联,开发河网活水循环系统下的统一的水利信息资源交换体系。一是提高城市管理部门间的信息交换速率,实现多部门信息共享,以便对水体信息进行全局分析处理;二是丰富移动终端的应用场景,结合“河长制”等政策,为工作人员提供更全面、准确的水情信息和应急管理方案,

实现全局高效的水环境管理。

5 结论

(1)在总结城市河网水质修复传统模式及其不足的基础上,阐述了新形势下城市河网水环境治理的理念与发展模式,即综合考虑河网特征、水质现状和水质目标的城市河网连通活水循环净化系统。

(2)提出了新形势下城市河网连通活水循环净化系统的内涵与总体需求,提出了城市河网连通活水循环净化系统的框架,阐述了城市河网水体动态连通调控—定量整装成套净化耦合技术、河网水体动态监测—精细化模拟耦合技术、河网水环境全局信息管理—动态决策耦合技术等关键技术问题。

(3)由于本文主要针对城市已建成区的平原河网,且未考虑城市河网与城市地下管网的结合程度、城中村、城乡结合部等连接处河网,且只对河网进行了系统构建及其关键技术讨论分析,未深入探索河网水环境的评价指标体系等。在未来城市河网水环境修复相关研究中应加以分析,使其在实际工程建设实践中得到进一步检验与完善。

参考文献:

- [1] 张嘉辉,叶长青,朱丽蓉,等.考虑水功能需求的海口市水系连通指标阈值研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(2):122-129.
- [2] 窦明,靳梦,牛晓太,等.基于遥感数据的城市水系形态演变特征分析[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(1):16-21.
- [3] 吴雷,许有鹏,徐羽,等.平原水网地区快速城市化对河流水系的影响[J].地理学报,2018,73(1):104-114.
- [4] 林芷欣,许有鹏,代晓颖,等.城市化进程对长江下游平原河网水系格局演变的影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(11):2612-2620.
- [5] 莫祖澜.基于水体自净能力的河网闸泵调控优化模型研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [6] 江燕,薛丽芳,于红学,等.近30年来南四湖流域城市化进程中的水系变化分析[J].湖泊科学,2017,29(1):135-142.
- [7] 练继建,杨阳,马超.面向水环境改善的城市河网综合调控研究进展与前沿[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(8):781-787.
- [8] 袁海英.高污染城市河流初期雨水一体化截污系统研究[J].人民珠江,2017,38(1):73-78.
- [9] 魏健,潘兴瑶,孔刚,等.基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):64-69+76.
- [10] 陈诗吉,郑祥民,周立旻,等.城市黑臭河网外源调水技术研究进展[J].环境工程,2014,32(2):1-5.
- [11] 谢季遥,陈星,许钦,等.城市湖泊生态修复的水质响应研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):53-59.
- [12] 曾凡棠,许振成,陈铄成.潮汐河网水环境实时数学模型研究与应用[J].重庆环境科学,1989(6):36-43.
- [13] 杜文娟,陈黎明,陈炼钢,等.水动力水质模型在温黄平原河网入河污染负荷削减中的应用[J].水利水电技术,2018,49(6):109-117.
- [14] 陈振涛,滑磊,金倩楠.引水改善城市河网水质效果评估研究[J].长江科学院院报,2015,32(7):45-51.
- [15] 许益新,王文才,曾伟峰,等.调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J].水资源保护,2018,34(1):70-75+82.
- [16] 马小雪,王腊春.引江调水对平原河网区水环境的影响[J].浙江农业学报,2015,27(6):1048-1055.
- [17] 李晓,唐洪武,王玲玲,等.平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):393-399.
- [18] 马超,唐志波,徐奎,等.平原地区城市河网水环境改善的补水调度策略研究——以天津市中心城区河网为例[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):81-87.
- [19] 蔡梅,李敏,马农乐.基于有序流动的平原河网区水环境联合调度探讨[J].人民珠江,2018,39(2):60-64.
- [20] 陈建标,钱小娟,朱友银,等.南通市引江调水对河网水环境改善效果的模拟[J].水资源保护,2014,30(1):38-42+94.
- [21] 尚钊仪,张亚洲,戴晶晶,等.昆山主城及周边区域活水畅流改善水环境方案研究[J].水资源保护,2017,33(6):125-132.
- [22] 崔广柏,陈星,向龙,等.平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J].水利学报,2017,48(12):1429-1437.
- [23] 逢勇,王瑶瑶,胡绮玉.浙江温黄平原典型河流水质改善方案研究[J].水资源保护,2016,32(2):100-105.
- [24] 赵轩,薛祥山,徐速,等.常州市平原环状河网水环境改善方案情景模拟[J].环境工程学报,2015,9(10):4637-4642.
- [25] 刘贵平,唐洪武,雷燕,等.上海世界博览会园区河网水环境调控[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):204-210.
- [26] 陈众,田丰,邓国志,等.苏南河网水体污染控制工程及其效果分析[J].水土保持通报,2013,33(4):77-80.
- [27] 张月明.城市化对唐山市水环境的影响研究[J].水资源开发与管理,2018,(1):50-53.
- [28] FINDLAY S J, TAYLOR M P. Why rehabilitate urban river systems? [J]. Area, 2006, 38(3): 312-325.
- [29] 林芷欣,许有鹏,代晓颖,等.城市化对平原河网水系结构及功能的影响——以苏州市为例[J].湖泊科学,

- 2018,30(6):1722-1731.
- [30] 李宗礼,刘晓洁,田英,等.南方河网地区河湖水系连通的实践与思考[J].资源科学,2011,33(12):2221-2225.
- [31] 成水平,冯玉琴,吴娟,等.城市河流水环境综合治理技术集成与示范[J].给水排水,2013,49(8):16-19.
- [32] 张保君,曹蓉,叶春,等.微纳米曝气对植物浮床净化水质效果影响及数学模型分析[J].水处理技术,2012,38(7):53-57+62.
- [33] NING Daliang, HUANG Yong, PAN Ruisong, et al. Effect of eco-remediation using planted floating bed system on nutrients and heavy metals in urban river water and sediment: A field study in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 485-486: 596-603.
- [34] LI Lu, VISVANATHAN C. Membrane technology for surface water treatment: Advancement from microfiltration to membrane bioreactor[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2017, 16(4): 737-760.
- [35] 周高峰,刘义青,付永胜,等.微曝气强化生态浮床对污水中磷的净化效果[J].环境科学与技术,2018,41(10):69-74.
- [36] SHI Hongle, ZHOU Gaofeng, LIU Yiqing, et al. Chemical oxygen demand abatement in sewage using micro-aeration enhanced ecological floating bed[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 113(1): 012029.
- [37] RAO Lei, WANG Peifang, LEI Yang, et al. Coupling of the flow field and the purification efficiency in root system region of ecological floating bed under different hydrodynamic conditions[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(6): 1049-1057.
- [38] RAO Lei, QIAN Jin, AO Yanhui. Influence of artificial ecological floating beds on river hydraulic characteristics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(3): 474-481.
- [39] 严以新,蒋小欣,阮晓红,等.平原河网区城市水污染特征及控制对策研究[J].水资源保护,2008,24(5):1-3+29.
- [40] 聂天一,陈东田,邢治英,等.国外城市河流生态修复案例研究[J].水利规划与设计,2019,(9):13-15+108.
- [41] 敖子强,张杰,彭桂群,等.生态浮床处理农村生活污水的植物功能及筛选[J].北方园艺,2017,(11):195-198.
- [42] 王玲杰,孙世群,田丰.河流水质模拟问题的探讨[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(3):260-265.
- [43] 刘士林,马娜,赵思雨.标准化视角下智慧城市建设面临的问题及发展路径[J].上海交通大学学报,2015,49(8):1231-1236.
- [44] 段远斌.塔里木河水资源管理信息化整合技术实现与分析[J].中国水利,2015,(15):46-49.
- [45] 谢忱,丁瑞,杨帆,等.平原城市感潮河网水环境改善方案研究——以上海市淀北片为例[J].水利规划与设计,2020,(12):9-16.
- [46] 窦明,石亚欣,于璐,等.基于图论的城市河网水系连通方案优选——以清漯河许昌段为例[J].水利学报,2020,51(6):664-674.
- [47] 尹音,赵勇,尚毅梓,等.天津市主城区河道水系景观环境需水研究[J].水电能源科学,2015,33(8):25-28.
- [48] 骆东玲,陆培东,喻国华.东部平原城市水污染现状及河网结构对水污染影响[J].环境工程,2011,29(S1):59-62.
- [49] 袁雯,杨凯,吴建平.城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J].地理科学,2007,27(3):401-407.
- [50] 孟慧芳,许有鹏,徐光来,等.平原河网区河流连通性评价研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):626-631.
- [51] 陈炼钢,施勇,钱新,等.闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型——II.应用[J].水科学进展,2014,25(6):856-863.
- [52] 贾海峰,杨聪,张玉虎,等.城镇河网水环境模拟及水质改善情景方案[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(5):665-672+728.
- [53] 钟名军,李兰,张俐,等.数字水环境管理系统和数字水质预警预报系统集成[J].中国农村水利水电,2005(12):20-22.