



DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.001

述评与讨论

“双碳”战略下构建面向未来气候适应型城镇排水系统

刘智晓¹, 刘龙志^{2,3}, 吴凡松¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 3. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘要: 城市水安全是城市安全的基石和生命健康维系的基础,排水系统是链接人类生命健康与水环境、清洁供水和生活排泄物最终去向的纽带。在梳理排水系统发展历史基础上,分析了古代(基于水利用)、近代(卫生驱动型)、现代(水质与水量驱动型)三个不同历史时期排水系统的特点,总结了污水生物处理阶段性总体技术特征;针对全球气候变暖导致的极端降雨日趋增多、“双碳”战略等外部环境的约束,分析了传统城镇排水系统面临的挑战,在此基础上提出了构建面向未来气候适应型可持续城市排水系统,以实现现代排水系统从水质与水量型向气候适应型的转变。同时分析了流域视角下气候适应型排水系统的“Safe & SuRe”准则,介绍了以气候变化模型模拟及预测为基础的“降尺度”总体技术路线及理念,以及实现流域不同尺度上的技术及管控协同、资源源头转向能源化和资源化、智慧流域视角下实时控制系统等应对策略及路径。

关键词: 极端降雨事件; 城镇排水系统; 韧性; 低碳; 智慧流域; 实时控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0001-10

Construction of Future Climate Adaptable Urban Drainage System under the “Dual Carbon” Strategy

LIU Zhi-xiao¹, LIU Long-zhi^{2,3}, WU Fan-song¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: Urban water security serves as the foundation of urban security and the basis of life and health maintenance. The drainage system acts as the crucial link between human life and health and water environment, clean water supply and the management of domestic waste. By examining the development history of drainage system, this study analyzed the general characteristics of the drainage system in three historical periods: ancient drainage system based on water utilization, modern drainage system with sanitary driving type, modern drainage system with water quality and quantity driving type. And then, the overall technical characteristics of sewage biological treatment stages were summarized. With the increasing extreme rainfall frequency due to global warming and the external environmental constraints such as the “dual carbon” strategy, the challenges of the traditional urban drainage system were analyzed. In response, it is suggested to construct a sustainable urban drainage system oriented to future climate adaptation, and to achieve the functional transformation for modern drainage system from water quality and quantity oriented to climate adaptive systems. The “Safe & SuRe” criteria for constructing climate adaptable drainage system from a watershed perspective was analyzed. And the

“downscaling” overall technical route and concept based on climate-driven model simulation and prediction were introduced. Additionally, pathways for achieving basin coordination, converting resource source to energy and resource utilization, and implementing real-time control system from the perspective of smart basin were also proposed.

Key words: extreme rainfall events; urban drainage system; resilience; low-carbon; smart watershed; real-time control

城市水系统作为水的自然循环和社会循环在城市尺度耦合的重要载体,对其进行优化重构是统筹水资源、水环境、水生态治理的核心抓手^[1]。近百年来,随着工业化和城市化进程的加速,温室气体排放导致的全球变暖趋势日趋明显,并带来显著的气候变化,尤其是进入21世纪以来,极端降雨事件频发,给城市管理及排水系统安全带来严峻挑战和严重威胁。在“双碳”战略下,现阶段和未来相当长的时期,须从全生命周期角度统筹考虑极端降雨情境胁迫下城镇排水系统整体运行的可靠性、韧性与可持续性。因此,在规划与设计理念方面,应采用气候适应型排水系统,实现排水系统的结构性优化布局;在运行阶段,采取实时调度及智慧运行管控,有效调控及处理处置雨季峰值流量,同时实现全过程绿色低碳,减少温室气体排放量,以确定性的工程技术措施来适应和一定程度上“对冲”未来的不确定性。与此同时,在城镇快速发展过程中流域内水面率的缩减、河湖连通性的丧失以及城镇污染物的大量集中排放,对水环境、水生态造成了严重的负面影响,城市水系统作为流域水循环的一个分支,近些年来研究者开始对流域管理以及传统城市水系统规划、设计与管理策略的系统性进行反思^[2]。

为此,梳理不同历史时期排水系统的发展历程及特点,从不同尺度预测和评估当今全球气候环境、流域的变化特征,进而识别、改进和修正现状排水系统,采取主动适应型策略来应对未来的不确定性,将具有深远的现实意义。

1 城镇排水系统发展阶段性技术特征

1.1 古代排水系统:始于对水利用的初步认知

取用健康、清洁的饮用水是人类卫生和健康的基石,根据考古学的发现,在公元前4000年—前2500年,位于今天伊拉克境内美索不达米亚地区的一些城市街道上就已经有了很多排水沟。在公元前3000年左右希腊克里特岛的米诺斯文明遗址和

印度河流域的哈拉帕文明遗址中,考古学家发现了完整的排水系统。古代希腊第一个复杂的排水系统是由克里特岛的米诺斯人在公元前2500年—前1650年建造的,如浴室和冲洗厕所从米诺斯时代就已开始使用。以目前的视角看,当时的雨水和污水系统已经具有了当今合流制系统的技术特征。在苏格兰的一些村庄,考古学家也发现了与米诺斯文明同时期完整的排水系统^[3]。

在我国,已发现的早期排水系统可以上溯到9000年前。在河南南水北调干渠新郑郟遗址中发现了9000年前的排水系统,河南平粮台遗址也发现了距今4000年左右的陶质排水管道,这些排水管的管径为20~30 cm,主要用于排除雨水而非污水,这显然与世界上其他新石器时代的排水系统不同。2000多年前,《管子·度地》首先提出明渠水流和有压管流运动规律及水跃现象。该文章根据当时渠道引水的经验提出明渠的坡降理念,可满足水流流动^[4]。

总结古代排水系统得到如下启示:①古人已经掌握对自然界洁净水的取用及污水的有组织、有序排放;②古人具备了竖向规划意识,通过利用自然地形实现雨水的快速排放。

1.2 近代排水系统:卫生学驱动

人类对排水系统的深刻认知其实是始于19世纪全球肆虐的霍乱,伦敦先后发生4次霍乱疫情并造成约4万人的死亡,1858年发生泰晤士河“大恶臭”(Great Stink或Big Stink)事件。为解决恶臭和卫生学问题,伦敦市政府决定建设污水处理系统,由约瑟夫·巴扎尔盖特(Joseph Bazalgette)爵士指导并设计了一个分布广泛的下水道系统,通过截流干管将已有的市政排水系统相连接,并将排放口置于泰晤士河伦敦段南北岸的下游。1875年,伦敦主下水道全部竣工,霍乱基本上消失。160年后的今天,伦敦依然在使用维多利亚时代的下水道系统^[5]。因

此,人类对下水道系统带来的卫生学问题及生命健康的认知催生了现代排水系统的初步形成,排出人类的代谢产物一直以来都是排水系统的重要功能。

1.3 现代排水系统:水质与水量驱动

随着人类社会的快速发展、人口的快速聚集及城镇化影响,污染物输出总量及强度都是早期人类社会聚集体无法比拟的,这显然带来了愈发严重和持久的水环境污染问题,如水体黑臭、富营养化等。各种污水处理工艺技术得到开发和快速推广应用,以追求对排放污水中有机物和营养盐(氮和磷)的高效或极限去除。雨水收集与排放在一些发达地区得到了快速发展,一些新的雨洪管理理念、技术手段及工程措施被提出并得到较为快速的开发与应用。20世纪40年代—80年代,美国先后颁布和修订了《联邦水污染控制法案》《清洁水法案》《水质法案》,提出了最佳雨洪管理措施(BMPs);20世纪90年代,美国、英国和澳大利亚分别提出低影响开发理念(LID)、可持续水系统理念(SUDS)、水敏感城市设计(WSUD)等;新西兰等国家在总结上述国家雨洪管理经验的基础上,于21世纪初提出了低影响城市设计和开发(LIUD)等^[6]。

分析当今排水系统的特点,可将其归结为水环境驱动型,本质上是水质、水量的“双驱动”模式。这种模式往往追求的是单元最优而不是系统最优,尤其是对于污水系统,因此现代城市排水系统面临的主要问题是生物多样性保护、韧性设计及全过程碳排放等环节的考虑或重视不够。近半个世纪以来,世界各国建设了大量污水处理厂,期望借此来改善接纳水体水环境与水生态,但是最近一些大尺度上的跟踪性研究发现,基于水质改善驱动的现代排水系统并未获得符合理想预期的生态效应,就是说这些大量投资建设的污水处理设施似乎并没有起到预期的效果,Buttner等^[7]对欧洲全域26 500座污水厂进行了调研,发现只有24%的污水厂其尾水水质满足生态阈值,42%的河流保了良好的生态状态,研究建议改进传统污水处理系统规划、设计及管理策略。在《欧盟水资源框架指令》约束下,欧洲大部分国家自20世纪80年代起逐步采取了包括强化污水处理等环保措施,但是最近发表在*Nature*的论文研究结果却与初衷相悖:Haase等^[2]于1968年—2020年采集了欧洲近27 000个河流样本,对淡

水生物多样性进行了研究,发现包括无脊椎动物数量、无脊椎物种多样性等关键指标的增长速率在21世纪尤其是2010年后呈现了下滑迹象,其中在某些特定年份甚至还出现了负增长,这表明欧洲近年来在改善淡水生态方面所采取的一系列生态环保措施的边际效益正在减少。

2 污水处理技术发展阶段性技术特征

污染物的收集与处理永远是不同历史时期排水系统的基本功能,两者既“密不可分”又“矛盾不断”。回顾污水处理技术发展历程,与收集系统的发展相比,污水处理工艺技术发展阶段性技术特征更明显、构型更加丰富、工艺更多元化,技术迭代也更快。排水系统在不同历史时期的发展过程,也是卫生系统及污水管网技术与处理工艺的发展史,同步呈现了科学家们对污水处理过程新现象发掘和背后技术规律的不断揭示与探索史。

回顾污水处理工艺技术的百余年发展历史,污水处理技术大致可划分为四个阶段,即活性污泥工艺诞生之前采用土壤过滤或滴滤池工艺阶段、活性污泥发展初期以耗氧有机物为去除目标的阶段、延续至今的污水生物脱氮除磷技术快速发展阶段,以及近10年来以经济、高效与可持续为基本特征的革新性污水生化处理工艺持续开发与应用阶段^[8],不同阶段标志性处理工艺的发明或提出及国内外污水处理一些重要里程碑式事件按时间轴展示于图1。

总结污水处理基本发展历程,不难看出,污水处理技术发展的本质驱动力是源于人类对当时环境卫生条件及水环境改善的方向性需求,任何一种污水处理技术的改进和突破无一不是对污水处理过程中偶然发现的特殊现象背后技术原理的不断揭示和技术持续迭代过程,不同构型工艺的开发与迭代则是契合当时的水质改善需求及具体水质目标,尤其是近50年来,污水处理工艺主要从最初的BOD去除向营养盐强化和深度去除方向发展,即:有机污染物降解→BNR→EBNR→LOT标准(N、P的极限去除)→新污染物,其间反应器的动力学发展、分子卫生学对微生物种群结构的解析技术进一步促进了不同类型生化工艺的快速发展^[9],技术发展过程伴随工艺集约、绿色低碳等维度上的探索 and 追求。

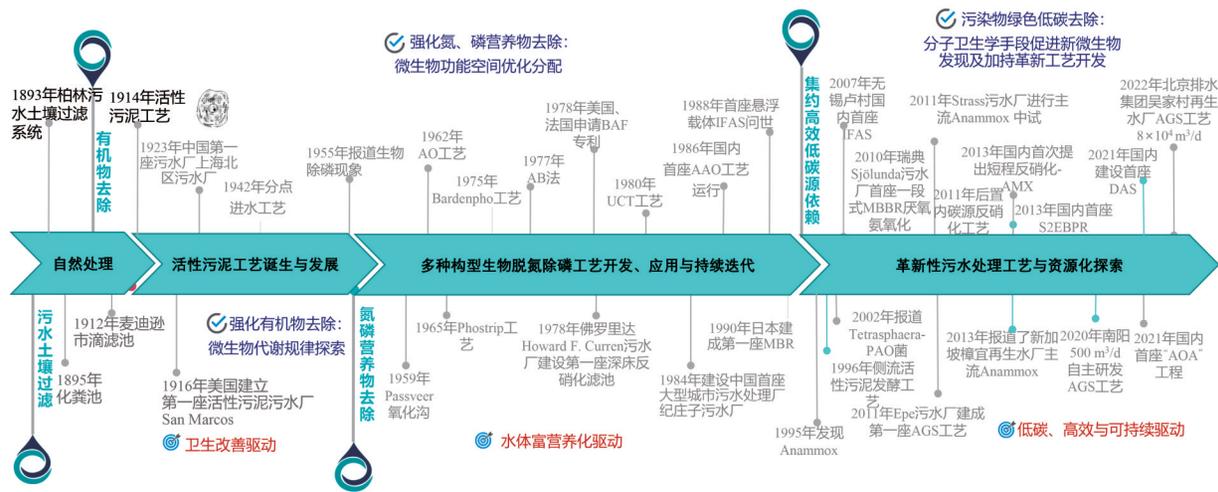


图 1 污水生物处理技术发展历程

Fig.1 Development history of biochemical wastewater treatment technology

3 全球升温胁迫下排水系统面临的挑战

3.1 极端降雨事件增多对排水系统安全构成威胁

全球变暖将会加剧水的自然循环过程,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)指出全球平均表面气温上升在未来 20 年内将达到或超过 1.5 °C,全球变暖趋势显著,这意味着全球极端干旱或者极端降雨事件都会相应增加,海平面也会上升;在未来人类社会温室气体排放持续增加情景(SSP585 情景)下,到 21 世纪末,全球范围内百年一遇的日极端降雨强度可能增加 13.5%~38.3%^[10]。研究^[11]显示,当前百年一遇的洪水位到 21 世纪中叶(2030 年—2050 年)将变为 9 年洪水位,到 21 世纪后期(2080 年—2100 年)将变为 1 年洪水位。

基于 IPCC 和一些权威机构的研究结论,过去对极端降水事件的认识需要更新和调整,百年一遇洪水将成为新常态,这显然对当下及未来城镇水系统及城市安全构成了严重威胁,主要表现在:①极端降雨事件频发及降雨强度增加造成的流域性洪涝灾害会愈加频发,对社会和生态环境的破坏力持续增强;②由于既有排水系统按照多年前的设计标准及降雨条件设计,能力上也无法应对“超标”降雨;洪涝叠加,“因洪致涝”和“因涝致洪”两种情况都可能成为新常态,不确定性的极端降雨事件将成为城市排水系统安全的最大威胁。为此,亟需大幅提升传统排水系统能力并采取综合、适应型对策,甚至整个城市水系统的规划、工程技术基础,如暴雨强

度公式、设计重现期、设计降雨强度、设计洪水位等边界条件都需要“重置”和加快更新、修订频率。

3.2 城市代谢产物收集与处理的不可持续性

以冲水马桶、城市下水道和末端污水处理厂组成的集中式排水系统经历一个半世纪的沿袭和发展,已成为当今世界各国应对城市居民代谢产物的主导和主流模式。从食物链的物质流动轨迹看,冲水马桶是自然界营养物质迁移转化链条“土壤→食物→人体→马桶→排水系统→水环境”中转移释放的关键一环,是营养元素实现从固相向水相跨越的关键节点。在全球气温升高、“双碳”战略及水体富营养化大背景下,这种传统的污染物收集处理路径凸显了环境负效应,主要原因:①该物质流动链条加速了最初源于土壤的各类元素及营养物质向自然水体及海洋的单向流动及释放,物质回归农田的循环路径被人为截断;②营养物质在化粪池、管网等收集环节通过厌氧或缺氧过程产生并排放了大量温室气体,同时由于收集系统的欠缺及管网过程泄漏加剧了污染物质向水体的释放过程,并导致水体富营养化等一系列水质和水环境问题;③为了改善环境不得不通过“以能消能”方式在末端通过污水处理对这些营养物进行氧化和降解及处置,其代价是大量能源和药剂的消耗。

总体上看,污染物“源头收集、排放→过程收集运输→末端处理→排放→接纳水体”长链条造成了高能耗、高物耗、高碳排,环境代价与社会成本高昂,不可持续的弊端日益凸显,且目前总体趋势还在加剧^[12]。研究^[13]显示,2021 年,我国排水环节的

碳排放平均强度比2009年上升了78.6%,这期间恰恰是我国各地污水处理厂大面积实施高排放标准并进行提标改造的鼎盛时期,高排放标准的实施与高碳排呈现了正相关。因此,从城市代谢产物价值资源及元素绿色循环、全链条碳排放控制这两个层面上来说,传统排水系统亟需系统性的改造甚至重构。

3.3 排水系统结构性、匹配性及峰值流量管理

经过30年的快速城镇化进程,我国城镇排水系统规划和建设也得到了快速发展,尤其是近20年以来,在城镇污水厂污染物排放标准的升级和各地高排放标准(地表水“准IV”“准III”类)陆续出台的引导下,各地经过多期、多轮污水厂的提标改造,城镇污水处理能力已基本满足当地生活及生产过程污染物排放负荷的承接、处理及相应的排放标准需求,继续提高污水处理厂排放标准对水环境改善的边际收益已明显降低。同时,大量的社会资源沉淀于末端污水厂的建设及提标改造,不可避免地造成了排水管网的历史欠账,其系统性、结构性问题成为影响我国城镇水环境质量改善的主要制约因素。

前述分析表明,过往污水处理工艺技术的发展主要是基于污染物的高效去除,无论是工艺设计还是运行环节,可以说是基于水量稳定状态下的一种稳态运行模式。但是面对未来暴雨及极端性降雨天气显著增多的情况,只针对实现污染物高效去除这单一维度,显然不能适应未来新场景及新挑战。雨季尤其是极端降雨事件对污水处理单元的影响体现在进水水质特性的显著变化及峰值流量对活性污泥生化工艺的冲击,即水质与水量两个维度,其次是厂区设施设备的安全性。在规划设计阶段,传统污水处理工艺难以灵活应对气候变化尤其在大雨或暴雨情境下,处理单元在峰值流量承接、调控和处理方面缺乏系统性、整体性考虑。污水处理厂作为排水系统末端“兜底”环节,传统活性污泥工艺受二沉池MLSS固体通量的影响,雨季提升水力负荷容易导致二沉池污泥溢出的问题,因此传统活性污泥工艺设计方法无法应对峰值流量的处理,这会导致污水厂处理能力与排水管网收集能力不匹配,尤其是对于一些采用较大截流倍数的合流制系统,雨季污水厂可承接的水力负荷无法与管网截流能力相匹配,这是雨季排水管网CSO问题、城市水体和接纳水体黑臭以及雨后快速“返臭”的关键原

因之一。欧美发达国家往往在政策和标准制定上鼓励污水厂雨季多处理峰值流量在最大程度发挥二级生化处理能力的同时,多余流量采用旁路处理(见图2)。因此,处理单元的韧性设计尤其是整个排水系统的峰值流量管控,是未来应对气候变化条件下应该重点要考虑的问题。

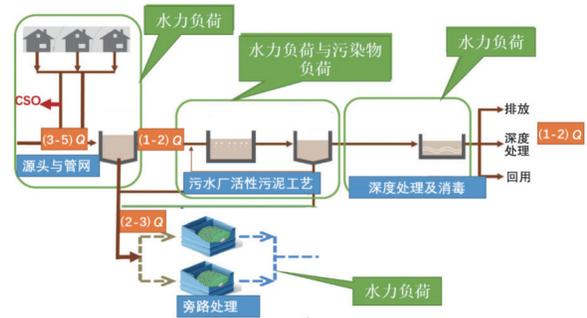


图2 城镇污水系统流量匹配性原理及峰值流量限制因素
Fig.2 Urban sewage system flow matching and peak flow limiting factors

4 构建气候适应型城镇排水系统的新思考

4.1 排水系统“Safe & SuRe”准则

从现阶段和未来相当长的历时周期来看,城镇排水系统首要功能是确保汛期城镇水系统尤其是排水系统的安全与可靠,这是排水系统实现其他功能目标的基础和前提,即排水系统的基本特征要满足“安全&可靠与可持续”(Safe & SuRe)准则^[14](见图3);其次,实现从过去对水质、水量为主要目标的双要素约束向全要素、全流程提升排水系统安全性、韧性与可持续性方向的转变,从多个维度系统构建气候适应型面向未来的可持续城镇排水系统,实现从传统被动承受与被动承接向主动调整与主动应对策略的系统性转变(见图4)。



图3 城镇排水系统安全、可靠、韧性与可持续基本规则
Fig.3 Basic rules for safety, reliability, resilience and sustainability of urban drainage systems

同时,为满足全流程绿色低碳、低能耗、低物

耗,并实现过程资源与能源的提取与资源化,从目前“水”的单一目标最优化解阶实现“水-能-碳”关系(Water-Energy-Carbon-Nexus)、最终实现向“水-能-碳-资源”关系(Water-Energy-Carbon-Resource Nexus)四维高效耦合的进阶。

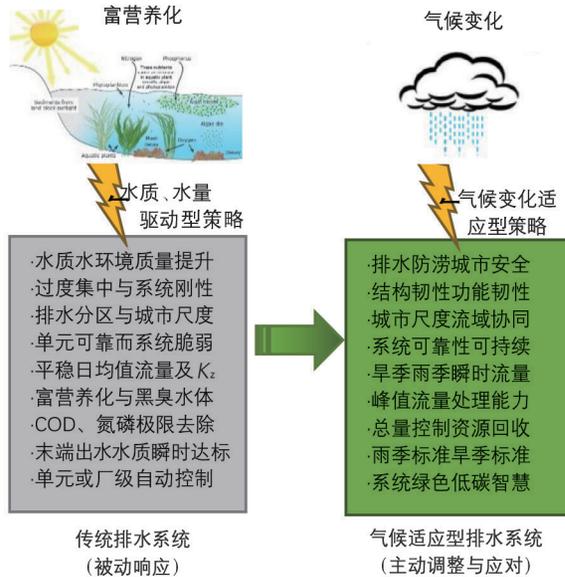


图 4 传统排水系统与气候适应型排水系统的功能定位和基本特征

Fig.4 Functions and basic characteristics of traditional drainage system and climate adaptive drainage system

4.2 “降尺度”理念与方法的实施

基于前述分析,未来不确定性及极端降雨事件(强度和历时)频发正在成为新常态,气候变化因素已经成为威胁城镇水系统安全的首要因素。近些年来,极端降雨频发给一些城镇造成了严重洪涝灾害,原因主要在于:城市防洪排涝工程体系不健全,且城市治涝与城市所在区域防洪体系统筹协同不足,过度依赖管网排放,在源头减排、过程蓄存、超标应急方面能力薄弱,管网建设标准普遍偏低;城市发展进程中对自然生态系统保护不足,大量河湖、坑塘、湿地等蓝绿空间被侵占,水面率大幅缩减,城市下垫面过度硬化,造成城市自然蓄排能力严重下降。以上诸多因素本质上是传统排水系统基于稳态情景或静态设定条件规划与设计而产生的,缺乏“气候变化→流域→城市→排水系统→排水分区”总体技术路线的系统性思维、方案比选与论证,没有充分考虑气候变化影响下流域尺度水文条件的变化对排水系统的影响。

因此,应构建面向未来的气候适应型可持续排水系统,使得气候变化尤其是暴雨和极端降雨成为未来城镇排水系统规划、设计及运行调控的重要驱动因素。充分认识城市水系统只是大自然水循环系统的一个分支和旁路,基于流域尺度统筹,实现城市间防洪除险与排水排涝的流域协同,是未来城镇竖向规划、排水系统规划与设计及存量排水设施提升与改造的基础和边界条件。同时,该系统构建过程中应遵循“降尺度”方法及相应的总体技术路线,旨在实现从全球气候变化模型→区域气候模型→流域水文模型与预测→城市降雨及水文变化预测→排水系统防洪排涝模型的逐级降尺度模型预测,构建从气候变化压力传导到城镇排水系统快速响应以及后续适应型策略和机制的建立(见图5),新排水基础设施的规划和设计应考虑未来可能发生的气候变化,尤其是系统考虑极端降雨对整个排水系统的影响,以确保在整个资产设计寿命期内提供所需的服务标准^[15]。“降尺度”方法有助于不同专业之间实现主动和高效协同,以及城市规划、城市防洪与排水防涝系统设计及运行人员确立共同的气候及水文基础条件^[16],这也是韧性城市理念下韧性水系统构建的基础。

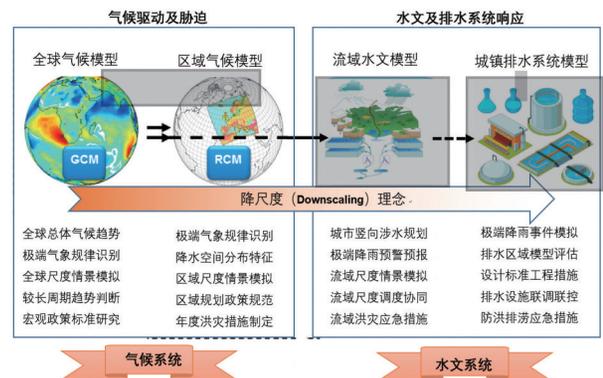


图 5 气候驱动型排水系统的理念与技术路线 (“降尺度”方法)

Fig.5 Concept and technical route of climate-driven drainage system (downscaling method)

4.3 排水系统绿色低碳理念下的技术变革

4.3.1 探索营养物质源头分离及资源化转向

传统排水系统凸显了在可持续性方面的先天不足,而这一不足在我国尤为突出。我国城镇污水管网从源头小区到城区,普遍总体效能较差,管道病害多,外水比例过高,很多城市污水厂实际进水

“清污比”(外来入侵清水量/管网收集污水量)超过100%。主要原因可能是小区内管网流速过低导致污染物沉积,调研的很多小区内排水管网流速甚至低于0.1 m/s,从建筑物排水立管至小区总出水COD浓度已衰减1/2~3/4,即小区内部管网已经形成了“沉淀池效应”;其次,城区管网高水位运行导致流速较低(0.1~0.3 m/s),引发污染物二次沉积。上述“两次沉积”过程导致城镇生产生活过程实际排放的污染物收集率较低,排出的越多,沉积、过程漏失或在线降解贡献率也越高。研究表明,国内很多城市生产生活过程中产生的COD实际上只有20%~40%被输送到污水厂进行末端处理,其余大量污染物中途泄漏、沉积或以CSO/SSO形式溢流至受纳水体导致水体黑臭,这些污染物最终去向大部分以温室气体形式排放。近年来,随着政府相关政策文件的出台,各个城市开展了以破损管网修复、“管网挤外水”、消除管网空白区为主的排水系统提质增效工作。然而,大量城市实践表明,要实现排水系统效能的大幅提升绝非易事,周期长且投资巨大,与污水厂提标改造类似,在解决完空白区的管网建设和存量管网雨污混接、地表水倒灌等主要问题后,继续对管网系统开展改造也存在边际效益递减的问题。

在国家“双碳”战略及城市高质量、韧性、低碳、绿色发展理念引领下,应尽快改善现有排水系统“高碳排、高能耗、高药耗”局面,一方面针对既有排水系统的提质增效和低碳改造工作需要持续的推进,同时有必要针对传统排水系统的“先天不足”提出新的改进或革新思路。基于此,提出“双碳”视角下城镇代谢物质流重构理念与技术路线,具备条件的地区或新建城区可探索污水系统“污染物”源头分离,实现碳、氮、磷等价值元素的源头资源转向(见图6),城镇代谢过程中产生的有机质,包括黑水、厨余垃圾和灰水在用户内部实现分离,黑水和粉碎后的厨余垃圾通过负压收集或压力管网系统进行转输,可与其他有机废物等城市代谢物一同进入有机质协同资源化中心进行资源化和能源化,对这些本应进入城镇污水管网系统的价值元素或物质在用户源头实现了路径切换,进入城市代谢产物价值元素资源化链条,这样可有效解决传统城镇排水系统高能耗、高碳排的先天不足,这条技术路径也可以为未来绿色低碳城市的构建提供可靠和稳

定的资源和能量基础,并赋予未来城市发展更广的维度和更丰富的想象力。

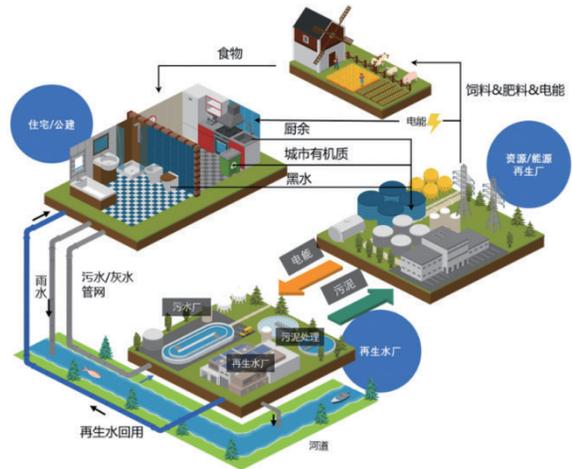


图6 城市代谢资源源头转向示意

Fig.6 Redirection and integrated management of urban metabolic resources

4.3.2 污水生物处理高效低碳工艺的选择

在气候变化驱动下,作为排水系统末端关键“兜底”单元——污水处理工艺技术路线的选择与确定直接决定了其工程造价、运行成本及碳排放水平。近20~30年来,污水生化处理工艺快速发展,新现象、新机理、新的微生物及生化代谢途径被不断揭示和发现,新的微生物附着方式和反应器形式及构型被开发和示范。从技术成熟度及工程应用案例等方面对不同技术发展阶段的污水生化处理工艺进行“S”曲线定位,见图7。

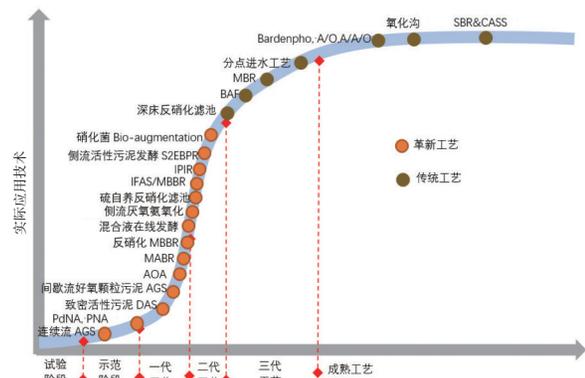


图7 污水生化处理技术发展成熟度及代际划分“S”曲线
Fig.7 Development maturity and generation division “S” curve of sewage biological treatment technology

需要进一步指出的是,近10年来,新工艺、新技术如好氧颗粒污泥(AGS)、短程反硝化耦合厌氧氨氧化(PdNA)、致密活性污泥(DAS)、MABR、S2EBPR、

强化内碳源反硝化等快速发展,工程应用近几年也在加速,尤其是国内具有自主知识产权的集约、高效及低碳源依赖型生化工艺得到快速应用,如SSH/ARP工艺、RPIR、硫自养反硝化滤池、AOA等工艺,上述创新性技术实践为“双碳”背景下行业构建气候适应型排水系统提供了更加适应我国独特水质特征多元化选择。

革新性处理工艺无疑在高效低耗、集约化方面具有技术优势,但是个别新工艺是否低碳目前尚存争议。一些自养脱氮技术的确能节约部分外加碳源,但是生化代谢过程的中间代谢产物(如 N_2O 等)导致的GHG排放可能会抵消其在节省碳源方面的优势,这值得关注和未来进一步深入研究。对于现有存量设施,成熟工艺具有丰富案例与设计及运营经验,但是存在高能耗、高物耗、占地面积大等缺陷。为了克服这些不足并减少改造投资,基于传统工艺的“微改造”,尤其是对于存量设施的“提质增效”,通过一些革新性工艺的植入,可实现低能耗、低药耗下的强化脱氮除磷。例如,DAS工艺可有效改善污泥沉淀性能并加速污泥颗粒化应用进而提升生化单元的峰值流量处理能力;S2EBPR可利用活性污泥水解深度厌氧环境培养富集发酵类PAOs进而实现对低C/N比污水的强化脱氮除磷。此外,ARP/S2EBPR工艺结合吸附-再生、分点进水与侧流活性污泥发酵等技术优势,通过旱季与雨季两种运行模式的切换,一方面雨季通过转移一部分生化池污泥至旁路侧流池存储并完成通过EPS吸附和胞内吸收污染物的降解,另一方面通过降低主生化池的MLSS浓度进而有效提升生化单元的峰值流量;旱季按污泥发酵模式运行以强化除磷脱氮。在对存量设施低扰动情况下,上述技术可实现系统总体性能的提升。此外,随着污水处理过程仪表、控制及自动化(ICA)技术的快速发展,ICA技术尤其是生化过程智能控制技术如ABAC(Ammonia-Based Aeration Control)、AvN[®](Ammonia vs. NO_x)等曝气控制与不同污水处理技术的组合,形成了未来气候驱动背景下“灵活韧性、绿色低碳、高效集约、生态智慧”理念的选择。

4.4 城镇排水系统从灰色到绿色、智慧流域的跃迁

4.4.1 从灰色设施至绿色流域

基于前述分析,现代排水系统经过百余年的发展,目前传统模式带来的边际环境及生态效益可能

已经达到了“生态临界阈值”,未来未必能如期待的那样继续改善和提升接纳水体水质、水生态及生物多样性,甚至可能事倍功半。换言之,即便污水经过了较为完善的处理过程^[17]，“高排放标准出水”也未必是“生态水”^[18]。当然,这并不是在否定传统排水系统在城市卫生系统、消除和控制病原微生物的传播、改善水环境方面所起的重要作用。

但是,在未来低碳及可持续发展成为必然需求的情况下,加之近年来极端性天气的增多,辩证、理性分析传统污水系统“用户→收集→处理→排放”及雨水系统“源头-中途-末端”的总体技术路线,系统识别当今排水系统的脆弱环节及面临的系统性挑战,进而提出适应型的解决策略和总体改进与提升甚至是重构性方案,这在未来气候适应型城市构建中显得尤为迫切。灰色基础设施关注的是水量、水质满足城市尺度上的需求,而绿色流域是基于流域视角下的生态服务、营养物结构、物质循环、生物多样性及能量和信息的流动。目前,最为急迫的是,从流域统筹角度科学规划和系统管控市政点源污染排放,农业点源及面源污染的合理、有序排放,这是在尺度和空间上如何从传统城镇排水系统到绿色流域实现跃迁、尚未打通的灰色通道。

4.4.2 从智慧排水到智慧流域

前已述及,全球范围内不确定性天气未来已经成为确定性的常态,极端降雨频发,在降雨“强度-历时-频率”各个维度上都将超过人类历史上任何一个时期,过去按低标准设计的排水系统已经无法应对超标降雨;另一方面,国内大部分城市前期对排水系统缺乏多目标统筹的系统性规划,对“源-网-站(池)-厂-河”各要素、各设施间的匹配性和协同性考虑不足,导致大量已建工程设施功能离散和碎片化问题突出,且普遍缺乏有效的区域级、城市级实时控制系统(RTC),各设施间不能实现高效、快速地联动,整个系统不能有效发挥预期作用和实现预定功能。在未来极端降雨事件增多且水环境质量改善日益提升的双重约束下,依靠单个设施的规则控制和经验的人工调度显然已经不能满足系统多目标协同和高效运行的基本需求。

极端天气胁迫下的城镇排水系统基础功能和首要需求是确保城市排水系统的可靠性与韧性。在流域超标降雨胁迫下,城镇排水系统往往面临“洪”与“涝”的双重威胁,尤其是极端降雨下过境洪

水对城区的直接威胁和排水系统外排的“顶托”作用,单一城市尺度上往往不能快速响应来自“洪”与“涝”的双重压力。近些年来,虽然各地依托海绵城市建设了为数不少的绿色基础设施(GSI),对削减城市径流总量和降低峰值流量起到了重要作用,但是有研究表明,在应对不同气候变化情景(RCP4.5和RCP8.5)条件下,相比GSI,RTC在控制洪涝方面更具有优势和韧性;在应对10年重现期暴雨方面,GSI在提升排水系统性能和恢复能力方面不如RTC^[19]。

为此,在流域尺度上应对未来极端降雨采取的适应型策略方面,需要流域内不同城市之间的高效协同与系统调度,以实现流域内水系湖泊河流、蓄滞空间、行洪通道和市政灰色基础设施在时间和空间的利用和分配上的能力匹配及高度协同。因此,需要基于流域尺度,对前述不同尺度上的设施进行智慧雨洪管控,城区排水系统采用RTC实现功能上的联调联控,也就是城市排水防涝要着眼于流域尺度上构建实时控制调度系统,做到流域尺度上洪峰协同调度管控、城区末端外排水有序、内涝治理及管网溢流控制精确可控,按“降尺度”方法分级、分层、分步规划建设模型模拟与综合实时控制平台,实现流域级RTC、城市级排水系统RTC、厂级分布式的DRTC及单元级RTC的实时预测、系统调度,最终实现智慧流域(Smart Watershed)。气候适应型策略下智慧流域实时控制系统结构及其功能见图8。

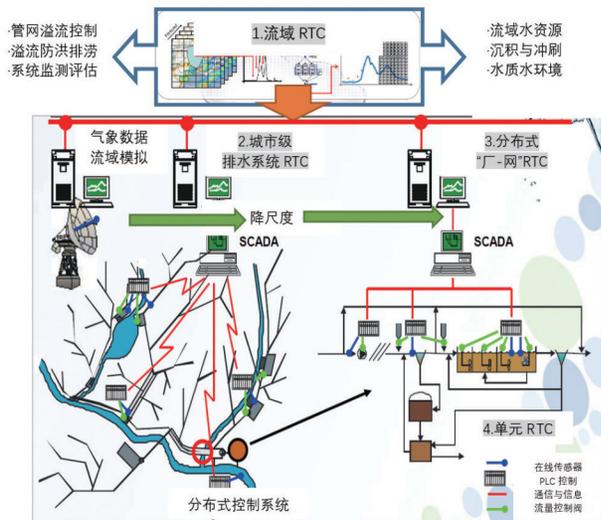


图8 气候适应型策略下智慧流域实时控制系统结构及其功能

Fig.8 Structure and function of smart watershed real-time control system under climate adaptable strategy

5 结语

城市水安全是城市安全的基石和生命健康维系的基础,在全球气候变暖导致的极端降雨日趋增多、“双碳”战略等外部环境约束下,传统城镇排水系统总体脆弱特征及全过程高耗能、高碳排模式已经不可持续,构建面向未来气候适应型可持续城市排水系统,实现现代排水系统从水质水量驱动型向气候适应型系统的功能转变已经成为未来实现全社会可持续发展的必然选择,也是未来韧性城市构建的关键环节。与此同时,调整与切换传统市政排水专业单一维度视角,从流域尺度视角统筹实现城市生态水文与传统市政排水系统的协同构建,气候适应型排水系统“降尺度”总体技术路线及理念将成为未来城镇可持续排水系统规划的基本方法,同时探索和实现流域不同尺度上的技术及管控协同、资源源头转向能源化和资源化、智慧流域视角下RTC实时控制系统等技术应对策略及气候适应性路径。

参考文献:

- [1] 任南琪,王旭. 城市水系统发展历程分析与趋势展望[J]. 中国水利, 2023(7):1-5.
REN Nanqi, WANG Xu. Development history and trend analysis with prospective of urban water system [J]. China Water Resources, 2023(7):1-5(in Chinese).
- [2] HAASE P, BOWLER D E, BAKER N J, *et al.* The recovery of European freshwater biodiversity has come to a halt[J]. Nature, 2023,620:582-588.
- [3] ANGELAKIS A N, ROSE J B. Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries[M]. UK: IWA Publishing, 2014.
- [4] 李晓宇. 中国古代城市排水竖向设计的历史经验[J]. 中国勘察设计, 2020(2):88-91.
LI Xiaoyu. Historical experience of vertical design of urban drainage in ancient China[J]. China Engineering Consulting, 2020(2):88-91(in Chinese).
- [5] BREWER T, LANCET P Y. Beyond Bazalgette: 150 years of sanitation[J]. The Art of Medicine, 2015, 386(9989):128-129.
- [6] 李云燕,李长东,雷娜,等. 国外城市雨洪管理再认识及其启示[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2018, 24(5):34-43.
LI Yunyan, LI Changdong, LEI Na, *et al.* Development process of stormwater management in foreign cities and

- the reference value to China [J]. *Journal of Chongqing University (Social Science Edition)*, 2018, 24(5): 34-43 (in Chinese).
- [7] BUTTNER O, JAWITZ J W, BIRK S, *et al.* Why wastewater treatment fails to protect stream ecosystems in Europe [J]. *Water Research*, 2022, 217: 118382.
- [8] 杜睿, 彭永臻. 城市污水生物脱氮技术变革: 厌氧氨氧化的研究与实践新进展 [J]. *中国科学 (技术科学)*, 2022, 52(3): 389-402.
- DU Rui, PENG Yongzhen. Technical revolution of biological nitrogen removal from municipal wastewater: recent advances in Anammox research and application [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, 52(3): 389-402 (in Chinese).
- [9] WANNER J. The development in biological wastewater treatment over the last 50 years [J]. *Water Science & Technology*, 2021, 84(2): 274-283.
- [10] GRÜNDEMANN G J, VAN DE GIESEN N, BRUNNER L, *et al.* Rarest rainfall events will see the greatest relative increase in magnitude under future climate change [J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3: 235.
- [11] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书 2023 [M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- Climate Change Center, China Meteorological Administration. *Blue Book on Climate Change in China 2023* [M]. Beijing: Science Press, 2023 (in Chinese).
- [12] 王建华, 朱永楠, 李玲慧, 等. 社会水循环系统水-能-碳纽带关系及低碳调控策略研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(4): 191-201.
- WANG Jianhua, ZHU Yongnan, LI Linghui, *et al.* Water-energy-carbon nexus of social water cycle system and low-carbon regulation strategy [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(4): 191-201 (in Chinese).
- [13] WANG D, YE W L, WU G X, *et al.* Greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment facilities in China from 2006 to 2019 [J]. *Scientific Data*, 2022, 9: 317.
- [14] BUTLER D, WARD S, SWEETAPPLE C, *et al.* Reliable, resilient and sustainable water management: the Safe & SuRe approach [J]. *Global Challenges*, 2017, 1(1): 63-77.
- [15] DALE M, HOSKING A, GILL E, *et al.* Understanding how changing rainfall may impact on urban drainage systems: lessons from projects in the UK and USA [J]. *Water Practice & Technology*, 2018, 13(3): 654-661.
- [16] ARNBJERG-NIELSEN K, WILLEMS P, OLSSON J, *et al.* Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 68(1): 16-28.
- [17] GUZMAN I D, ELOSEGI A, SCHILLER D, *et al.* Treated and highly diluted, but wastewater still impacts diversity and energy fluxes of freshwater food webs [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 18510.
- [18] 刘智晓. 碳中和视角下城市可持续排水系统构建及评估指标体系 [J]. *中国给水排水*, 2022, 38(16): 1-15.
- LIU Zhixiao. Establishment and evaluation index system of urban sustainable drainage system from the perspective of carbon neutrality [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(16): 1-15 (in Chinese).
- [19] LI J D, BURIAN S J. Evaluating real-time control of stormwater drainage network and green stormwater infrastructure for enhancing flooding resilience under future rainfall projections [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 198: 1-12.

作者简介:刘智晓(1972-),男,山东莒县人,工学博士,教授级高工,总工程师,研究方向为可持续排水系统构建、高效低耗污水处理工艺技术开发与工程化应用等。

E-mail:liuzhixiao@163.com

收稿日期:2023-11-28

修回日期:2024-01-25

(编辑:丁彩娟)