



DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.001

述评与讨论

碳中和视角下城市可持续排水系统构建及评估指标体系

刘智晓

(北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京100044)

摘要: 气候变化是人类发展面临的威胁之一,面对极端降雨显著增加和城市的不断扩张,传统城镇排水系统的脆弱性日益凸显,“碳中和、碳达峰”战略背景下如何系统构建面向未来的可持续排水系统,提升面对复杂外部扰动因素下排水系统的可靠性与韧性,是未来相当长时期排水系统规划设计、建造与运行环节都要思考和面对的科学问题。针对传统排水系统的系统性缺欠,就排水系统规划设计建造过程中关键要素“水-能”关系、韧性设计、生态水文及生物多样性等方面提出了建议,同时就目前实施高排放标准、极限脱氮及污水氯消毒给环境带来的影响进行了分析,在此基础上构建了包括6项一级指标、48项二级指标的可持续排水系统评估指标体系。

关键词: 城镇排水系统; 水-能关系; 管网在线存储; 韧性; 碳中和; 生态水文; 峰值流量; 实时控制; 厂-网-河一体化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)16-0001-15

Establishment and Evaluation Index System of Urban Sustainable Drainage System from the Perspective of Carbon Neutrality

LIU Zhi-xiao

(Beijing Capital Eco-Pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Climate change is one of the threats to human development. Facing the significant increase of extreme rainfall and the continuous expansion of cities, the vulnerability of traditional urban drainage system is becoming increasingly prominent. With the strategic background of carbon neutrality and carbon peaking, it is a scientific problem for planning, design, construction and operation of drainage system on how to systematically build a future oriented sustainable drainage system to improve the reliability and resilience of the drainage system under complex external disturbance factors. In view of the systematic shortcomings of the traditional drainage system, this paper puts forward some suggestions on the key elements in the planning, design and construction of the drainage system, such as water-energy nexus, resilience design, eco-hydrology, and biodiversity. At the same time, this paper analyzes the environmental impact of some current measures, such as the implementation of high discharge standards, extreme high standard denitrification and sewage chlorine disinfection. On this basis, the sustainable drainage system evaluation index system including six first-level indicators and 48 secondary indicators is constructed.

Key words: urban drainage system; water-energy nexus; in-sewer storage; resilience; carbon neutrality; eco-hydrology; peak flow; real-time control (RTC); plant-net-river integration drainage systems

人类社会进入19世纪后,随着人口膨胀和社会活动及工业的快速发展,对资源的无节制攫取和加速消耗进一步加剧了环境的破坏,尤其是温室气体的排放。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)2013年的报告,1986年—2005年全球地表平均气温已经较前工业时代升高了 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$,《巴黎协定》旨在将全球地表平均气温升高幅度相对于工业化前水平限制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。进一步削减温室气体(GHG)排放,并尽快实现“碳达峰、碳中和”,成为人类社会未来实现可持续发展的必然选择。IPCC和美国环保署(USEPA)的数据表明,污水处理过程直接贡献了全球GHG排放总量的 1.57% 、非 CO_2 型(N_2O 、 CH_4)GHG排放总量的 $4.6\%\sim 5.2\%$ ^[1]。我国近些年城市化进程不断加速,城市水面率不断缩减,不透水面积快速扩张,加之极端天气尤其是暴雨的增多,在多因素胁迫下城镇内涝和洪水引发的灾害事件频发,对社会和经济造成了巨大损失。因此,无论是从温室气体排放控制层面,还是在应对极端降雨等方面都需要在排水系统规划设计、建设与运维等环节主动采用气候适应性策略,重新评估城镇排水系统全流程各个链条及节点,构建面向未来的具有可靠性、韧性与可持续性的城市排水系统,已成为我国城镇排水系统当务之急和未来健康发展的必然选择。

1 排水系统集中与分散的选择

传统城镇排水系统主要以满足人们生活、生产过程的卫生需求,实现雨水/污水收集、集中处理或快速排放,并保持接纳水体水质标准不退化为基本特征,主要解决和满足对“量”与“质”的两个维度需求,因此,传统排水系统具有过度依赖灰色基础设施导致的系统庞大问题,面对外界扰动时存在刚性、韧性不足、全流程高能耗和物耗及忽视污水资源价值属性等系统性缺欠。与此同时,不少城市规划、建设(迁建)的污水厂有愈加集中、规模愈加庞大的趋势,“大流量、大转输”成为常态,且往往叠加地下式建设模式,使得风险过度集中,与可持续发展、“碳中和”战略及“韧性城市”的理念相违背,其原因分析如下:

① 集中建设大规模污水处理系统具有较大的系统风险性,适度分散的污水处理系统不但能提升整个城市排水系统的总体韧性与可靠性,还有利

于高品质再生水作为城市第二水源的就地短距离回用,同时也减少了污水收集管网多次提升及截污干管的工程量,避免了再生水远距离泵送导致的巨量投资及运行的高能耗。

② 从水质安全性、可靠性角度考虑,集中式污水系统一旦出现系统性故障(突发性断电、洪水淹没、水质不达标等),短时内难以恢复,将导致大量污染物的短时集中式排放,对水环境造成严重的甚至短期内难以恢复的污染。

③ 全地下污水厂往往采取整个箱体建设,未来进一步提标改造和扩容的难度大幅增加,且在应对极端降雨时被淹风险远高于地上模式;此外,综合影响评价结果显示,地下污水厂在环境影响、基建投资、生态效益三方面的综合负面影响比地上式高出约 20% ,虽然地下式污水处理厂地表通过园林景观会产生一定的生态效益,但这并不能“中和”其环境影响以及基建投资所产生的负面影响^[2]。

基于以上几个方面,从系统稳定性、可靠性及水质风险等维度上讲,建设大规模的污水系统实际上是不可持续的;从投资及后期运维等角度分析,规划建设大规模集中式污水厂与“双碳”战略理念也是相违背的。

此外,在地表水流向组织方面,集中式排水系统以人工强化水平流为主,旨在实现快速的排除;而分散式排水系统以基于自然的垂直流向及分散式调蓄为主,如各种形式的自然渗滤、蒸发,以及在线或离线的自然水体或人工调蓄设施等过程。因此,从超大排水系统风险集中度以及城市水的流向组织等方面考虑,分散式与集中式相结合的基础设施在应对洪涝灾害、减少溢流量等方面比单纯的集中式系统更具韧性。

2 “水-能”关系的重构

2.1 城市尺度上的“水-能”关系构建

水与能互相关联,互为条件,相互依存。世界的能源安全高度依赖于水资源的供应,几乎所有的能源生产技术如核能、热电、水力发电,都需要消耗大量的水;水的社会循环过程,从自然环境(地表、地下)的提取、处理、分配及使用、污水处理及回用都需要消耗大量的能源,同时水的“包容性”又使其蕴含了丰富的可以回收的资源 and 能源,因此“水”与“能”往往相伴相生。据统计,水系统能耗及GHG排

是城镇总电能消耗量及 GHG 排放量的重要来源。美国 EPA 的统计数据表明,水系统用电量占全社会用电量的 3%~4%^[3];美国城镇水务板块 GHG 排放贡献率占全社会 GHG 的 5%,这个指标在英国则更高^[4]。现代城市水系统架构下的“水-能”关系赋予了未来城镇水系统规划崭新的视角和维度,“双碳”背景下统筹“水-能关系”来系统构建城镇水系统尤其是排水系统规划将更具现实意义。

图 1 为北京 2015 年水系统水量与能耗分配关

系桑基图^[5],可以评估城市“水足迹”过程及能量消耗。在城市尺度上系统评估和多目标优化“水-能”关系,通过水系统全流程过程系统规划、聚焦水循环每个链条,对传统工艺进行改进、应用高效设备及革新性工艺技术,尤其是对排水系统结构优化进而提升系统能源利用效率,因地制宜地采用污水资源、能量回收以及清洁能源提取和利用等技术措施,进一步降低水系统能耗和温室气体排放,对提升水系统韧性及可持续性至关重要。

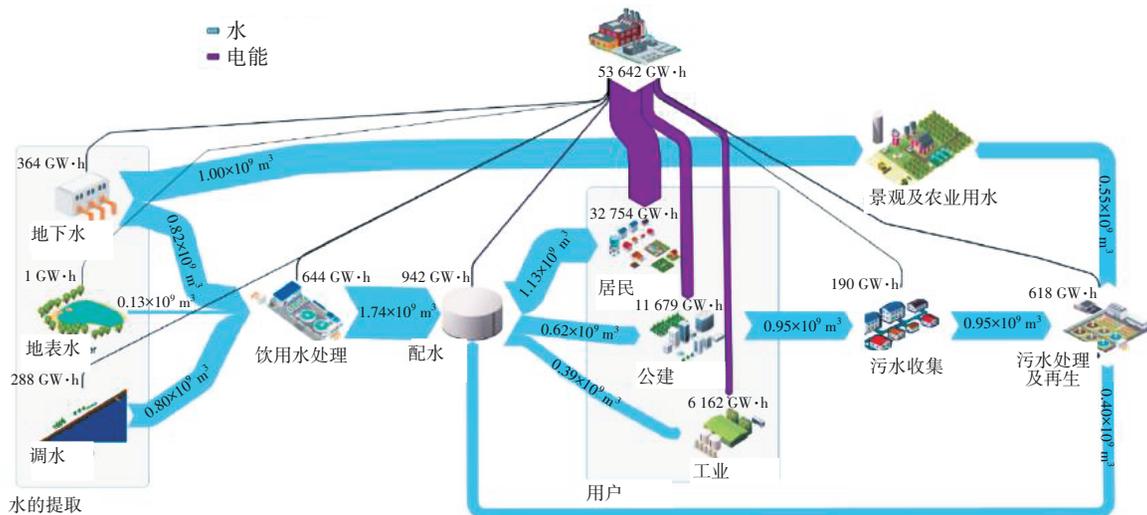


图 1 北京市 2015 年城市水系统“水-能”关系桑基图

Fig.1 Sankey diagram of water-energy nexus of the whole water cycle process in Beijing in 2015

2.2 污水能量回收潜力

传统的污水处理通过“以能消能”的方式将污染物矿化或进行污染物转化(菌体及生物量)等,如进水中 COD 大部分被好氧转化为 CO_2 ,一部分以剩余污泥等方式排出系统,小部分被厌氧消化过程转化为甲烷。实际上,污水中所蕴含的巨大“能量”远未被提取和回收利用,其中主要是热能和化学能,热能主要源于末端用户用水过程的户内加热,这是整个水循环过程中耗能最高且已被忽略的能量回收环节。根据研究,污水中的热能含量是化学能的数倍^[6];化学能存在形式则主要是用水过程排放到污水中的有机质潜能。污水中理论最大有机化学能是指污水所含 COD 全部被提取并甲烷化,对于污水中蕴含的化学能,国外很多研究者进行了不同角度的研究及定量评估,市政污水厂进水 COD 通常为 430~500 mg/L,其蕴含的化学能为 1.66~1.93 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$;当 COD 为 800~1 000 mg/L 时,化学潜能

达到 3.09~3.86 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ^[7]。需要说明的是,传统“初沉污泥+剩余活性污泥”路径只能实现一部分 COD 的能源化,还有相当一部分 COD 通过“以能耗能”的过程被去除;因此,近些年出现了一些革新的“碳捕获”及“碳改向”技术以将进水 COD 转向能源化,如高负荷活性污泥、微筛(100 μm)等工艺,最高可以达到 80% 的 COD 捕获率。在“碳中和”背景下,聚焦整个排水系统并提升排水系统对污染物的收集率,做到“应收尽收”,避免中途“跑、冒、滴、漏”,重新审视、评估污水中资源能源回收潜力,采用“碳捕获”技术实现污水中“碳转向”能源化途径、减少或避开对“以能耗能”传统技术路径的依赖,“重拾”和回归厌氧消化路径,这将会被赋予新的历史使命。目前,国外已有从污水中提取化学能从而大幅提升能量自持水平的案例,甚至有一些项目仅依赖进水有机化学能并通过污水处理过程的节能降耗、新工艺应用等措施的组合使用,实现污水处

理过程能量自给,如丹麦奥胡斯市 Marselisborg 污水处理厂,在未另行添加碳源或有机质情况下,通过工艺改进、节能设备与运行优化控制等综合性技术措施,污水厂从2011年开始就实现了能量中和,平均能量自给率为153%,成为名副其实的“电厂”。

相对于化学能,市政污水余温蕴含的可提取的热量“惊人”,热能核算显示,污水中蕴含的理论热能为 $4.64 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ (温差为 $4\text{ }^\circ\text{C}$)。通过水源热泵交换可实现38%的热能转化($1.77 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, COP=3.5)和25%的冷能转化($1.18 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, COP=4.8),从数值上看,实际污水热能回收潜力非常可观^[8]。污水热能回收可用于污水处理厂自身和周边(3~5 km)建筑的供热/制冷、温室供暖,甚至还可直接用于厌氧消化器加热、污泥干化等。通过以上两种能量提取和利用方式,借鉴发达国家的成功案例,有充分理由相信,未来的污水处理厂通过对热能和化学能的高效提取,将不再是能源的消耗者,而是能源的提供者,成为名副其实的资源回收厂(WRRF)和能源厂^[7]。

3 系统可靠性与韧性

受极端气候及超标降雨、建成区不透水面积日益增加等多重风险胁迫,传统市政供排水系统应对风险能力明显不足,系统受破坏程度严重及后期性能恢复缓慢,凸显系统脆弱性,为应对这种不确定性,韧性规划应成为未来可持续城镇排水系统构建

的核心事项^[9]。过度依赖单一的工程措施往往不能满足或者平衡系统的可靠性与韧性,可行的解决方案是基于城市级流域规划尺度,根据涉水基础设施及系统要素配置,从系统结构、功能与性能等维度提升可靠性与韧性^[10],系统构建“蓝-绿-灰”交织、“微-小-大”排水协同的“3M”串联流量控制系统^[11],通过系统性组合措施或者策略,有效提高城镇排水系统的可靠性与韧性。

3.1 适宜水面率与水系连通性

河网调蓄能力是水系在水文方面的重要功能之一,尤其在削减洪峰、降低洪水危害中具有重要的作用。受人类活动影响,尤其是近半个世纪以来快速城镇化引起的土地利用方式变化,许多城区河流、水塘、水淀区被填埋甚至完全消失,导致城市水面率大幅减少,河网、水系发育及演变也表现出由复杂到简单、由多元到单一的变化趋势^[12]。世界范围内60%以上的河流受到城市化的影响,而城市化对河流生态完整性及生态功能造成了严重威胁^[13];从国内外经验看,这种演变无疑还会加剧洪涝灾害、水质恶化等问题。借助河道容蓄指标与水系结构参数的相关关系分析河网结构对调蓄能力的影响,常用的水系变化指标包括数量特征参数和复杂性参数,选取河网密度(R_d)、水面率(W_p)描述水系的数量特征,河网盒维数(D)描述水系的复杂性特征^[14],各指标计算方法及内涵见表1。

表1 河网水系指标的定义

Tab.1 Definition of the river indices

项目	计算方法	说明
R_d	$R_d=L_r/A$, L_r 为区域内河流总长; A 为研究范围内城市或排水区域总面积	河流长度发育反映各区域河流的集中度
W_p	$W_p=(A_w/A)\times 100\%$, A_w 为区域内水系河网总面积(即“蓝色空间”)	表征河流网面积的占比,反映水系的调蓄能力
D	$D = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r}$,用边长 r 的网格覆盖河网,统计包含河流网格数,记为 $N(r)$ 。变换盒子尺寸,得到一系列 $r-N(r)$	表征河网空间分布的复杂性,该数值越大,表明河网分布越复杂

我国很多城市河道水系存在不同程度的缩减和功能退化^[12]。据研究,1960年—2010年太湖平原地区线状与面状水系均不断减少,减幅分别达35.74%、27.60%;1980年以来,随着城市规模的不断扩张,河流衰减速度明显加快,水系结构趋于主干化和简单化。太湖流域自1990年以来洪涝灾害趋势日趋严重,同时,河网水系的快速衰减,也从整体上降低了流域的调蓄能力,加剧了流域的洪涝风

险^[14],为此,水面率、河网密度等指标作为与市政“大排水”相衔接的防洪系统重要的评估指标,应纳入未来城镇排水系统规划,作为排水系统内涝防治体系中衡量韧性的基本指标之一。

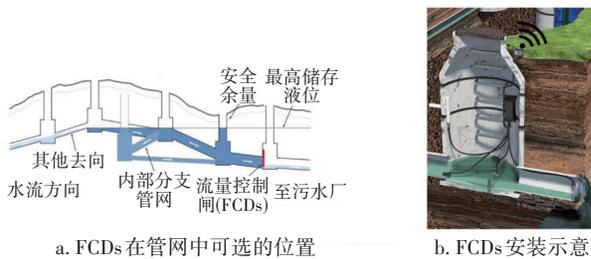
3.2 排水系统的功能脆弱性

在面对超标或极端降雨等不确定性事件时,国内排水系统往往在管网关键节点或末端出现突发性的风险集中释放,给社会造成了极大危害;与此

同时,排水系统以CSO或外渗等形式排放到水环境的污染物又易被忽略。实际上,这是由设计标准、施工及安装质量、后期运维及应急保障策略等多环节出现问题而导致的。通过对欧美一些典型城市排水系统的调研,并对比国内排水系统,发现若干共性问题比较突出,这些问题在新项目中依然存在,这极大削弱了灰色基础设施在排涝防洪、抵抗自然灾害方面的可靠性。目前,亟待关注或须解决的问题主要表现在管网系统流量可控性差、厂-池-站-网系统匹配性问题、外来水入侵引发的系列环境问题。

① 管网系统流量可控性差

国外的研究和实际案例表明,基于整个排水系统的拓扑结构,结合管网水力模拟等手段,选择在管网关键节点处设置流量控制设备,通过布局策略、具体安装数量和位置优化^[15],可以实现雨季对管网在线调蓄能力的充分利用,并实时减小CSO及下游管网的流量压力。流量控制装置(FCDs)在管网中的位置及安装示意图2。



a. FCDs在管网中可选的位置

b. FCDs安装示意

图2 流量控制装置在管网中的位置与安装示意

Fig.2 Location and installation of flow control devices (FCDs) in sewers

我国室外排水设计标准缺少在城镇排水管网适当位置设置流量控制装置的具体技术要求或建议,因此,实际项目设计往往没有考虑对排水系统流量主动控制与优化分配的必要性,导致暴雨期间无法实现对整个排水管网不同位置或区域的下泄流量和流速的有效控制,以及短时下游管网承受来自上游管网超量的流量冲击进而使得下游排水区域的排水不畅、内涝及CSO等现象,甚至在管网薄弱环节出现突发性的满溢和洪涝灾害;同时,由于管网中缺乏FCDs,其应有的在线调蓄能力得不到充分发挥,对末端流量的控制易造成瞬时冲击和压力。实际上,分布式的流量控制设备相对大规模灰色基础设施建设更加经济且易于实施并具有可持

续性^[16],因此,改进传统排水管网的排水模式,通过设置必要的在线流量控制装置实现排水系统峰值流量管控,向以“空间”换“时间”的主动控制方向转变,对于增加汛期排洪防涝的灵活性、提升排水系统韧性和可靠性等方面至关重要。

② 厂-池-站-网系统匹配性问题

由于历史原因,我国城镇排水系统缺乏系统性规划与设计,加之快速城镇化进程,已建成排水系统在应对日益增多的极端天气的冲击时呈现以下问题导致系统总体呈刚性,韧性却严重不足。

a. 排水系统规划建设过度依赖灰色基础设施,对源-网-站(池)-厂-河作为一个整体缺乏系统性考虑,尤其是对设施或单元相互间的匹配性和协同性等方面重视不够,如污水厂、调蓄池、泵站、管网等排水系统主要设施建设时具有时空差异性,彼此间传输、调蓄、处理能力不能有效协同,局部单元存在硬件设施上的技术缺欠或者能力瓶颈,导致城市排水系统难以发挥其设计功能,各个单元低效运行甚至严重偏离设计工况,这部分灰色基础设施没有发挥应有作用。

b. 硬件设施上的欠缺和能力上的不匹配可以通过后期更新、改造予以纠正或弥补,但我国多数城市排水系统缺乏有效的实时控制系统(Real-time control, RTC),排水输送链条长尤其是涉及厂-池-站-网多功能单元协同时,缺乏有效的实时在线模拟、监测、控制及系统优化。RTC对灰色基础设施的“加持”不但可以发挥源头-中途-末端整个排水系统的潜能,在获得同样效果的前提下,可以有效降低灰色基础设施的建设规模。在未来极端降雨事件愈加增多且水环境质量改善日益提升的双重约束下,在过往经验主义基础上的人工调度显然已经不能满足提升系统整体运行可靠性、挖潜和提升系统效能的基本需求,RTC与灰色基础设施的结合是目前提升排水系统可靠性与弹性的必经之路。

③ 外来水入侵引发的系列环境问题

外来水入侵(入渗、入流等)是我国大多数城镇排水系统面临的棘手问题,目前业内主要关注来源复杂的外来水引发的污水在管网内沉积及在线降解和浓度稀释问题,污水厂进水污染物浓度偏低实际上是我国大多数城镇排水系统运行效能低的一个综合性指标体现。系统梳理污水管网运行水位与城市水体水位、浅层地下水位的相互影响;科学

确定管网监测参数并在优化监测点位基础上开展管网系统性检测,识别外水来源并实现“挤外水”,应该是目前排水系统完善工作的首选项,同时强化管道质量的系统诊断和结构及功能性缺陷修复,以有效收集污染物并及时快速地输送至城镇污水处理厂,有效避免污水管网长期高水位、污水长期低流速运行导致的颗粒物在管道内沉积、城镇污水处理厂进水污染物浓度持续偏低而引起的综合性环境问题,新形势下这方面尚有若干科学问题需要关注与研究。

a. 从物料衡算角度分析排水系统的总污染物负荷的去向,以科学评估现有排水系统及污水厂的综合绩效。根据长江流域南方某市对排水系统现状全年污染物分配的分析结果,城市产生的污染物总量去向分配如下:约4.4%的污染物由于管网漏损直接排放;约20.5%的污染物在管网中形成沉积;旱季与雨季污染物直排量约25.5%;雨季溢流污染物约21.6%,另有4.1%的污染物进入在线设施处理,全年只有约23.9%的污染物进入污水厂进行处理。

b. 基于上述污染物去向解析数据,可以看出相当一部分污染物并没有进入污水厂被处理,而是进入水环境或管网在线降解。由于这部分污染物的降解大都发生在厌氧条件下,因而会释放大量的甲烷等温室气体,因此,“双碳”背景下,对排水系统全流程温室气体排放进行科学评估将会非常必要。

c. 传统及微量有毒污染物或新兴污染物的去向解析及其生态毒性问题,基于上述描述,城镇污染物相当一部分通过CSO或直排进入受纳水体,这部分污染物尤其是新兴污染物对水环境、水生态的短期和长期影响需要持续性跟踪研究。Phillips等^[17]对美国佛蒙特州CSO的观测研究显示,CSO排放量虽然只占污水厂排放量的10%,但是排放到水体的新兴污染物CSO贡献输入量比例达到40%~90%;国内也有学者进行了这方面的研究,Zhao等^[18]对深圳茅洲河流域的水质分析表明,降雨期间茅洲河水中97.3%的羟基苯甲酸酯类污染物是由CSO贡献的。由此可见,降雨期间新兴污染物通过CSO快速大量排放受纳水体,对水环境的威胁和破坏是非常严重的,很多情况下通过CSO输入水体的新兴污染物比污水厂尾水排放挟带的新兴污染物贡献度要高。因此,从水环境水质风险控制系统

性改进策略来看,提升对雨季超量混合污水的处理、减少CSO量及频次,削减这部分被“忽略”的污染物比单纯通过提高污水厂排放标准来提升受纳水体水质更务实且意义深远。

3.3 系统结构向韧性转变

面对极端天气引发的暴雨、洪涝灾害及不确定性情况日益增加的现实,排水系统规划需要实现由过去的刚性向系统灵活性、抗冲击性和适应性转变,结构刚性必然带来功能的脆弱性。未来城镇排水系统面临的核心挑战是以源-网-厂为实施单元强化汛期峰值流量管控,突破传统模式束缚,在排水系统结构和功能两个维度上实现由系统“刚性”向系统“韧性”的转变及效能提升。

① 管网系统韧性

传统的集中式调度规则在应对未来极端天气日益增加的情景下凸显脆弱性和风险集中性,鉴于我国城市规模及排水系统覆盖范围较广,在市级流域尺度上实现统一调度难度大且也不必要,故提出建设以相对独立排水片区为基本控制单元的分布式实时控制系统(Distributed Real-time Control, DRTC),实现整个城区分散与集中相结合的系统控制架构。

DRTC在我国的适用性体现在以下几方面:a. 我国城市规模大及扩张速度快,不同时期建设的排水系统建设等级及设备配置差异大,以城市级流域为尺度进行排水系统优化实时控制存在空间上的难度;b. 以独立的排水片区作为RTC的控制基本单元,其在线监测仪器、流量及液位控制设备安装数量及点位相对较少,涉及的控制规则或算法简单,总体上易于灵活调度,整个城区可实现由分布式的多个独立的DRTC控制单元组成的全域RTC系统,不同DRTC之间的设施及功能独立,但彼此间通过数据相互协同,统一由总RTC系统根据水系统模型模拟或者调度规则发出操作指令;c. 从水文、水力学角度分析,独立排水区域的水文特征、降雨特征变化较小,一个排水片区发生设备或控制系统故障不会对其他片区的控制产生直接影响,将系统性风险分散化,实现控制方式及调度模式的灵活选择,避免风险集中聚集和释放,进而提升系统韧性。

考虑汛期不同片区之间的水力连通以提高应急水量的转输能力,是提升整个城区汛期排水系统可靠性与韧性的关键技术措施,尤其是应对暴雨

时,在不同排水片区之间的关键线路上设置连通管,优先考虑重力流转输;其次通过提升泵站和相邻片区主干管的水力连通,在暴雨季节实现“过载”区域的水量向能力富余排水区域的转输,实现不同排水片区的水量联合调度,这对于提升整个城区排水系统的运行效率及设施设备的利用率,降低城区内涝,改善水环境都是非常必要的。

② 处理单元设计灵活性

污水厂作为排水系统的末端和“兜底”单元,在处理单元的韧性设计、工艺选择等方面更要凸显对气候变化的主动适应性。在污水厂规划布局上,传统的污水厂按照规模分为平行独立的若干系列;或根据水量增长情况进行分期建设。分期建设是在规划预留用地或新征用地内设计,也是按照新增规模进行系列划分。这种传统的污水处理单元布局中每个系列在总图上完全独立,存在浪费有限土地资源的问题;同时,由于系列划分导致单体处理规模过大,实际投运后进水量与设施处理能力不匹配,往往出现“大马拉小车”的问题,导致运行工况严重偏离设计参数,运行和投资都是低效的。建议采取如下改进和适应性策略:

a. “搭积木”式拼装设计理念^[19]。该设计构型的优势在于污水处理系列拼装式集约化设计,不同系列存在共用的工艺单元(如配水渠道)、池壁等土建结构或者空间,未来水量增长扩容便捷,一期、二期、三期扩容或者提标改造只需要“搭积木”式扩建或新增处理单元,不同分期构筑物总图布置实现平面“无缝对接”。

b. 模块化设计。处理单元的设计尤其是生化系统池型的选择,要考虑未来新技术应用时对现有池体的利用,可采用小水量的模块化设计。这种模块化设计取代传统的“系列”设计理念,在应对未来极端天气条件下的污水厂进水量变化时可体现出较好的适应性和匹配性,对高水力负荷冲击有较强的韧性;同时这种模块化设计更加节约用地,无需浪费土地资源,不同模组之间共享池壁,也可节省土建投资,降低碳排放;由于多模块化单元中每个独立单元运行、维护及维修互不干扰,单一单元的检修对整个系统处理能力的影响有限。

c. 前瞻性设计。工艺前瞻性设计的基本理念来源于苏伊士水务工程,从设计之初就充分考虑未来污水厂的提标改造或者扩容,在工艺选择和池型

设计上嵌入弹性设计,未来水质提升或者扩容无需大拆大建,只需经过简单调整或微改造即可实现新的目标。如深度处理直接采用Denifor V型滤池,前期按砂滤运行,在要求进一步脱氮时,只需更换滤头、滤料,调整运行程序,即成为反硝化深床滤池。

③ 厂内峰值流量处理

城市规划需要管理的核心事项是对各种要素的峰值管理,对于城镇排水系统,就是实现峰值流量的有效调控。在应对未来极端天气及外界不确定性干扰日益增多的现实情况下,除了处理单元可采用灵活、柔性模组化设计理念外,处理能力也要匹配管网收集能力及截流干管的截流倍数,处理工艺的选择和细节设计也要能有效应对和处理峰值流量,并具有雨季和旱季两种运行模式的切换功能,同时考虑旱季、雨季不同水量和水质特性,尽最大能力承接并处理雨季超量混合污水,以有效减少内涝和CSO发生,以及雨季未经有效处理的污染物排放接纳水体的输入量。污水厂处理能力与收集能力不匹配,污水厂不具有雨季超量处理能力,是接纳水体黑臭的关键和症结所在。欧美等国的污水厂雨季处理能力通常为旱季的2~8倍,生化工艺通常可以承受2~3倍旱季流量,其余通过旁路处理设施,能够充分保障汛期高水力负荷冲击下污水厂的处理能力不是整个排水系统的“瓶颈”,进而最大程度上减少CSO并提升排水系统的总体韧性。

传统活性污泥工艺受生物池MLSS浓度及二沉池固体负荷的影响,雨季处理能力的提升潜力有限,为此,可采取以下应对和解决方案:

a. MLSS转输离线储存模式。即,将生物池MLSS转输到侧流生物池进行“离线储存”,雨季降低主曝气池的MLSS浓度,进而在保持二沉池原固体负荷不变的情况下快速提升水力负荷,以回流污泥(RAS)形式被转运并储存在侧流生物池内的活性污泥,通过好氧/缺氧过程活性得到进一步强化后再回流到生物池首端。实践证明,在保证不提高二沉池固体负荷的情况下,该方案的雨季处理能力可以提升100%,同时由于侧流活性污泥发酵工艺的应用还强化了系统的生物脱氮除磷效果。类似做法还有分点进水方式,已在纽约数座污水厂用于汛期的峰值流量处理。

b. 旁路化学一级强化或高速过滤、高速澄清等工艺。采用MLSS转输离线储存模式工艺的主要优

势是设施占地小,启动快;不足是旱季设备闲置,同时对 COD、NH₃-N 等指标的去除效果有限。因此,结合活性污泥快速絮凝吸附的高效沉淀分离工艺得到开发与应用。由于采用化学旁路处理超量混合污水,因此出水往往不能满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002),建议审批第二排放口;同时建议出台雨季排放标准及相关政策,鼓励汛期污水厂多处理污水,降低管网中途 CSO 及厂前溢流。

4 生物多样性与环境可持续性

4.1 生态水文与生物多样性

传统城市排水系统的规划、设计与实施环节可归结为“水量”和“水质”两个维度,缺乏跨学科性且统筹不足,因此在规划设计中融入生态水文措施可

以弥补传统排水设施的刚性缺欠^[20]。近年来,在海绵城市理念的引领下,一些基于自然的解决方案(Nature-based solutions, NBS)得到应用。尽管 NBS 是为特定目的而设计的(如城市排水),但它可以同时提供多种生态系统服务,如雨水自然处理、渗滤、蒸发和生物多样性保持等^[21]。通过对近些年的一些实践案例的调研,个别具有“生态”特征的绿色基础设施项目,从“现代生态水文学”角度来评价,会发现其在城市水文、生物多样性及水生态服务等维度上缺乏系统性统筹,因此,应从排水系统或者全域水资源系统管理角度,充分考虑水的社会循环扰动对自然水文及生物多样性的影响。城市级流域尺度上水系统不同要素之间的关联及相互作用关系见图 3。

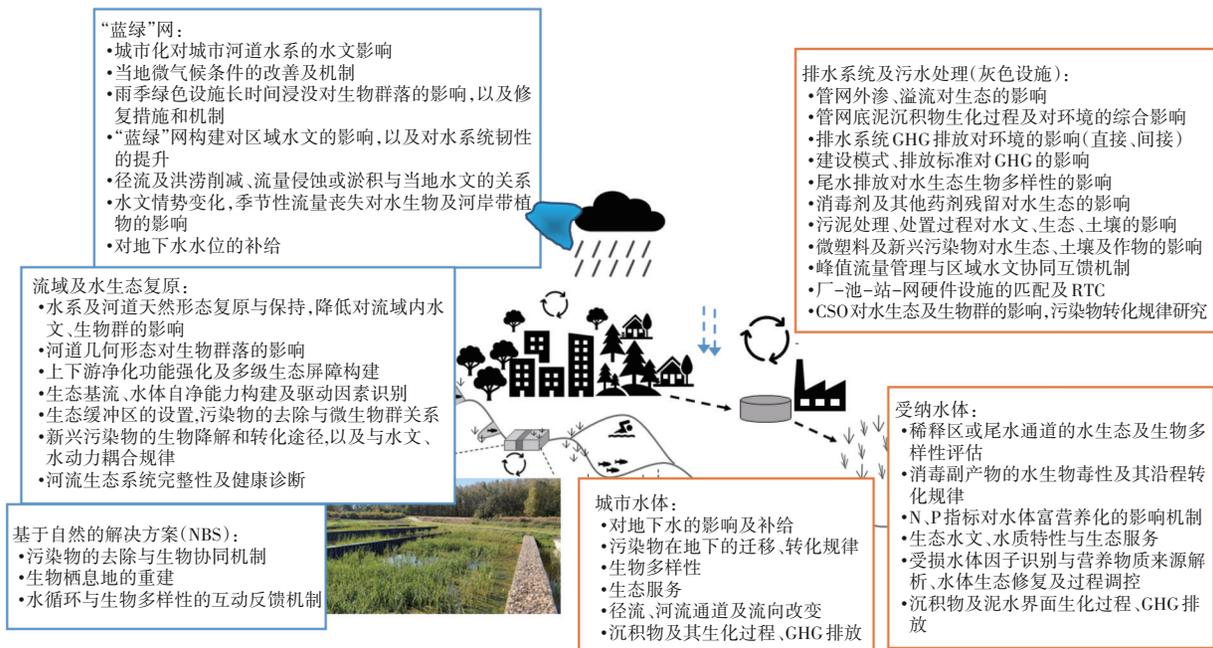


图 3 基于生态水文学视角的排水系统构建关键要素及相关问题

Fig.3 Key elements and related issues of sustainable urban drainage system construction from the perspective of eco-hydrology

实际上,保持生物多样性及维系健康的城市水文也应是未来城镇可持续排水系统构建必须遵循的基本原则。城市水系统规划与设计 and 实施需遵循的生态水文学原则^[22]:①水文学原则。从流域尺度整合水和生物群的相互作用,以识别可持续水、经济和社会面临的威胁和机遇,建立量化水循环-生态过程,识别“水-温度-营养物”对于陆地和淡水生态系统的驱动力,以及确定对水生态、水文造成影响的生物因素和非生物因素。②生态学原则。

考虑到流域水文循环的特殊性,构建满足生物多样性、生态服务需求的生态结构,从保护、恢复和管理等方面制定水视角下流域管理的综合规划。③生态工程原则。在水文学原则和生态学原则的基础上,从水质和水量两个层面充分考虑、适度规划,系统构建统筹水质提升、满足生物多样性及生态服务的低投资及低运行成本的近自然解决方案。

Pawel 等^[23]在城市可持续城市排水系统及城市水资源管理方面提出了基于水、生物多样性、生态

系统服务、系统韧性、文化与教育等维度上的系统框架,即基于生态水文视角下可持续城镇水系统规划“WBSRC”原则,这为未来可持续城镇排水系统规划提供了一个多维度的系统性框架。需要强调的是,在“WBSRC”理念下,城市排水系统构建尤其是在重视区域健康水文循环基础上提高了生物多样性,同时注重在水循环各个环节减少各类化学药剂的投加,并避免工程措施出现碎片化的生物群落。

4.2 排放标准与革新性处理工艺

可持续排水系统聚焦于源-网-厂-河全流程低碳,而在传统工业化时代思维模式下的污水系统设计理念往往在单一维度上追求污水厂的高排放标准甚至极限排放标准,却忽视了大环境尺度下生态协同的系统性思维。因此,在“碳中和”背景下,要系统评估污水厂排放标准过高的提升必要性、经济性及环境可持续性,一味追求高标准排放可能会因导致更高的GHG排放而抵消水质提升对环境的总体收益。Neethling等^[24]以10 mgd(1 mgd=3 785 m³/d)污水厂为例,研究了不同等级排放标准与二氧化碳的关系,结果见图4。

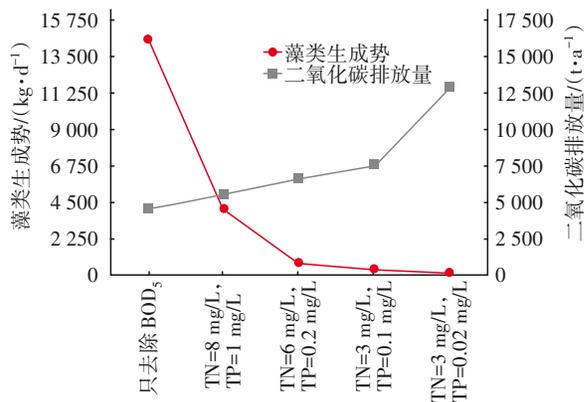


图4 不同排放标准等级对处理水的藻类生成势和二氧化碳排放量的影响

Fig.4 Effects of different discharge standards levels on algal growth potential and CO₂ emissions in wastewater treatment

随着排放标准的提高,污水厂出水藻类生成势快速降低,但总的二氧化碳排放量随之快速提高,尤其是执行TN=6 mg/L以上标准时,二氧化碳排放量呈指数升高趋势。也就是说污水行业排放标准提高意味着碳增量的快速抬升,排放标准越高,处理工艺复杂冗长导致的初期基建投资、运行过程电

耗、药剂和材料都将大幅提升。Cardenes等^[25]对英格兰东南部6座规模较大污水处理厂的运行数据分析表明,为了满足日益严格的排放标准,这些污水厂的能源消耗在过去5年中翻了一番,根据预测如果都要提标,全英较大规模污水厂GHG排放量将会增加(1.3~2.3)×10⁸ t。另一方面,由于我国环保执法采用瞬时值,排放标准严格(地表水“准IV”“准III”类等),设计和运维环节不得不增加“冗余”或者“安全度”方面的考虑,因此近些年新的高标准项目往往采用膜分离、高剂量的O₃氧化甚至催化氧化等工艺,进一步大幅度提高了处理能耗及各种药耗。以北京的污水厂执行《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)实施提标改造为例,污水排放标准由GB 18918—2002的一级B/A提标到DB 11/890—2012,在原有工艺基础上需增加再生水深度处理系统和脱色消毒系统。经调研,再生水厂改造后电耗较改造前增加55%~100%,其中采用膜工艺、紫外消毒工艺的再生水厂电耗增加量较高,约为100%;采用砂滤、滤布滤池、次氯酸钠消毒工艺的再生水厂电耗增加量略低,约为55%。

如何制定未来排放标准指标,如何平衡水环境质量改善与温室气体排放之间的关系,如何响应“碳中和”战略、“碳减排”策略,是流域治理、区域排水系统规划、设计环节必须要考虑的重大问题。

除了对排放标准可持续性的反思,还应对一些革新性污水处理工艺(如主流厌氧氨氧化、侧流厌氧氨氧化等)的GHG排放特征进行分析和评估。研究发现采用厌氧氨氧化工艺并实现“电中和”的污水厂,可能并没有实现“碳中和”。如果不能解决厌氧氨氧化过程中N₂O的排放问题,标榜“环境友好”的污水厂其环境可持续性会大打折扣甚至是被否定的。De Haas^[26]分别对“主流-侧流”DEMON工艺、A-B工艺(其中侧流工艺采用DEMON)、无侧流消化液Anammox处理的传统A/O等不同组合工艺进行了基于N₂O排放特征的对比研究。结果显示,侧流-主流都采用厌氧氨氧化方式的工艺,虽然实现了完全能耗自给(电中和),但是其GHG排放量却是上述工艺中最高的;采用传统处理工艺的污水厂其GHG排放量却是最低的。国际“碳中和”先驱Strass污水厂主流-侧流均采用厌氧氨氧化处理方式,从温室气体排放角度分析,该组合处理工艺的N₂O排放是上述不同工艺中最高的^[27];从全生命周

期(LCA)评价角度分析,该模式确实带来了效益,但从大环境角度看它并不能被称为“环境友好”,因为其处理工艺直接排放大量 N_2O 而对气候变化形成了潜在影响。同样研究结论,Kuokkanen等^[28]对赫尔辛基 Viikinmäki 污水处理厂 2013 年—2019 年实际排放 N_2O 的数据进行了研究,结果表明,如果不加以适当控制,在污水处理短程硝化反硝化过程中有相当大的 N_2O 排放风险,这可能超过节约能源和化学品对环境产生的积极影响。上述研究表明,如果不能解决革新性污水脱氮工艺中的 N_2O 排放问题,“电中和”可能实现了,却未必实现“碳中和”。从这个角度讲,未来准确识别和定义“能耗中和”和“碳中和”关系,具有现实意义;两者不能等同,否则电中和就会掩盖“碳增量”。

在温室气体排放及极端降雨日益增多的多重压力下,从单一目标和维度上规划、设计大尺度灰色基础设施已经颇受诟病,费城、伦敦及哥本哈根深隧项目受到严厉批判^[29],仅从“水”的维度来规划设计的项目被实践证明是存在较大问题和风险的,未来可持续城镇排水系统的重构需要兼顾和平衡经济及环境可持续性等方面。可靠性、韧性与可持续性通常是矛盾的,提高系统的可靠性往往不能满足经济和环境的可持续性,但是这种看似“不可调和的矛盾”实际上随着科技发展是可以通过一些革新的工程技术措施逐渐得到解决,在有效降低工程投资、节省运行能耗的同时,实现系统可靠性、韧性与可持续之间的平衡,这为未来构建崭新的城镇排水系统呈现了一个极具活力和前景的研究和产业化方向。在“双碳”视角下,需要重新审视过往在水系统规划、设计与运行控制方面形成的习惯或传统做法,逐渐认知水处理工艺、水环境与温室气体排放之间的耦合关系,与此同时,一些目前看来革新性污水处理工艺及排放标准的提升往往带来GHG负面效应,因此,如何平衡水质提升与GHG排放的关系,是未来亟需解决的科学与工程问题。

4.3 极限脱氮刍议

近些年来,各地相继出台“准Ⅳ类”“准Ⅲ类”等高污水排放标准,甚至极个别城市要求所在流域内污水厂执行TN为1 mg/L的超高标准,引发热议。提高排放标准、控制水体富营养化本无可厚非,但其中一个关键性的科学和技术问题首先是如何在技术可达、经济合理的前提下控制硝态氮的去除;

其次是是否有必要极限去除这部分硝酸盐氮。综合国外实际案例观测结果来看,一味提高对氮素尤其是硝态氮的极限去除,值得商榷。

欧美一些湖库富营养化控制案例的研究表明,控磷比控氮更经济有效,甚至控氮并不能控制湖库的富营养化^[30]。有研究在加拿大安大略西北部的浅水型湖泊227湖中进行了为期37年的磷素输入不变、氮素输入逐年减少的氮磷投加试验,以验证氮控制对富营养化的影响贡献。在试验最后的16年(1990年—2005年),该湖只投加了磷素而未投加氮,但是这期间依然发生了较为严重的水华。基于37年的长周期跟踪性研究,Schindler等^[30]认为,对于大多数淡水湖泊,通过控制氮的输入来实现控制富营养化最终是徒劳的,将有限的资金用于控制磷的输入应该更经济有效。这样的结论在欧洲和北美近40座湖泊的富营养化控磷实践中得以验证^[31]。有意思的现象是,欧美一些湖泊反而在特定季节或时期向水体添加硝态氮来实现富营养化控制,如美国弗吉尼亚 Occoquan Reservoir 为了保证水质,季节性输入 NO_3^-N ,投加量为10 mg/L时通过控制泥水界面的氧化还原环境以控制湖库底泥磷的释放,使水库的富营养化得到遏制^[32];此外,硝酸盐投加还可以有效抑制底泥中甲基汞的释放,在靠近底泥沉积层添加富含硝态氮的三级处理废水可以降低甲基汞的浓度,并可能减少汞的生物积累,同时提高饮用水的安全性^[33]。

上述案例提示,对于特定湖泊或水库等受纳水体,是否真的有必要将TN(主要是硝态氮)控制到极限排放水平值得商榷;其次,对于污水厂尾水排放到城区河道尤其是受纳水体为黑臭水体的情况下,保证必要的硝态氮对于遏制黑臭控制底泥“泥-水”界面磷的释放进而控制藻类繁殖是有益的,因此,有必要重新认识和辩证评估硝态氮在水体富营养化控制及水质标准体系中的作用,不应唯“极限脱氮”论。

诚然,目前理论界在控氮、控磷方面仍存在一些不同认知,也不否认有些湖泊富营养化控制在某些时期进行氮磷指标协同“双控”的有效性,但是笔者认为,前述欧美研究和实际案例都表明,相较于氮而言,磷相对可控,即便切断所有的人为氮素输入,但由于空气中存在大量的氮气,生态系统可以通过生物固氮过程和闪电快速补充氮素,而磷素则

不具备上述补充途径。在较长的时间尺度上,通过削减氮负荷来控制浮游藻类总量往往不是有效和经济的。此外,对于特定受纳水体,制定排放标准限定污染物绝对浓度的同时还要关注污水厂出流实际的N/P比,研究表明维持Redfield系数,对于维持受纳水体生物群落结构及平衡并对水生态、水质具有重要影响。从流域尺度上系统性评估受纳水体水质特征,不搞“一刀切”、不能一味追求极限脱氮,要辩证认识极限脱氮的必要性,甚至因地制宜地修改污水排放标准,对有些流域准确识别富营养化特征、放宽对TN中硝酸盐氮的排放限制,将有限资金用于集中控制磷污染,从而大大降低富营养化的治理成本,对于构建经济、低碳、可持续的城市水系统具有深远意义。

4.4 过量含氯消毒剂投加对水生态的负面影响

近些年来,随着各地污水排放标准对粪大肠菌群指标要求的提高,污水处理过程中往往会过量投加含氯消毒剂,可能导致污水生物毒性显著增强的问题。这是因为消毒剂能够与水中含有人工或天然溶解性有机物(NOM)发生氯化反应,从而生成大量消毒副产物(DBPs)并排放到受纳水体^[34]。此外,不同于给水水源,污水厂尾水残留较高浓度的含氮有机物发生氯化反应后还会产生具有更强“三致”活性的含氮DBPs,如卤乙腈、卤硝基甲烷和N-亚硝基二甲胺(NDMA)等;污水中溴化物浓度通常也远高于饮用水水源,因此尾水消毒过程也会产生大量具有更高“三致”活性的溴代DBPs;同时,因过量投加消毒剂生成的部分DBPs及其水解产物也会随尾水排放到受纳水体。目前,在排放口下游河道内已检测到不同种类的DBPs,甚至三卤甲烷在一定区间内沿程浓度呈现逐渐提高趋势^[35]。显然,长距离、长周期的各类DBPs和残留消毒剂的存在,会持续破坏水环境功能及微生物菌群结构,并对水生生物(鱼类、贝类等)产生急性、亚急性毒性效应,对水生植物产生直接破坏作用,进而持续破坏水生态系统平衡,导致微生物生态系统结构性及功能性改变,以及受纳水体及下游水环境生物多样性消失^[36]。倘若这些含有DBPs“毒性”增强的尾水被直接或间接排放到饮用水水源,会对饮用水水源地水质安全性直接构成严重威胁。近些年来,根据调研,我国一些执行高排放标准的污水项目,其尾水排放河道及水环境生物多样性反而比提标前大幅

减少甚至鱼虾皆无,这种高药耗、高能耗换取的所谓“高品质水”其生态价值值得深入探究。

基于水生态安全性考虑,美国一些发达国家要求采用氯消毒工艺的污水厂还需配备脱氯工艺,虽然有研究显示,脱氯过程并不能将氯化消毒后污水的毒性水平恢复到氯化消毒前,但是脱氯环节还是能有效控制和削减氯消毒剂本身进入后续水环境的行为。遗憾的是,我国设计标准(规范)却没有考虑或给出氯化消毒的生态风险措施(如要求污水厂设计脱氯或者降低氯化消毒副产物生成潜能的一些建议的工程技术措施)。自新冠疫情暴发后,不同场合的消毒剂更是被大量甚至无节制使用,进而提升了含氯消毒剂向环境的释放量^[36]。基于含氯消毒剂引发的持久性生态毒理风险有待后续系统研究与评估,这将是一项长周期的工作。减少含氯消毒剂的使用,改进消毒方式(多点投加)、方法(与UV联用),开发如过乙酸(PAA)等新型环保型消毒剂,已经成为未来城镇排水系统规划、设计与运营等各个环节必须面对和解决的水生态安全与可持续发展的迫切事项。

5 可持续城镇排水系统技术指标体系构建

基于上述分析,水系统作为市政基础设施不仅要成为韧性城市总体规划的重要组成部分,也要主动适应不断变化的外在环境压力及相关条件的约束,并不断调整和优化;从另一角度看,低碳虽然给水系统发展带来压力,但也给水务和环境行业带来新的技术发展驱动力、商业模式创新和发展机遇。水务行业要系统性构建以韧性、可靠性与可持续性为基本特征的面向未来的城镇排水系统框架,至关重要的问题是实现跨学科、跨部门的协作和共同实践。由于所涉及的社会和技术复杂性,以及对水系统面临的综合挑战和系统解决方案的范围缺乏共同的理解和认知,因此,推进可持续排水系统的构建并不是一件容易的事情。

目前,国内外尚缺乏“碳中和”战略背景下可持续排水系统评估指标体系,为此将可靠性、韧性、低碳、生态安全性、智慧监测与风险预警及非工程性措施与利益相关方的积极参与等6项指标设置为一级指标,在一级指标基础上细化为48项二级指标,具体如表2所示。需要说明的是,不同指标之间可能会存在一些内在的逻辑关系和相互影响,但是排水系

统本身就是一个多维度、多层次、多因素、多目标复杂交织的体系,需要各个专业的共同协作和推进。

表 2 “碳中和”战略背景下可持续排水系统评估指标体系

Tab.2 Sustainable drainage system evaluation index system under carbon neutrality strategy

一级指标	二级指标	指标设置及必要性说明
可靠性指标	排水管网及处理厂片区合理布局	合理规划布局收集管网及污水厂、再生水厂,避免污水或再生水的远距离输送
	“3M”系统设计标准并与防洪标准衔接	源头减排系统(Micro System)、排水管网系统(Minor System)和排涝除险系统(Major System),简称“3M”系统,“3M”系统之间标准衔接及与防洪系统标准的衔接,满足设计重现期;从源头-中途-末端系统构建串级流量控制系统
	道路积水深度及退水时间	评估排水系统超标降雨系统可靠性及恢复性能
	管网入渗入流、外渗控制	削减管网“外来水”,控制入渗入流,形成污水调蓄空间;提升管网及污水厂进水污染物浓度;低水位地区控制污水的外渗
	CSO(溢流量与频次)或削减率	制定 CSO 长期控制规划;工程措施和非工程措施施用
	污水厂排放达标率及稳定性	用于评估收集及处理系统的可靠性及运行的稳定性;可以采用技术性能统计方法,将 95% 统计值对应的数值作为衡量处理工艺的可靠性指标
	断面水质达标率	用于衡量整个城市尺度上总污染负荷排放当量是否满足环境容量
	设施和设备闲置率及性能完好率	评估厂-池-站-网设施、设备的运行效能,提升灰色基础设施的使用率及性能完好率
	排水系统污染物收集率	以人均产量为基础,是衡量排水系统运行效能的基础和可靠性指标
	管网流速及管网沉积度	低管网流速易导致污水在管网内部的沉积,损失 COD 的同时也是温室气体的主要形成区,同时还是导致受纳水体“雨后返臭”的主要因素
	管网病害及混接、错接状况	雨污混接造成污水管网污染物浓度降低、挤占排水空间或造成污染物直排
	污水厂进水 BOD ₅ 浓度	衡量管网系统建设及运维水平的重要指示性指标
	地下水采补平衡与地下水水质监测修复	区域地下水超采面积比例及超采强度指标的控制;通过绿色基础设施、河道补给、高品质再生水间接或直接补充地下水;地下水位的保持;地表径流及污(废)水、坑塘水对地下水的污染监测与修复
韧性指标	排水系统集中度(DC)	$DC = (1 - \frac{\text{实际排口数量}}{\text{可选的总排出口数量}}) \times 100\%$,用于表征排水系统集中程度,可选的总排出口数量是指排水区域内具有条件设置排放口的总数量。如果城区或片区只有一个排出口,则集中度 DC=100%
	蓝绿空间占比	直接体现城区应对超标降雨事件的就地蓄存、缓冲能力
	城市水面率及河网密度	采用河网密度(R_d)、水面率(W_p)、盒维数(D)、水位 Hurst 指数(H)等指标评估河网调蓄能力,尤其在削减洪峰、降低洪水危害中具有重要作用
	内河水系三维连通性以及河道形态指数	汛期提高超标降雨径流的通道及大尺度存储;河道形态有利于提升生物多样性和排水过程的韧性
	排水片区峰值流量转输	利用不同排水系统的冗余负荷并通过连通管网进行超标水量的转输,进而提升汛期城市级流域尺度的安全性与韧性
	管网在线调蓄和分布式调蓄应用及设备使用率	管网在线调蓄能力可以提升汛期排水系统运行的安全性与韧性以及调蓄能力,以减少排水系统污染物的排放
	污水厂汛期峰值流量处理能力	峰值系数=污水厂汛期峰值流量处理能力/旱季处理能力;强化一级处理设施;生物池侧流工艺、多点进水等灵活性设计;处理单元处理能力的原位可扩展性;处理单元模组化设计等
	污水溢流量与管网污水总收集量之比	用于评估排水系统对溢流量的控制能力及对所容纳污水的消纳、处理能力
	雨后河道黑臭及水质恢复周期	下雨返臭及恢复周期长说明管网系统存在功能性缺欠或不足,不能承受冲击,导致 CSO 频次及量无法满足水环境改善要求
	内涝消除时间	表征排水系统雨后的恢复能力
	厂-池-站-网负荷匹配性及改进	厂-池-站-网负荷匹配性对排水系统韧性、系统排水能力及水量管控河调度能力的影响
	RTC 实时控制技术应用	缺乏 RTC 系统的灰色设施效率低,导致设施使用率及负荷率偏低,不能发挥设施的最大效能,系统抗干扰性差
管网关键节点流量控制设施及设备可靠性	必要的在线流量控制设备或调蓄设施是保证管网系统流量可控性及避免末端风险集中释放的基础	

续表2 (Continued)

一级指标	二级指标	指标设置及必要性说明
低碳指标	执行合理排放标准	选择与当地社会、经济和自然环境发展相适应的排放标准
	化粪池及管网沉积控制及定期清淤	新区或新建区域化粪池取消;化粪池及管网定期定量清淤;管网沉积物控制
	污水处理能量自给率以及低碳技术应用	污水处理短流程技术开发与应用;初沉污泥及活性污泥发酵;主流-侧流自养脱氮技术;厌氧消化沼液处理过程 N_2O 实时监测与控制;SND工艺应用;全流程低碳运行策略及碳运行评估技术应用等
	能耗与药耗消耗控制	高效设备应用;过程优化控制系统应用;絮凝剂、混凝剂、除磷药剂、消毒剂的节制使用及精确控制
	污水资源回收与利用	再生水、C、N、P回收利用等,资源回收提升系统的可持续性
	污水中能源回收及利用	污水碳源捕获及碳改向技术;厌氧消化沼气利用;热电联产CHP;协同厌氧发酵;水源热能提取;清洁能源开发与利用等
	污泥安全低碳处置	取消污泥填埋,采用厌氧消化与好氧发酵等
生态安全性	生态基流达标率	区域内代表性河流断面中生态基流达标断面所占比例,反映了社会经济取水及水利工程调控等对河流维持基本生态功能所需流量的影响
	生物多样性指数	生物多样性指数是衡量和表征水系统生态及环境可持续的基本指标,排水系统外排物料不能破坏接纳环境生物多样性;长期和短期毒性影响
	底泥沉积物的污染物浓度及释放	接纳水体、河道底泥的污染物浓度及释放特性是影响水质及微生物多样性的重要方面
	外运污泥生物安全性	污水厂、清沟底泥、河道底泥含有众多污染物及重金属等,需进行安全处置以免再次污染水环境
	环保型消毒技术应用	采用绿色消毒技术,避免消毒副产物对水生态、水环境的破坏,同时避免消毒副产物再次进入水源地
	污泥焚烧烟气中汞、二噁英等毒性物质控制	汞、二噁英等指标需满足国家排放标准要求
	工业废水的园区集中处理与污泥安全处置	含有难降解或重金属等污染物的工业废水需集中收集处理后达标排放;减少或尽量避免工业污染物进入市政污泥处理及处置进而污染土壤或地下水
	重金属向水体和土壤中的释放	控制Cd、Hg、Cu、Pb等物质向水环境及通过污泥向土壤的释放和转移
智慧监测与风险预警	智慧监测、预报及预警	采集气象信息,并通过分布式传感器对排水系统关键节点的液位、流速、水量、CSO等关键参数和节点进行实时监测、预报及发出预警信息;仪表选型及布点合理性及经济性;监测频次及稳定性
	排水管网关键节点、合流制溢流污水调蓄处理设施与污水处理厂监测	掌握易涝点及调蓄处理能力,为城市排水系统的调度控制提供依据,提高系统合流制溢流控制能力,降低水环境污染风险
	仪表安装及误差	满足监测精度要求,避免数据漂移及数据失真,为控制系统提供数据基础
	水系统模拟软件或算法应用	用于前期规划方案的模拟及后期运行优化控制阶段的在线模拟,并准确、及时地给出控制指令;建立网-厂联调联控优化算法并实现应用与效果评估
非工程性措施及利益相关方的积极参与	管理提升与改进措施	制定排水系统提质增效及溢流污染短期、长期控制规划;强化日常管理手段、创新和改进管理措施,提升系统的整体运行效能等
	应急管理措施及保障体系	日常管理体系、操作规程、调度规则的建立;发生突发性故障、内涝灾害等公共事件的应急处置能力,适应极端天气的主动防御
	安全培训、宣传及利益相关方的积极参与	普及应对灾害天气的安全保障和常识,以及韧性城市及韧性排水、景观等;利益相关方的沟通与协同是效率及质量提升的基础和保障

6 结语

气候变化是人类发展面临的威胁之一,面对极端降雨显著增加和城市的不断扩张,传统城镇排水系统的脆弱性日益凸显,在“碳中和、碳达峰”战略背景下,需全面考虑如何系统构建面向未来的可持续排水系统、系统提升面对复杂外部扰动因素下排

水系统的韧性与可靠性,而不能仅在“水”的一维空间和尺度上提供解决方案。排水设施规划和建设注重环境总体可持续性,避免实施“伪生态”甚至“逆生态”行为,充分保护生物多样性是未来相当长时期可持续排水系统规划设计、建造与运行环节都要思考和面对的科学问题。未来,以韧性、可靠性

与可持续为基本特征的排水系统注重为城市发展提供环境与生命健康和综合生态价值,通过排水系统韧性与生态设计,重新构建人与环境、人与生态的文明链接,这既是挑战,更是赋予行业发展的新机遇和新动能。

参考文献:

- [1] LU L, GUEST J S, PETERS C A, *et al.* Wastewater treatment for carbon capture and utilization [J]. *Nature Sustainability*, 2018(1):750-758.
- [2] 郝晓地,于文波,王向阳,等. 地下式污水处理厂全生命周期综合效益评价[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(7):1-10.
HAO Xiaodi, YU Wenbo, WANG Xiangyang, *et al.* Life cycle comprehensive efficiency assessment on underground wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(7):1-10(in Chinese).
- [3] ZAKKOUR P D, GATERELL M R, GRIFFIN P, *et al.* Developing a sustainable energy strategy for a water utility. Part 1: a review of the UK legislative framework [J]. *Journal of Environment Management*, 2002, 66(2):105-114.
- [4] ROTHAUSEN S, CONWAY D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector[J]. *Nature Climate Change*, 2011, 1: 210-219.
- [5] REN Z J, PAGILLA K. Pathways to Water Sector Decarbonization, Carbon Capture and Utilization [M]. London: IWA Publishing, 2022.
- [6] LAM K L, VAN DER HOEK J P. Low-carbon urban water systems: opportunities beyond water and wastewater utilities? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(23):14854-14861.
- [7] MCCARTY P L, BAE J, KIM J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer—can this be achieved? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(17):7100-7106.
- [8] HAO X D, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Energy recovery from wastewater: heat over organics [J]. *Water Research*, 2019, 161(15):74-77.
- [9] JUAN-GARCÍA P, BUTLER D, COMAS J, *et al.* Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. state of the art [J]. *Water Research*, 2017, 115:149-161.
- [10] SITZENFREI R, DIAO K, BUTLER D. Resilience of interdependent urban water systems [J]. *Water*, 2022, 14:440.
- [11] 赵丰昌,章林伟,高伟. 海绵城市理念下城市内涝防治体系构建的探讨[J]. *给水排水*, 2021, 47(8): 37-44.
ZHAO Fengchang, ZHANG Linwei, GAO Wei. Discussion on the construction of urban flooding control system under the concept of sponge city [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(8): 37-44 (in Chinese).
- [12] HAN L F, XU Y P, LEI C G, *et al.* Degrading river network due to urbanization in Yangtze River Delta [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(6): 694-706.
- [13] DENG X J, XU Y P, HAN L F, *et al.* Spatial-temporal evolution of the distribution pattern of river systems in the plain river network region of the Taihu Basin, China [J]. *Quaternary International*, 2016, 392:178-186.
- [14] 王跃峰,许有鹏,张倩玉,等. 太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响[J]. *地理学报*, 2016, 71(3): 449-458.
WANG Yuefeng, XU Youpeng, ZHANG Qianyu, *et al.* Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 449-458 (in Chinese).
- [15] EULOGI M, OSTOJIN S, SKIPWORTH P, *et al.* Hydraulic optimisation of multiple flow control locations for the design of local real time control systems [J]. *Urban Water Journal*, 2021, 18(2):91-100.
- [16] GAROFALO G, GIORDANO A, PIRO P, *et al.* A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, 78: 30-42.
- [17] PHILLIPS P J, CHALMERS A T, GRAY J L, *et al.* Combined sewer overflows: an environmental source of hormones and wastewater micropollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(10): 5336-5343.
- [18] ZHAO X, ZHENG Y, HU S Y, *et al.* Improving urban drainage systems to mitigate PPCPs pollution in surface water: a watershed perspective [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 6: 125047.
- [19] GLEN T D. Flexibility and adaptability: essential elements of the WRRF of the future [J]. *Water Practice & Technology*, 2017, 12(1): 156-165.
- [20] WAGNER I, BREIL P. The role of ecohydrology in creating more resilient cities [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2013, 13(2):113-134.

- [21] ATANASOVA N, CASTELLAR J A, PINEDA-MARTOS R, *et al.* Nature-based solutions and circularity in cities [J]. *Circular Economy and Sustainability*, 2021, 1: 319–332.
- [22] ZALEWSKI M. Ecohydrology and hydrologic engineering: regulation of hydrology-biota interactions for sustainability [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(1): A4014012.
- [23] PAWEŁ J, JURCZAK T, ZALEWSKI M. Ecohydrology for sustainable urban water management [C]//WFEO. *Proceedings of International Conference on Water, Megacities & Global Change*. US:WFEO, 2022: 59–76.
- [24] NEETHLING J B, FALK M W, REARDON D J, *et al.* WERF nutrient challenge–nutrient regulations, treatment performance, and sustainability collide [J]. *Proceeding of the Water Environment Federation*, 2011, 5: 1–16.
- [25] CARDENES L, HALL J W, EYRE N, *et al.* Quantifying the energy consumption and greenhouse gas emissions of changing wastewater quality standards [J]. *Water Science & Technology*, 2020, 81 (6): 1283–1295.
- [26] DE HAAS D W. The energy versus nitrous oxide emissions nexus in wastewater treatment systems [C]//IWA. *Proceedings of IWA Nutrient Removal and Recovery Conference*. Australia:IWA, 2018: 18–21.
- [27] SCHAUBROECK T, DE CLIPPELEIR H, WEISSENBACHER N. Environmental sustainability of an energy self-sufficient sewage treatment plant: Improvements through DEMON and co-digestion [J]. *Water Research*, 2015, 74: 166–179.
- [28] KUOKKANEN A, BLOMBERG K, HEINONEN M. Unwanted mainstream nitrification-denitrification causing massive N₂O emissions in a continuous activated sludge process [J]. *Water Science & Technology*, 2021, 83 (9): 2207–2217.
- [29] SÖRENSEN J, PERSSON A, STERNUDD C, *et al.* Re-thinking urban flood management—time for a regime shift [J]. *Water*, 2016, 8(8): 332–347.
- [30] SCHINDLER D W, HECKY R E, FINDLAY D L, *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. *PNAS*, 2008, 105 (32): 11254–11258.
- [31] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, *et al.* Reducing phosphorus to Curb Lake eutrophication is a success [J]. *Environment Science & Technology*, 2016, 50(17): 8923–8929.
- [32] CUBAS F J, NOVAK J T, GODREJ A N, *et al.* Effects of nitrate input from a water reclamation facility on the Occoquan reservoir water quality [J]. *Water Environment Federation*, 2014, 86(2): 123–133.
- [33] BEUTEL M W, DUVIL R, CUBAS F J, *et al.* Effects of nitrate addition on water column methylmercury in Occoquan Reservoir, Virginia, USA [J]. *Water Research*, 2016, 110: 288–296.
- [34] ROUX J L, PLEWA M J, WAGNER E D, *et al.* Chloramination of wastewater effluent: toxicity and formation of disinfection byproducts [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 58(8): 135–145.
- [35] BARBER L B, HLADIK M L, VAJDA A M, *et al.* Impact of wastewater infrastructure upgrades on the urban water cycle: reduction in halogenated reaction byproducts following conversion from chlorine gas to ultraviolet light disinfection [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 529: 264–274.
- [36] PARVEEN N, CHOWDHURY S, GOEL S. Environmental impacts of the widespread use of chlorine-based disinfectants during the COVID-19 pandemic [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 2: 1–19.

作者简介:刘智晓(1972–),男,山东莒县人,工学博士,教授级高工,北京首创生态环保集团技术总工,研究方向为可持续排水系统构建及“网-厂”协同控制技术与策略,极端天气胁迫下韧性污水系统适应性设计及运行控制策略、高效低耗污水处理工艺技术开发与工程化应用。发表论文40余篇,授权专利15项,主持参与完成了超过300座水厂、污水厂的技术方案、技术审核与方案优化,以及项目建设和运营调试。在我国最早开展的侧流活性污泥工艺技术研究 and 工程化应用中,实现10余座侧流发酵S2EBPR低碳污水厂的工程应用。

E-mail:liuzhixiao@163.com

收稿日期:2022-04-19

修回日期:2022-04-28

(编辑:丁彩娟)