

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.008

城镇溢流污染控制技术及其工程应用研究

于金旗^{1,2,3}, 张鹤清^{1,2,3}, 孙磊^{1,2,3}, 李崑峰⁴, 秦雄恩⁵,
薛松^{1,2}, 张文强^{1,2,3}, 杨童^{1,2,3}

(1. 中建环能科技股份有限公司, 四川 成都 610045; 2. 中国建筑生态环境工程研究中心, 北京 100037; 3. 中建环能<北京>环保有限公司, 北京 100043; 4. 邯郸通用污水处理有限责任公司, 河北 邯郸 056000; 5. 长治黎水水环境治理有限公司, 山西 长治 046000)

摘要: 本研究通过综合分析城镇溢流污染控制技术,提出一套涵盖精准截蓄、预处理、快速净化、生化处理和深度处理环节的综合解决方案,并推荐应急快速净化、高品质快速净化和高品质长效运维3种溢流污染控制工艺。实际工程应用结果表明,应急快速净化工艺能有效去除SS、TP和COD,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B排放标准;高品质快速净化和高品质长效运维工艺对TP、COD和 NH_4^+-N 的去除效果较好,出水水质分别达到GB 18918—2002一级A排放标准和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅳ类标准(TN除外)。此外,装备/装配式污水处理厂在控制溢流污染方面具有显著优势,其占地面积、建设周期、电耗、投资和运行成本均显著低于传统污水处理厂,且能在雨季和旱季长效稳定运维。

关键词: 溢流污染控制; 雨水资源化; 装配式水厂; 快速净化; 长效运维

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0055-08

Research on Urban Overflow Pollution Control Technologies and Their Engineering Application

Yu Jinqi^{1,2,3}, Zhang Heqing^{1,2,3}, Sun Lei^{1,2,3}, Li Weifeng⁴, Qin Xiong'en⁵,
Xue Song^{1,2}, Zhang Wenqiang^{1,2,3}, Yang Tong^{1,2,3}

(1. CSCEC SCIMEE Sci. & Tech. Co. Ltd., Chengdu 610045, China; 2. CSCEC Eco-Engineering Research Center, Beijing 100037, China; 3. CSCEC SCIMEE <Beijing> Environmental Protection Co. Ltd., Beijing 100043, China; 4. Handan General Sewage Treatment Co. Ltd., Handan 056000, China; 5. Changzhi Lishui Water Environmental Management Co. Ltd., Changzhi 046000, China)

Abstract: This study conducted a comprehensive analysis of urban overflow pollution control technologies and proposed a set of comprehensive solutions encompassing five links: precise storage, pre-treatment, rapid purification, biochemical treatment, and advanced treatment. In this paper, we recommend three kinds of overflow pollution control processes: emergency rapid purification, high-quality rapid purification, and long-term high-quality operation and maintenance. The practical engineering

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-166); 中国建筑股份有限公司科技研发计划项目(CSCEC-2021-Z-52、CSCEC-2024-Z-38)

通信作者: 于金旗 E-mail: 0930yjq@163.com; 张鹤清 E-mail: zhq@scimee.com

application results indicated that the emergency rapid purification process could effectively remove SS, TP, and COD, effluent quality thereby complies with the first level B discharge standard specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant*(GB 18918-2002). For high-quality rapid purification and the high-quality long-term operation and maintenance processes exhibited excellent removal performance for TP, COD, and NH_4^+-N , and the effluent water quality met the first level A discharge standard of GB 18918-2002 and the quasi-IV surface water quality standard (excluding TN) specified in the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), respectively. Additionally, equipped/prefabricated sewage treatment plants demonstrated significant advantages in controlling overflow pollution. Their area, construction period, electricity consumption, investment, and operating costs were significantly lower than those of traditional sewage treatment plants. They could also operated and maintained stably in both rainy and dry seasons.

Keywords: overflow pollution control; rainwater resources; prefabricated water plant; rapid purification; long-term operation and maintenance

河湖水环境污染问题,尤其是降雨引起的溢流污染,已成为公众和学术界日益关注的焦点。这种污染的根源在于溢流污水,包括合流制溢流(CSO)污水、雨水径流,以及污水处理厂处理能力不足等导致的外排污水。与常规的生活污水和工业废水相比,降雨引起的溢流污水具有的特点是:由生活污水、地表径流以及管道沉积物混合而成,含有较高浓度的SS和COD,并且表现出间歇性、瞬时性和水质水量的大幅波动性。这些特征对城镇排水系统构成了强烈的短时冲击,对净化设施的快速启动、短时处理效果、抗冲击能力,以及雨季、旱季的运维管理提出了严格的要求。在“双碳”目标背景下,加强雨水资源化利用不仅能有效控制溢流污染,还能显著降低城镇水务系统的碳排放量,从而在环境保护和气候变化应对方面发挥双重作用^[1]。

在全球范围内,较多国家已经制定并实施了一系列政策以应对溢流污染问题。例如,美国实施了大规模的城镇排水系统改造,旨在减少雨水径流的影响,并推广绿色基础设施以降低雨水径流污染。德国则积极采用屋面雨水收集、雨水截污与渗透以及生态小区雨水利用技术,特别重视调蓄设施的建设与应用,成为全球雨水与合流制调蓄设施分布最密集的国家之一^[2]。日本提出了“雨水抑制型下水道”策略,并于2001年启动了CSO控制技术创新项目^[3],2002年明确了CSO污染物负荷削减、溢流频率与体积和漂浮物控制的目标^[4]。我国也出台了多项政策以推进、规范和指导溢流污染控制技术的实

施,2022年发布的《深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》(建城[2022]29号)强调精准截蓄和快速净化技术及设施的重要性,2023年发布的《关于进一步加强水资源节约集约利用的意见》(发改环资[2023]1193号)进一步强调雨水等非常规水源的利用。鉴于溢流污染控制的全球性和对我国环境治理的重要性,本研究系统梳理了城镇溢流污染控制技术,并针对精准截蓄、物化快速净化与生物处理相结合的技术工艺,开展了基于实际工程的应用研究。

1 城镇溢流污染控制技术分析

当前,我国在溢流污染控制与城镇河湖水生态安全保障方面存在一定程度的脱节。溢流污染控制措施与河湖水体(受纳水体)生态管理之间的联系尚不够紧密,导致在设定溢流污染控制目标时缺乏科学依据,进而影响控制技术的选择和方案的优化设计。为解决该问题,应综合考虑河湖排口溢流污染特性、回用水水质需求以及管网排放压力等因素,进行控制方式和措施的协同与耦合优化。通过该方法,可以制定不同设施控制贡献比的系统优化方案,为城镇河湖排口溢流污水控制技术与工艺的选择提供参考。

1.1 雨水径流污染控制方法

目前,我国在雨水径流污染控制领域已基本形成覆盖源头、过程和系统等关键径流过程的控制方法^[5],具体方法见图1。这些方法控制方式多样,如“源头+过程”方式(即绿色与灰色基础设施的耦合

措施)、“过程+末端调蓄”方式(即灰色工程措施)以及“源头+过程+末端调蓄”的系统化控制方式。随着监测预报、城市水文和水力模型以及实时控制技术的不断成熟,溢流污染控制系统正逐步向实时控制和模型优化预测方向发展^[6]。目前,基于源头及过程的绿色和灰色措施相结合方式已得到广泛应用^[7],相较之下,现有雨水末端处理体系多数仅配套径流调蓄池,降雨结束后将池内积存的污染径流泵送至城镇污水处理厂(站)统一处理,针对降雨期间径流污染的原位快速净化设施仍缺乏足够重视与规模化应用。

2024年3月,住房和城乡建设部等五部委联合发布《关于加强城市生活污水管网建设和运行维护的通知》(建城[2024]18号),鼓励在完成管网改造的基础上,建设“雨季溢流污水快速净化设施,并结合本地实际情况明确管控要求”。该文件是国家层面首次提出建设雨季溢流污水快速净化设施的相关要求,标志着快速净化技术开始受到行业重视。目前,针对雨水径流污染特点开发的快速净化技术及设施有日本的高速纤维过滤器、德国的高速旋流沉砂技术,以及我国的固液快速分离、磁盘分离快速净化技术等,这些技术已成为业界关注的焦点。

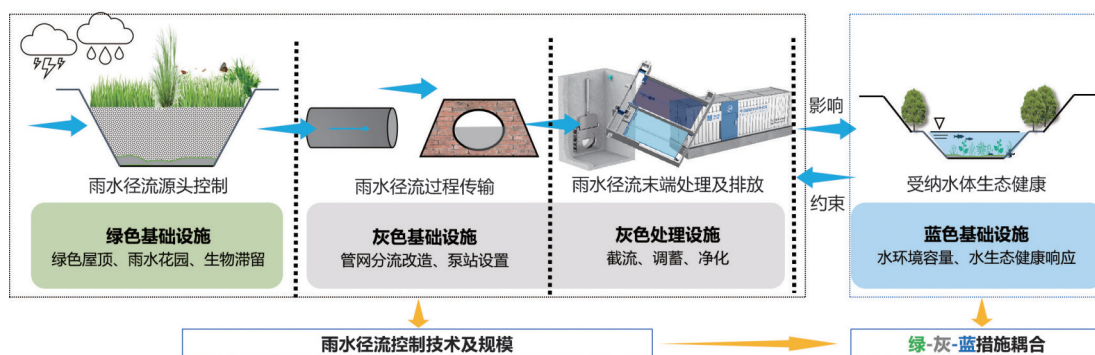


图1 雨水径流污染系统控制方法

1.2 管网末端溢流污染控制技术

在合流制排水系统中,超负荷雨(污)水溢流会污染水体,而我国合流制排水管渠数量众多、建设情况复杂、运行问题频发,已成为制约城市水环境质量提升的关键因素^[8]。在分流制排水系统中,初期雨水径流和管道积泥亦会加剧污染,影响城市水质。因此,针对合流制和分流制排水系统中存在的短期内难以彻底解决的问题,本研究提出首先需要对溢流污染进行科学有效的截流和调蓄,然后对截蓄的溢流污水进行适当处理,以控制径流污染物的入河(湖)量。在多种排水体制并存、污水处理厂处理能力有限的背景下,传统固定截流雨水调蓄系统已不再适应实际需求,基于在线监测和智能控制的精准截流调蓄技术,可提高系统灵活性和实施性,故成为行业的发展趋势。

针对排水系统存在的问题,目前行业内已形成一系列末端溢流污染控制工艺,包括预处理、生物处理^[9]、膜分离^[10]、绿色设施^[11]、快速净化^[12]和深度处理技术等,其中生物处理主要采用具有良好抗冲击能力的生物膜技术,如移动床生物膜反应器

(MBBR)、浸没式膜生物反应器(SMBR)、曝气生物滤池(BAF)和反硝化生物滤池等。针对降雨径流污染的快速净化需求,物理化学快速净化技术因具有启动快、停留时间短、间歇运行和简便维护等优势,且能有效减少入河污染物,成为国际关注重点。研究显示,在雨水径流中,超过50%的有机污染物附着在SS上^[3],因此行业趋向于发展以去除SS为核心的具备大流量处理和快速启停能力的快速净化工艺^[12]。我国已开发多种高效物化快速净化技术,如高效旋流分离^[13]、格栅、固液秒分离、高速纤维过滤和磁盘分离^[14]等。固液秒分离技术能在5s内迅速分离雨污水中的漂浮物、渣砂、毛发、固态油脂等,有效防止溢流污水停留带来的臭味逸散^[15];高速纤维过滤技术采用高分子纤维滤料作为过滤介质,对TP、SS、COD的去除率分别在50%、70%、60%以上^[16];磁盘分离快速净化技术可在4~6min内去除雨(污)水中大部分TP、SS和COD(去除率分别在70%、80%、50%以上)^[17],且可结合水生态修复系统一起使用,以进一步提升水生态修复效果^[18]。

1.3 城镇溢流污染控制技术方案构建

在探讨城镇排水系统效能提升、内涝防治以及溢流污染控制的过程中,本研究提出了一种综合的工艺流程。该流程依据不同的截流、调蓄、控制技术特点,结合行业需求,将工艺流程归纳为5个关键步骤,即:精准截蓄、预处理、快速净化、生物处理以及深度处理。根据排放需求和回用目的,该流程可

灵活地采用多种处理工艺组合,具体如图2所示。总体而言,该工艺流程可细分为3种主流工艺:一是“精准截蓄+预处理+快速净化”工艺,简称“应急快速净化”;二是“精准截蓄+预处理+快速净化+生物处理”工艺,简称“高品质快速净化”;三是“精准截蓄+预处理+生物处理+深度处理”工艺,简称“高品质长效运维”。

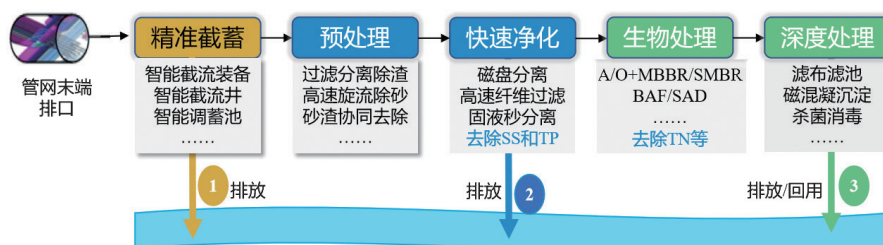


图2 管网末端溢流污染控制工艺流程

① 精准截蓄

城镇溢流污水的管理策略首先涉及将污水通过雨水管或雨污混合管引导至智能截流设施。该设施宜集成智能闸门、堰门以及在线水质水量监测系统,能够基于水位、雨量、水质和时间等关键指标进行监测和反馈,进而实现对闸门和堰门开度及流量的精确控制,实现清污分流。

具体而言,通过在线监测仪表对COD和(或)SS浓度进行实时监测与反馈,当监测到的COD和(或)SS浓度超过预设值时,仅允许雨污水流向精准调蓄设施的堰门开启,而其他流向的闸门及堰门将关闭,以便将高污染污水暂时储存于调蓄池中,这种情况通常发生在污染物浓度较高的降雨初期或溢流污染较为严重时。相反,当COD和(或)SS浓度低于预设值时,仅允许雨污水流向后端预处理设施的闸门开启,而其他堰门及闸门将关闭,溢流污水进入后续的除砂设施进行处理,这种情况一般发生在污染物浓度较低的降雨中后期。当SS降至30 mg/L或设计值时,仅允许通往受纳水体的溢流堰门开启,而其他堰门及闸门将关闭,清洁的雨水直接补给受纳水体,这通常发生在降雨末期。在遭遇超出设计降雨标准的特大暴雨时,应该优先考虑防洪排涝,启动直接排放模式,此时雨水径流中的污染物浓度相对较低,可通过快速净化处理后直接排入河流。

② 快速净化

降雨期间或降雨后调蓄池内的雨污水首先通

过高效旋流除砂设施,以有效去除大部分粗砂和细砂;随后,处理后的水流进入精细格栅等除渣设施,进一步去除毛发、纤维物等大颗粒SS;接着,雨污水进入具备旱季停机或低成本运维、雨天快速启停功能的快速净化设施,该设施的设计旨在快速去除大部分SS,同时降低运行成本;在降雨中后期,当污染物浓度较低时,经过快速净化处理的雨污水可直接排放或回用。该技术路线不仅能够应对降雨期间的水质波动,还能够在成本和效率之间取得平衡,适用于城市排水系统在面对降雨溢流污染时的应急响应。

③ 高品质快速净化

在旱季污水处理厂处理能力不足导致溢流污水的情况下,为确保污水处理运维效果,在快速净化工艺基础上,进一步引入快速生化处理单元,以实现更深层次的水质净化。具体而言,经过快速净化处理后的溢流污水首先通过BAF去除 NH_4^+-N 、COD等污染物;随后,处理水进入自养反硝化生物滤池,进一步去除TN等;最终,污水经过滤池或杀菌消毒等深度处理后补给受纳水体。该处理工艺出水水质可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,适用于我国南方地区进水污染物浓度较低或排入受纳水体水质要求较低的场景。

④ 高品质长效运维

在水质要求严格或需回用的排水口场景中,推荐采用缺氧/好氧(A/O)结合MBBR或SMBR等高效

生化处理技术,以增强脱氮效果并提升溢流污水处理效率。进一步地,通过在深度处理阶段集成滤布滤池或磁混凝沉淀技术,有效去除磷和浊度,确保出水水质满足 GB 18918—2002 的一级 A 标准,甚至达到更严格的《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。该工艺适用于污染物浓度高、排放水质要求严的地区,可为实现高标准水质提供技术保障。

2 城镇溢流污染控制工程应用研究

本研究重点是评估应急快速净化、高品质快速净化以及高品质长效运维 3 种工艺在雨季和旱季两种运维模式下对城镇溢流污染的控制效果,并对这 3 种工艺进行经济技术指标的综合分析。所有分析项目在采样期间的处理量均达到或超过工程设计值,且累计采样时间跨度为 1 年,以确保数据的代表性和研究结果的可靠性。

2.1 应急快速净化工艺

选取武汉(2 000 m³/d)、福州(5 万 m³/d)和金华(2 万 m³/d)的 3 个溢流污染控制项目为研究对象。这些项目都采用了模块化和装配式设计,且在 30 d 内完成建设,能够满足不同地区不同排污口在降雨期间的污染应急控制需求。目前,3 个项目均已连续稳定运行 2 年以上,主要处理对象为溢流污水。在污水处理工艺方面,3 个项目均采用集成化的处理技术,包括精准截蓄(截流)、预处理(格栅)以及快速净化(磁盘分离)工艺,以实现溢流污染的有效控制和管理。

根据 3 个项目的平均进、出水水质(见表 1),可观察到应急快速净化工艺在去除 SS、TP 和 COD 方面均表现出显著效果。具体而言,该工艺对 SS、TP 和 COD 的去除率分别达到 83.1%、84.1% 和 50.4% 以上,且处理后的出水水质均满足 GB 18918—2002 中的一级 B 标准。在运维管理方面,武汉和福州项目仅在雨季运行,快速净化装备具备一键启停功能,可适应季节性的变化需求。相比之下,金华项目则全年连续运行,不仅在雨季处理溢流雨污混合水,而且在旱季处理附近污水处理厂因处理能力不足而溢流的部分生活污水。通过分析金华项目全年的运行数据可知,该工艺出水水质始终保持稳定,符合排放标准,这表明应急快速净化工艺具备雨季和旱季均能稳定运维的能力,为城镇溢流污染控制提供了一种有效的技术方案。

表 1 溢流污水应急快速净化项目平均进、出水水质

项目		SS	TP	COD
武汉某溢流污染控制项目 (旱季停机、雨季开机)	进水/(mg/L)	236	1.83	121
	出水/(mg/L)	13	0.11	60
	去除率/%	94.5	94.0	50.4
福州某溢流污染控制项目 (旱季停机、雨季开机)	进水/(mg/L)	81	2.07	102
	出水/(mg/L)	9	0.33	32
	去除率/%	88.9	84.1	68.6
金华某溢流污染控制项目 (旱季、雨季均运行)	进水/(mg/L)	59	2.97	102
	出水/(mg/L)	10	0.17	26
	去除率/%	83.1	94.3	74.5

物化处理技术如磁盘分离,已被证实能有效且迅速地去除城镇溢流污水中的大量 SS,但对于 COD 和 NH₄⁺-N 等溶解性污染物的去除效果有限^[18]。生物处理技术被认为是去除溶解性污染物的经济可行方法,但在降雨季节,瞬时大流量的雨污水可能对生化系统造成冲击,导致处理效果下降,且系统恢复缓慢。

鉴于 SS 是溢流污水中氮和磷污染物的主要载体,控制 SS 的排放可以有效减少污染负荷^[19],因此,在降雨应急响应阶段可以适度降低 COD 和 NH₄⁺-N 的要求,转而采用集成化的应急快速净化工艺,包括精准截蓄(智能截流、调蓄设施)、预处理(旋流分离、精细格栅等)以及快速净化(磁盘分离、固液秒分离和高速纤维过滤等)。这种工艺组合可快速去除 SS、TP 及附着于 SS 上的 COD,有效减少排入水体的污染物总量。研究^[20]表明,磁混凝快速净化工艺对 SS 的去除效果显著,同时对溶解性有机质(DOM),尤其是芳香性和高腐殖化有机物也有一定去除作用,其机理主要是无机混凝剂水解产物的吸附和螯合。作为物化处理方法,该工艺截留的物质即为去除的物质,主要包括 SS 和部分 DOM,可在降雨期间有效控制溢流污染,保护水环境质量。

2.2 高品质快速净化工艺

随着城市化进程的加速,城镇污水排放量呈现持续增长的趋势。在某些地区,现有污水处理厂的设计规模已无法满足日益增长的污水处理需求,尤其是雨季污水量的急剧增加导致溢流污染问题严重。针对这一挑战,占地面积小、建设周期短、处理能力大且能快速净化的装配式污水处理厂提供了一种有效的解决方案。装配式污水处理厂采用模块化和标准化的预制结构,能够在工厂内预制并在

施工现场快速组装,具有建设快速、成本低、占地面积小和自动化程度高等优势^[21]。降雨期间,装配式污水处理厂能够利用其快速净化装备迅速有效地减少溢流污染;而在非降雨期间,则通过其生化处理单元持续有效地处理因现有污水处理能力不足而产生的溢流生活污水,从而实现对城镇污水的长效管理和控制。

选取武汉黄孝河(6万 m³/d)和机场河(5万 m³/d)的两个高品质溢流污染控制项目为研究对象。这两个项目均采用集成化的高品质快速净化工艺,包括精准截蓄(截流)、预处理(格栅)、快速净化(磁盘分离)以及BAF,并采用装配式污水处理厂的建设方式,建设周期为3个月,现已连续稳定运行3年以上;项目处理对象主要为溢流污染,涵盖雨季的溢流雨污混合水和旱季的溢流生活污水。在运维管理方面,本研究详细考察了两种不同的工况:在旱季或雨季溢流污染较为严重的情况下,全部生活污水或雨污混合水经过完整工艺处理后排放至受纳水体;在水量超出设计负荷或遭遇超出设计降雨标准的特大暴雨事件时,污水处理厂启动快速净化模式,超出设计负荷的污水将超越BAF工艺处理单元,仅通过磁盘分离装备进行快速净化处理后直接排放至河流。通过这种灵活的运维策略,污水处理厂能够在不同条件下实现对溢流污染的有效控制。

根据上述2个项目的进、出水水质数据(见表2),高品质快速净化工艺在削减SS和溶解性污染物方面表现突出。

表2 溢流污水高品质快速净化项目平均进、出水水质

项目	SS	TP	COD	NH ₄ ⁺ -N
武汉黄孝河某溢流污染控制项目(旱季、雨季均运行)	进水/(mg/L)	22	1.62	94
	出水/(mg/L)	11	0.21	27
	去除率/%	50.0	87.0	71.3
武汉机场河某溢流污染控制项目(旱季、雨季均运行)	进水/(mg/L)	57	2.13	113
	出水/(mg/L)	13	0.12	24
	去除率/%	77.2	94.4	78.8

由表2可以看出,该工艺对TP、COD和NH₄⁺-N的去除率分别达到87.0%、71.3%和83.1%以上,出水水质指标均优于GB 18918—2002的一级A标准,以及GB 3838—2002中的V类标准。进一步地,通过分析武汉黄孝河项目全年的运行数据,尽管在某些时段进水水质受到降雨影响而出现偏高现象,但出水COD和TP浓度均低于地表水Ⅳ类标准限

值。这表明,无论在旱季还是雨季,该工艺均能保持连续稳定的运维性能,确保出水水质满足严格的环境标准。这些结果验证了该工艺在实际应用中的高效性和适应性,为溢流污染控制提供了一种有效的技术选择。

2.3 高品质长效运维工艺

选取厦门(1万 m³/d)和成都(2.5万 m³/d)的两个高品质应急扩容项目作为研究对象。这两个项目均采用集成化的高品质长效运维工艺,包括精准截蓄(截流)、预处理(格栅)、生化处理(A/O+MBBR)以及深度处理(磁混凝沉淀)。两个项目均采用装配式污水处理厂设计,建设周期缩短至3个月,并已连续运行3年以上;处理对象为溢流污水,包括雨季的溢流雨污混合水和旱季的溢流生活污水。在市政污水处理过程中,MBBR+磁混凝沉淀工艺对SS的去除效果显著,通常可使出水SS<10 mg/L^[22]。在实际项目中,由于该工艺的高效性,往往不对出水SS进行常规检测。

由上述2个项目的实际进、出水水质数据(见表3)可知,该工艺对溶解性污染物的削减效果较好。具体而言,该工艺对TP、COD、NH₄⁺-N和TN的去除率分别达到95.2%、84.4%、97.5%和72.5%以上,出水水质满足GB 18918—2002一级A排放标准,以及GB 3838—2002准Ⅳ类水标准(TN除外)。进一步分析厦门项目全年的运行数据可知,尽管进水水质在某些时段受到降雨影响而出现偏高现象,但出水TP、COD和NH₄⁺-N浓度均低于地表水Ⅳ类标准限值,显示出该工艺在实际应用中的高效性和稳定性。

表3 溢流污水高品质长效运维项目进、出水水质

项目	TP	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN
厦门某高品质应急扩容项目(旱季、雨季均运行)	进水/(mg/L)	5.22	167	14.61
	出水/(mg/L)	0.25	26	0.36
	去除率/%	95.2	84.4	97.5
成都某高品质应急扩容项目(旱季、雨季均运行)	进水/(mg/L)	3.59	162	37.52
	出水/(mg/L)	0.12	21	0.14
	去除率/%	96.7	87.0	99.6

2.4 技术、经济分析

本研究对比分析了应急快速净化、高品质快速净化和高品质长效运维3种工艺在溢流污染控制项目中的技术与经济参数,具体见表4。研究发现,随着处理工艺复杂度的提升,项目的占地面积、建设

周期、水力停留时间、运行成本和单位投资等指标均呈递增趋势。应急快速净化工艺以其快速净化能力(最快仅为6 min)、极小的占地面积[最小可达 $0.01 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{d})$]和最短的建设周期(最快15 d)而著称,适用于空间受限、排放标准较低且需要快速应急处理的场合。尽管如此,该工艺存在旱季低水量

运维和“大马拉小车”现象,运行能耗相对较高。相比之下,高品质快速净化和高品质长效运维工艺更适用于处理排放标准较严格的雨季和旱季溢流污染,其污水量大且相对均衡,与常规污水处理厂运维规律相似,即处理量越大,运行能耗和成本相对越低。

表4 3种工艺的技术、经济参数对比分析

控制技术	具体工艺	占地面积/ [$\text{m}^2/(\text{m}^3/\text{d})$]	建设周期/ d	水力停留 时间/h	电耗/ ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$)	单位投资/ (元/ m^3)	运行成本/ (元/ m^3)
应急快速净化	预处理+磁盘分离	0.01~0.02	15~30	0.1~0.2	0.2~0.4	300~800	0.2~0.4
高品质快速净化	预处理+磁盘分离+BAF	0.10~0.20	60~120	0.7~1.3	0.2~0.4	500~1 000	0.3~0.5
高品质长效运维	预处理+A/O+(MBBR)+磁混凝沉淀	0.20~0.40	90~120	14.0~18.0	0.2~0.4	2 000~4 000	0.5~1.0

另外,由于采用装配式污水处理厂的建设理念,3种工艺的技术和经济参数均低于我国城镇污水处理厂的平均值或中位值。例如,高品质长效运维工艺最为复杂,其占地面积、建设周期、电耗、投资和运行成本分别为传统污水处理厂的13%~27%、17%~22%、42%~85%、38%~76%和36%~72%[根据《城市污水处理工程项目建设标准》(建标198—2022)相关要求,规模在5万 m^3/d 以下的污水处理厂,二级处理用地指标不应超过 $1.5 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{d})$,建设周期不应超过18个月;此外,我国城镇污水处理厂电耗平均值、投资中位值和运行成本分别为 $0.48 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ^[23]、 $5\,288 \text{ 元}/\text{m}^3$ ^[22]和 $1.39 \text{ 元}/\text{m}^3$ ^[24]]。因此,无论从技术还是经济上分析,3种处理工艺均适用于城镇溢流污染的处理。

3 结论

① 本研究通过综合分析不同溢流污染控制策略和措施,构建了一种综合解决方案,实现了不同技术的协同与耦合优化。该方案涵盖精准截蓄、预处理、快速净化、生物处理、深度处理系统,可根据不同设施的贡献比例,为排口溢流污染的末端控制技术与工艺选择提供参考。

② 在溢流污染控制工艺中,应急快速净化工艺各项出水水质指标均满足GB 18918—2002一级B排放标准。该工艺具有占地少、响应快的特点,适合于场地空间受限、降雨污染需要快速应急响应以及排放标准要求相对不严格的溢流污染控制场景。高品质快速净化工艺出水水质满足GB 18918—2002的一级A排放标准和GB 3838—2002的Ⅴ类标准,可广泛应用于TN排放标准不严格的旱季、雨季溢流污染控制场景。而高品质长效运维工艺出水

水质指标则满足GB 3838—2002准Ⅳ类标准(TN除外),适用于污水排放标准严格的旱季、雨季溢流污染控制场景,能有效保障水环境质量。

③ 装备/装配式污水处理厂在控制溢流污染方面展现出显著优势,其占地面积降至 $0.4 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{d})$ 以下,建设周期大幅缩短至4个月以内。此外,装备/装配式污水处理厂在电耗、投资及运行成本方面均显著低于传统设施,在城镇雨水管理中具有较高的应用价值和推广潜力。

参考文献:

- [1] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022: 96-102.
- [2] 杨正,赵杨,车伍,等. 典型发达国家合流制溢流控制的分析与比较[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 29-36.
- [3] 马珍,韩梦琪. 管道溢流的污染特征及水质管控技术与策略[J]. 给水排水, 2022, 48(9): 147-156.
- [4] Wang T, Zhang Y H, Li H Z, et al. Policies on combined sewer overflows pollution control: a global perspective to inspire China and less developed countries [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2024, 54(14): 1050-1069.
- [5] 夏军,贾海峰,张翔,等. 长江中下游城市内涝与雨季污染协同治理对策[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 1-5.
- [6] 李俊奇,李小静,王文亮,等. 合流制溢流污染的影响及其控制技术发展[J]. 给水排水, 2024, 50(4): 46-53.
- [7] 章林伟. 中国海绵城市的定位、概念与策略:回顾与解读国办发〔2015〕75号文件[J]. 给水排水, 2021, 47

- (10):1-8.
- [8] 唐磊,刘广奇,程小文,等.海绵城市背景下合流制改造及溢流污染控制路径研究[J].给水排水,2024,50(4):54-61.
- [9] Jiang L M, Zhang Z J, Li Y H, et al. Under-loaded operation of an anaerobic-anoxic-aerobic system in dry and wet weather dynamics to prevent overflow pollution: impacts on process performance and microbial community [J]. *Bioresource Technology*,2023,376:128837.
- [10] Du X, Xu J J, Mo Z Y, et al. The performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration for roofing rainwater reuse: implications of roofing rainwater energy and rainwater purification [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134187.
- [11] 马春麟,李军,刘阳,等.基于过滤沉淀法的屋面与路面雨水径流污染控制技术及其在北京某城中村的应用[J].环境工程学报,2022,16(12):4168-4176.
- [12] 张维,孙永利,李家驹,等.合流制溢流污染快速净化处理技术进展与思考[J].给水排水,2022,48(9):157-164.
- [13] 刘楠楠,迟杰,褚一威,等.高效旋流分离-生态砾间接触氧化联合装置处理初期雨水径流应用研究[J].环境污染与防治,2019,41(9):1043-1049.
- [14] 张勤,王哲晓,李灿.超磁分离水体净化技术在黑臭水体治理中的应用案例[J].环境工程学报,2021,15(9):3128-3135.
- [15] 王凡,潘钧,刘丹妮,等.贵阳市七彩湖黑臭水体治理案例分析[J].环境工程技术学报,2020,10(5):726-732.
- [16] 杨昌达,葛乐乐,王知兵,等.高速纤维过滤技术在雨水径流污染治理中的实验探究[J].黑龙江生态工程职业学院学报,2024,37(22):11-15.
- [17] 张鹤清,吴振军,吕志国,等.絮凝快速分离水处理技术简介及发展趋势[J].环境工程,2018,36(7):56-61.
- [18] 于金旗,张鹤清,孙磊,等.超磁-水下森林耦合工艺在景观水体修复中的应用[J].给水排水,2022,48(3):62-67.
- [19] 赫恬,薛重华,孙家荣,等.城市雨水径流颗粒物中氮磷赋存特征及其影响因子研究进展[J].环境工程,2024,42(8):61-71.
- [20] 康赛,李清雪,吴振军,等.磁混凝去除黑臭水体的污染物特征与机理研究[J].水处理技术,2021,47(10):24-28.
- [21] 周家中,韩文杰,吴迪,等.MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J].中国给水排水,2023,39(12):1-11.
- [22] 沈浩,杨忠启,汪凡,等.MBBR+磁混凝沉淀工艺用于用地受限污水厂改造[J].中国给水排水,2023,39(8):112-119.
- [23] 胡洪营.中国城镇污水处理与再生利用发展报告(1978—2020)[M].北京:中国建筑工业出版社,2021:32,63-66.
- [24] 高月明,王建童,张伟,等.污水处理厂减污降碳协同绩效评价[J].环境科学,2025,46(9):5587-5594.
- 作者简介:**于金旗(1988—),男,山东高密人,硕士,高级工程师,注册环保工程师,长期从事污水资源化、溢流污染控制及高盐废水零排放相关工作,北京市大兴区优秀青年人才,荣获中国城镇供水排水协会科学技术特等奖、中国施工企业管理协会工程建设科学技术进步一等奖。
- E-mail:**0930yjq@163.com
- 收稿日期:**2024-11-17
- 修回日期:**2025-01-14

(编辑:丁彩娟)

珍惜水,爱护水,以水促和平