

城镇合流制排水溢流污染综合控制研究进展

石 勇¹, 陈 铭²

(1. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410000; 2. 上海市市政工程设计有限公司, 上海市 200438)

摘 要: 合流制溢流污染是当前全球关注的环境问题, 严重制约了城镇水环境的持续改善与生态健康。梳理合流制溢流污染特征、影响机理与管控技术, 对寻求科学有效的治理路径具有重要意义。通过系统综述, 解析了溢流污染在水质特征方面的多元性及其影响机制。回顾了国内外溢流污染管控体系的发展历程, 详细剖析了源头调控、管网系统优化以及末端处理等关键技术的应用。研究提出, 未来治理需要突破传统模式, 构建涵盖排放标准、效能评估与风险管控的精细化体系。同时, 推动数字化平台建设, 构建“源-网-厂-河”智能感知系统, 有助于实现动态预警与设施精准调度。该研究整合了理论框架与技术路径, 可为实现合流制溢流污染的综合治理提供理论依据和技术支撑。

关键词: 合流制排水系统; 溢流污染; 控制技术; 水污染控制; 智慧管控

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0001-04

Research Progress on Comprehensive Control of Urban Combined Sewer Overflow Pollution

SHI Yong¹, CHEN Ming²

(1. China Machinery International Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China; 2. Shanghai

Municipal Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: The pollution caused by combined sewer overflow is an environmental issue of global concern at present, which seriously restricts the continuous improvement of urban water environment and ecological health. Sorting out its pollution characteristics, impact mechanisms and control technologies is of great significance for seeking scientific and effective governance paths. By systematically reviewing, the diversity and impact mechanisms of overflow pollution on water quality characteristics are analyzed. The development process of domestic and international overflow pollution control systems is reviewed. And the application of key technologies such as source control, pipe network system optimization, and end treatment is analyzed in detail. The study result shows that in the future, governance needs to break through traditional models and build a refined system that covers discharge standards, efficiency evaluation and risk management. At the same time, the construction of digital platforms is promoted and an intelligent perception system of "source - network - factory - river" is built, which helps to achieve dynamic early warning and precise facility scheduling, and integrates theoretical framework and technical path, providing theoretical basis and technical support for the comprehensive treatment of combined sewer overflow pollution.

Keywords: combined sewer system; overflow pollution; control methods; water pollution control; intelligent control

0 引 言

随着我国城市化进程的持续推进, 城镇排水系统作为维系水环境健康与公共安全的关键基础设

施, 其运行效能及环境风险日益受到重视。合流制排水系统作为特定历史条件下形成的排水体制, 至今仍在众多老旧城区广泛存在, 其溢流污染已成为制约城市水环境质量持续改善的突出问题^[1]。溢流污水含有高浓度有机物、悬浮固体及营养盐等, 易对受纳水造成瞬时负荷, 也是导致城市黑臭水体频发的重要诱因^[2]。

合流制溢流污染问题通常具有复杂性、系统性及动态性的特征, 生成机理往往涉及“源-网-厂-河”多环节的交互作用。从源头污染物累积与降雨径流冲刷, 到管网系统中的水力传输、沉积等过程,

收稿日期: 2026-04-12

基金项目: 中机国际工程设计研究院有限责任公司科研项目 (CX-A-2022-0018)

作者简介: 石勇(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事污水处理与再生利用、黑臭水体治理等工作。

通信作者: 陈铭(1993—), 男, 硕士, 工程师, 注册公用设备工程师(给排水), 从事给排水设计工作。电子信箱: chenming2@smedi.com

再到末端截流、调蓄及处理设施的处理能力匹配,最终表现为受纳水体的水质响应与生态风险^[3]。近年来,国内外在溢流污染及其综合控制的各层面研究与实践均取得一定进展,相关领域文献数量总体呈上升趋势(见图1)。然而,综合控制策略在设计实施过程中仍面临诸多挑战,包括不同控制措施的协同优化、全过程治理完善等方面,仍需要通过制度管理的持续改进、科学研究的深入以及技术创新的推动来应对。

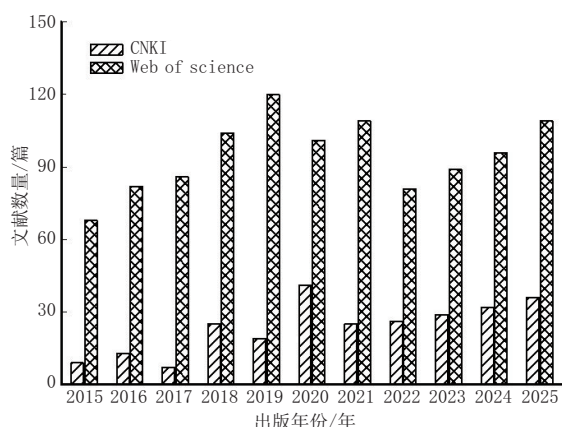


图1 溢流污染相关文献数量变化(检索关键词:合流制溢流)

本文系统梳理了城镇合流制排水系统溢流污染综合控制的研究进展,分析了其污染特征、环境影响及面临的主要挑战;对国内外相关的控制理念、关键技术、管理策略与发展趋势进行了系统性综述与展望,以明确未来研究方向,从而为提升城镇水生态环境质量提供参考。

1 合流制溢流污染的特征与影响

1.1 合流制溢流污染的多元特征

合流制溢流污染主要源于多因素的耦合作用,包括降雨与系统截留能力的动态失衡,管道沉积物的次生污染以及管网结构性缺陷引发的渗漏问题等。首先,污染物组成成分复杂且冲击负荷巨大,尽管溢流污染排放废水仅占全年废水排放总量的8%~10%,但其污染物种类及浓度含量高,污染负荷在短时间内可呈数量级增长,冲击受纳水体^[4]。其次,污染排放模式具有典型的间歇性,其发生直接依赖于降雨强度、历时及管网系统的水力条件。这种“晴天蓄存、雨天排放”的模式,使得污染控制与监测预警面临特殊困难^[5]。最后,水质水量具有显著的空间异质性,不同城市的合流制系统范围、管网老化程度以及气候变化等特征差异较大,导致溢流污染水质水量与发生频率存在不确定性,对现有排水系统的

设计与调控构成挑战。

1.2 合流制溢流污染的影响与挑战

据研究报道,合流制溢流污染在常规的水质污染中的负荷贡献率通常可高达50%以上^[6]。当污染发生时,大量悬浮颗粒物和有机物排入受纳水体,导致水环境物理化学性质急剧恶化,水体溶解氧迅速消耗,可能引发水体黑臭。氮、磷等营养盐的瞬时输入则可能引发水华,破坏水生生态系统平衡。据研究报道,在溢流初期,水中携带颗粒态污染物,污染物浓度与浊度线性相关^[7]。溢流污染发生也会导致管道沉积物重构并形成二次污染内源。大量颗粒物及附着污染物会发生沉降,在水温变化、扰动等特定条件下会向上覆水体释放有毒有害物质,成为长期的内源性污染源,极大地增加了安全风险。此外,据报道,溢流污染水体中病原微生物浓度范围可达 $10^4\sim 10^6$ CFU/mL,若直接排入收纳水体,会对生态系统安全和公共健康构成潜在威胁^[8]。

2 国内外合流制溢流污染管控发展历程

2.1 典型发达国家溢流污染管控发展

合流制溢流污染是一种全球性现象,尽管许多发达国家已实施相关改进措施,但其合流制排水系统在排水体制中仍占有较高比例。据报道,美国东北部、五大湖区和太平洋西北部等地的老旧城市曾集中发生过合流制溢流污染事件^[9]。也有研究发现,欧盟4%的地表水曾受到合流制溢流污染影响^[10]。此外,据统计,日本采用合流制排水系统的城市约有195个(1999年),其中东京等城市合流制排水系统比例高达80%以上,每年约有30起合流制溢流污染相关事件发生^[11]。

部分发达国家对溢流污染管控的相关研究已较为成熟,也有丰富的实践经验。

美国《联邦水污染控制法》在1965年首次提出了要控制合流制溢流污染,也率先采取了相关措施,包括新建截污干管、雨污分流改造、增设调蓄设施和污水厂升级改造等^[12]。1972年,《联邦水污染控制法案》将CSO(合流制溢流)纳入点源污染管控排放许可制度,但初期重点仍在污水处理厂改造,对CSO污染重视不足。20世纪80年代,美国环保署(EPA)发布了CSO控制策略,提出了6项基本控制措施以制定CSO的排放许可策略。2000年,《清洁水法》修正案提出9项基础控制措施,要求各地编制CSO长期控制规划,并进行动态优化调整。21世纪以来,美国

EPA(美国国家环境保护局)推广绿色基础设施与灰色设施结合,成为其合流制溢流污染控制的主流方向^[13]。

德国自 20 世纪 80 年代以来便开始重视合流制溢流污染控制,其合流制排水系统主要分布于南部城市。目前德国新建区域均采用分流制排水系统,据数据统计,其合流制管网长度占比已从 71.2%(1990 年)下降至 53.5%(2016 年)。德国水环境治理以 1957 年的《水平衡管理法》为核心构建了严格的法律体系并执行严格标准,并于 1976 年出台《废水征费法》,确立了“污染者付费”的经济管理原则。欧盟于 2000 年颁布的水框架指令明确将合流制溢流污染视为流域治理的重大挑战,要求所有成员国在 2027 年前修复受污染水源^[14]。作为成员国,德国严格执行该指令,每 6 年修订一次水环境管理目标,注重恢复水生态原始状态。德国通过综合治理、系统升级改造及调蓄设施建设等方式,实施对合流制溢流污染的控制。

日本城市合流制排水系统多建于 20 世纪 60 年代前,目前新建城区普遍采用分流制系统。自 20 世纪 80 年代,日本开始重视合流制溢流污染控制,并于 1982 年发布了《合流制溢流对策暂定指南》,对溢流污染控制提出了相应要求(全年旱季溢流生化需氧量负荷削减 95%)^[13]。在 2000 年,东京台场海滨公园发生了严重溢流污染事件,迫使当地政府对溢流污染问题的重视程度再次提升。在 2003 年,日本对《下水道法》修订,将合流制溢流污染控制纳入法律框架,要求所有相关城市制定对策计划,并根据规模差异设定时限。这一系列举措标志着日本合流制溢流污染控制从技术指南走向了法制化与系统化实施阶段^[15]。

2.2 我国合流制溢流污染管控发展

与欧美等发达国家相比,我国在合流制溢流污染方面的研究起步相对较晚。为加大水污染防治力度,保障水环境安全,国务院于 2015 年正式发布《水污染防治行动计划》(“水十条”),明确将黑臭水体治理和排水管网建设等列为重点任务。同年,住房和城乡建设部发布了《城市黑臭水体整治工作指南》,进一步明确了黑臭水体治理的工作目标。然而,目前国家层面尚未出台针对合流制溢流污染控制的专项法规政策,仅在《海绵城市建设技术指南》等部分文件中提及对合流制系统的相关要求。因此,在借鉴发达国家先进理论和技术的基礎上,探索适合国

情的溢流污染控制策略,是未来的重要研究方向之一。

3 合流制溢流污染控制技术

3.1 源头调控技术

溢流污染源头控制旨在从根源上降低溢流事件的发生频率与污染负荷。目前可采用的控制措施以绿色基础设施与低影响开发技术为主,其核心原理是对降雨径流进行渗透、滞蓄、净化与利用。在建筑层面,可推广绿色屋顶与雨水收集系统,以削减径流峰值并延迟产流时间;在市政公用层面,可设置透水铺装、雨水花园与生态植草沟等海绵城市措施,增强城市地层下垫面的渗透与蓄滞能力,并借助植物-土壤-微生物复合系统对径流中污染物进行原位净化。研究表明,区域性绿色基础设施的应用可使雨污合流溢流总量削减 71%^[16]。此外,建设低影响开发设施也可提升调蓄能力,并通过其中物化与生物净化过程削减约 60% 以上的溢流污染物^[17]。源头控制还可以借助侧重于管理与规划手段的非结构性措施,包括强化城镇地表清洁以减少可供冲刷的污染物量,以及实施严格的废弃物管理,防止固体废弃物随径流进入排水口等。源头控制措施具有分布式、生态化与可持续性等优势,不仅能直接减轻管网与末端处理设施的压力,还可带来改善微气候、提升景观等多重协同环境效益。然而,其在老旧城区和高密度建成区的适用空间有限,且长期运行维护效果受管理水平影响显著。因此,未来的研究与实践需要更加注重源头措施与过程、末端措施的协同设计。

3.2 管网系统优化设计

排水管网溢流污染控制要点在于充分发挥“管网-泵站-调蓄”系统在时空维度上的协同调控能力。降水时空分布的不均匀性、污染源排水特征的动态变化、管网汇流时间差异以及泵站、截流与调蓄设施的控制策略等因素的共同作用,促使排水系统在时空维度上具有一定的弹性调控冗余空间。因此,高效利用这一特征,实现污染径流的时空截蓄与调控,已成为提升排水系统溢流污染控制能力的关键路径。

目前,国内溢流污染控制常以末端截流和调蓄等“灰色设施”为主,主要通过合流制管网上设置截流井并配套截流干管,使截留倍数提升至 2~3 倍^[18]。该技术处理效果显著,但工程投资相对较高,在超过设计能力的强降雨期间,溢流仍可能发生。

为此,大规模的调蓄设施包括地下调蓄池、深层隧道调蓄系统等成为关键技术补充。调蓄设施能在降雨高峰期暂时储存超量合流污水,待管网负荷下降或污水处理厂能力空闲时,再将其输送至处理厂,从而有效削减溢流频次与排放总量。例如,在苏州河环境整治工程中应用调蓄池,将超出截流量的合流污水或初期雨水暂存,再输送至污水处理系统进行处理,然后排放,对改善合流制排水系统溢流污染具有重要意义^[19]。

3.3 溢流污染生成的直接控制措施

当调蓄空间受限时,针对已超出系统承载力而产生的合流制溢流污染,可根据实际情况选用高效物化处理设施,对溢流污水进行就地快速净化后排放。目前常用技术包括旋流分离技术、高效沉淀技术、超磁分离技术以及高级氧化/消毒技术等,此类设施通常具有占地面积小、处理效率高等特点。

旋流分离技术主要通过拦截与离心沉降作用去除污水中的悬浮物,其对粒径大于200 μm 的粗砂和悬浮物的去除率可达95%,对总悬浮固体(TSS)的去除率可超过30%,可以有效减少溢流污水中的固体污染物,降低化学需氧量和浊度,从而减轻对受纳水体的冲击负荷^[20]。超磁分离技术通过投加特选磁种作为凝核,经反应后通过磁分离进行去除。该技术对SS、COD和总磷等具有较高去除效率且出水水质好,其反应时间较传统工艺可缩短80%以上,通过截流并实现清污分离并将污水暂存于调蓄池。配套超磁分离设备有助于快速削减污染物,从而降低合流制溢流污染风险^[21]。此外,优化污水厂雨季运行模式,投入高效沉淀池等强化处理设施,可显著提升系统处理能力,协同削减溢流污染,进一步巩固其在溢流污染控制体系中的末端屏障作用^[22]。

4 结论与建议

4.1 精细化标准体系构建

目前,合流制溢流污染治理仍缺乏系统性的综合标准。为有效应对这一治理难题,亟需加快建立精细化与弹性化的污染管控框架。建议从城镇生态规划的整体视角出发,统筹制定适应气候变化的系统性排放要求,结合受纳水体环境容量及区域治理能力差异,确立分级、分类的弹性管控指标体系。同时,可探索将基于实时监测与模拟分析的动态排放许可、季节性标准调节等创新机制纳入管控参考体系,以寻求环境效益与治理成本间的最优平衡,从而

为合流制溢流污染的长效治理提供坚实的制度支撑。

4.2 数字化与智能化管控升级

传统溢流污染治理过程在效能、运维及统筹等方面仍面临诸多挑战,尤其在数据实时共享不足、污染变化信息反馈滞后等方面,制约了治理效率的提升。当前,以数字孪生为代表的智慧管理技术已在环境治理领域得到广泛研究与应用,融合数字化与智能化的方法已成为提升城镇合流制排水系统溢流污染精准治理的关键路径。通过构建“源-网-厂-河”一体化智能感知与调控系统,可实现溢流污染风险动态预警、调蓄设施精准调度以及处理资源的高效分配,从而显著增强系统韧性并降低运行成本。结合不同城市特征,因地制宜建立智慧治水体系,将有助于全面提升城镇溢流污染综合整治能力。

参考文献:

- [1] 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,2024,60(4):46-53.
- [2] 徐祖信,徐晋,金伟,等.我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J].给水排水,2019,45(3):1-5.
- [3] 贾楠,王文亮,车伍,等.美国合流制溢流控制标准分析及对我国的启示[J].中国给水排水,2019,35(7):121-127.
- [4] CHEN Y X, SHI X, JIN X, et al. Characteristics of overflow pollution from combined sewer sediment: Formation, contribution and regulation [J]. Chemosphere, 2022, 298: 134254.
- [5] 李思远.合流制管网污水溢流污染特征及其控制技术研究[D].北京:清华大学,2015.
- [6] 徐连军,张善发.上海中心城区泵站放江溢流污染影响因子分析[J].中国给水排水,2010,26(18):42-45.
- [7] YU D, DIAN L, HAI Y, et al. Effect of rainfall characteristics on the sewer sediment, hydrograph, and pollutant discharge of combined sewer overflow[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 303: 114268.
- [8] CHEN J, CAO L, CHENG Y, et al. Efficient disinfection of combined sewer overflows by ultraviolet/peracetic acid through intracellular oxidation with preserving cell integrity[J]. Water Research, 2024, 260: 121959.
- [9] WANG T, ZHANG Y, LI H, 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.
- [10] HAMMOND P, SUTTIE M, LEWIS V T, et al. Detection of untreated sewage discharges to watercourses using machine learning[J]. Npj Clean Water, 2021, 4(1): 18-27.
- [11] EKHLAS D, KURISU F, KASUGA I, et al. Identification of new eligible indicator organisms for combined sewer overflow via 16S rRNA gene amplicon sequencing in Kanda River, Tokyo[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 284: 112059.
- [12] 赵泽坤,车伍,赵杨,等.美国合流制溢流污染控制灰绿设施结

(下转第10页)