

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.12.005

城市排水管网末端雨洪排口降雨污染特征及治理对策

李文秋^{1,2}, 孙永利^{1,2,3}, 张维^{1,3}, 刘静^{1,2,3}, 高晨晨^{1,3}, 李家驹^{1,2}

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 天津市城市排水系统重点实验室, 天津 300074; 3. 国家城市给水排水工程技术研究中心, 天津 300074)

摘要: 排查结果显示,我国城市排水管网普遍存在旱季低流速沉积、雨污管网错接混接、小散乱排污、雨水管网末端截污等导致的雨洪排口降雨冲刷溢流或冒溢污染问题。研究表明,污水收集管网沉积物多呈现低有机质含量、高碳低氮磷的典型特征,经降雨冲刷进入城市水体后很容易再次沉积至水体底部,成为城市水体雨后返黑返臭且长时间难以自净恢复的重要原因。工程调研结果显示,在排水管网末端的雨洪排口处建设以颗粒物去除为核心功能的大通量、短历时快速净化设施,有效削减可沉淀污染物和磷的入河总量,是现阶段切实解决我国降雨污染、抑制水体返黑返臭问题的有效举措,也是城市水污染控制与水环境治理的国际经验做法。

关键词: 雨洪排口; 降雨污染; 旱季沉积冲刷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0032-05

Rainfall Pollution Characteristics of Outlets and Control Countermeasures at the End of Urban Drainage Pipe Network

LI Wen-qiu^{1,2}, SUN Yong-li^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,3}, LIU Jing^{1,2,3}, GAO Chen-chen^{1,3},
LI Jia-ju^{1,2}

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Urban Drainage System, Tianjin 300074, China; 3. National Engineering Technology Research Center for Water & Wastewater, Tianjin 300074, China)

Abstract: The urban drainage pipe network in China generally has the problems of rain erosion, overflow or overflow pollution caused by low-velocity deposition in dry season, misconnection and mixed connection of rain and sewage pipe networks, small scattered sewage discharge and interception of sewage at the end of rain and flood pipe networks. Research shows that network depositions are characterized by low organic content, high carbon content, and low nitrogen and phosphorus content. Network deposition is easy to be washed into water bodies by rainfall and deposit to the bottom of the water body again. It becomes the main reason of urban water bodies return black and stinky and hard to recover from self-purification after rainfall. According to the results of the engineering survey, this work points out that building a large-capacity, short-term and rapid purification facility with particle removal as the core function at the end of the drainage pipe network is an effective measure to effectively reduce the total

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-166)

通信作者: 孙永利 E-mail: tjsunyongli@163.com

amount of pollutants and phosphorus deposited into the river, which is an effective solution to the problem of rainfall pollution as well as black and odorous water bodies in China. Such management and prevention measures are also recognized by international experience.

Key words: storm discharge outlets; rainfall pollution; dry season deposition scours

按照雨水排放的基本路径,城市降雨到达雨洪排口之前需要经过大气淋洗、地表径流、地下管网冲刷等污染过程。随着大气污染治理工作的快速推进,水滴吸附捕集空气中污染物所形成的湿沉降污染已经明显减弱;随着城市环境治理和海绵城市建设工作的持续推进,雨水冲刷地面沉积物形成的地表径流污染也逐步得到改善。但是我国污水收集管网(合流制管网和分流制污水管网,下同)的低流速沉积问题短期内难以彻底根治,源头至末端的雨污分流短期内难以全面实施,分流、合流管网错杂排布的情况较为普遍,降雨冲刷所致的雨洪排口高浓度污染问题将长期存在,成为城市黑臭水体治理与长效保持的重大工程和技术难题。降雨污染是湿沉降、地表径流、管网沉积物、生产生活污水排入等多种污染物综合作用的结果,但管网沉积物是我国大部分城市排水管网末端雨洪排口污染的主要来源,要解决雨洪排口污染问题,就必须强化对排水管网沉积污染问题的分析研究。

1 城市雨洪排口降雨污染问题及典型特征

我国大部分城市排水系统存在雨洪排口降雨期间的排污问题,Bertrand-Krajewski等^[1]指出城市入河排口污染物中约60%的SS和COD由管道沉积物的再悬浮贡献,而我国大部分城市污水收集管网沉积问题更加突出,沉积物对降雨污染的贡献更大。降雨冲刷地表污染物和管道沉积物所引起的雨洪排口高浓度污染是我国绝大多数城市的普遍现象。吴春笃等^[2]对镇江黎明河降雨溢流污染的测试结果表明,管网流速达到淤积冲刷流速后,排口的SS由112~286 mg/L增长至1 430~4 320 mg/L,COD由61~121 mg/L增长至178~728 mg/L,增幅明显;TP由2.37~3.76 mg/L增长至3.43~9.83 mg/L,有一定的增幅;而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 由23.5~26.8 mg/L降低至5.06~10.6 mg/L,呈现不升反降的情况。李海燕等^[3]监测的北京某分流制雨水管网降雨高峰时段SS、COD、TN、TP浓度分别为250~330、320~360、2.2~3.6和3.1~3.2 mg/L。上述数据结论表明,

$\text{NH}_3\text{-N}$ 等离子态或溶解性物质指标遵循稀释关系,而SS、COD等可沉淀类物质指标受管道沉积物的影响相对较大,TP指标受稀释和沉积物的双重影响,这也为雨洪排口降雨期间的污染净化提供了重要方向指引。

1.1 污水收集管网低流速引发颗粒物沉积

运行流速是污水收集管网颗粒物沉积控制的重要参数,《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)要求污水管道在设计充满度下的流速应为0.6 m/s,雨水管道和合流管道在满流时的流速应为0.75 m/s,这其实不仅是管网工程设计的基本参数,也是管网日常运行的基本要求。根据流量、流速和过水断面面积的关系,在流量一定的情况下,流速越高,过水断面面积越小,运行水位(充满度)越小。但由于各种雨洪排口、错接混接点、病害点位的存在,城市水体沿线排水管网水位通常受到水体水位影响,过高的水体水位必然引起相对较高的排水管网水位,并最终导致城市水体倒灌污水管网或污水阶段性冒溢至城市水体。另外,排水管网作为重要的地下市政基础设施,也是城市日常运维的重要保障,需要按照远期规划进行设计,管径一般大于现状生产生活排水量要求,因此满管流状态的分流制污水管网流速通常低于0.6 m/s,高水位运行的合流制管网流速经常低于0.1 m/s,即使按50%充满度运行,支管的流速通常也相对较低,在这种情况下污水收集管网的颗粒物沉积就会成为必然。

污染物沉积全过程研究表明,沉积过程实际上也是不同密度污染物的冲刷洗涤过程,意味着管道沉积物通常属于密度较大的物质,具有相对较好的易沉淀去除特征。赵梦圆等^[4]完成的北京市中心城区合流制和分流制系统排出口雨水静态实验结果表明,合流制系统颗粒物的最大沉速达0.65~5.65 mm/s,质量占比可达75%,且随着降雨历时的增加,沉降速度逐渐降低。而我国大部分城市水体呈现高水位、大水面特征,降雨期间的流速增幅也并不明显,大部分时间段的河道流速低于颗粒物的沉降

流速控制要求,也就意味着通过雨洪排口进入城市水体的管道沉积物非常容易在城市水体内沉积,成为很多城市水体雨后返黑返臭且长时间难以根治的重要原因。

污水污染物在管网内长时间停留的过程,实际上也是微生物代谢环境培养驯化和污染物反应衰减的过程。在污染物反应衰减过程中,泥砂表层黏附的污染物会被微生物降解为小分子有机物、 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 等物质而损耗衰减,有机氮则被氨化为 NH_3-N 或其他溶解性氮化物,有机磷转化为 $PO_4^{3-}-P$ 或其他溶解性磷并最终进入污水相,从而使泥相呈现高碳低氮磷的典型特征。北方某城市污水管道泥质测试结果表明,长期沉积污泥的有机组分含量(VSS/SS)通常为10%~40%,COD/TN、COD/TP比通常为30~50和80~180,COD/ NH_3-N 比值则可能高达200,底层污泥的低有机组分含量、高碳低氮磷问题更加突出。另外,居民楼宇新鲜生活污水经10 h沉淀反应后,污水相的COD/TN、COD/ NH_3-N 、COD/TP和COD/ $PO_4^{3-}-P$ 比值可分别降低20%、25%、10%和18%左右,这也就意味着进入污水管网的有机物会因沉降和生物代谢而衰减,但 NH_3-N 、 $PO_4^{3-}-P$ 等溶解性物质通常不仅不会衰减降低,还会因反应释放而使污水相的浓度增大,新鲜生活污水沉积过程C、N、P组分变化也可部分解释我国城市污水处理厂进水碳氮磷比例失调、碳源不足的共性问题。

1.2 雨水管网错接混接和小散乱排污问题

分流制雨水管道是重要的城市排水安全保障设施,适度的透水性是部分城市雨水管道早期的设计、建设方式,随着海绵城市建设工作的推进,近年来也逐渐变成部分高校、科研机构的热点研究方向。但随着城市开发和水系统营造理念的变化,城市河湖旱季高水位的情况比较常见,导致雨水管道旱季长期有水甚至满管的状态比较普遍。另外,雨水管道还可能成为达标工业废水、施工降水或基坑排水、分散式污水处理设施出水,以及各种临时性排水通道。也就是说雨水管道不仅是雨水的排放通道,旱季也可能成为其他清水的重要排放路径。

但是,我国大部分城市存在餐饮、洗车、街边临时摊位,以及其他行业借助雨水算子排污的行为,雨水算子周边脏乱差情况比较普遍,居民阳台雨水管排污、卫生间独立下水改造接入雨水管的情况比较突出,很多雨水管道已经演变成“污水”的排放通

道。虽然很多城市开展了雨水管道排污的源头治理,但这是一个非常复杂的社会问题,短时间内难以彻底根治,雨水管网末端截污成为无奈之举。如果这些雨水管道还存在前述的“清水”借道排放情况,则末端截污不仅截留了污水,也截留了“清水”,会进一步拉低污水处理厂的进水污染物浓度,甚至因排入水量超过管道输送能力或污水处理能力,而导致其他点位污水冒溢问题。

另外,旱季截流还会使雨水管道长期处于中高水位,造成泥砂等颗粒物旱季或中小雨阶段沉积,而在大暴雨期间高浓度排放的情况。科学解决雨水管道旱季低浓度排污和降雨冲刷污染排放,以及由此引发的污水管网低浓度、低效能问题,可能成为分流制排水区域的重点研究方向。

2 城市雨洪排口降雨污染治理技术对策

科学全面的排水许可管理、旱季降水水位提流速以减少颗粒物沉积量、推进海绵城市建设以降低雨水入管量都是解决我国城市雨洪排口降雨污染问题的有效举措。但是排水许可管理和海绵城市建设是一项长期工作,难以短期快速见效;雨污水管网旱季降水水位提流速更是一个系统工程,需要依赖城市涉水设施的综合协调和全面的管道质量提升,更需要系统的排水设施竖向布局;雨污水调蓄设施虽然在大量城市得到工程应用,但目前仍存在沉积控制、雨后养护、排污许可、排放标准管理等问题,不列入本研究讨论的推荐技术方向。在这种情况下,污水处理厂雨季超量处理和雨洪排口降雨污染快速净化,尤其是雨洪排口降雨污染快速净化有望成为当前和今后一个时间段很多城市解决降雨污染和水体雨后返黑返臭问题的重要工程举措。

2.1 城市污水处理厂雨季超量处理

城市雨洪排口在降雨初期或初中期都可能出现所谓的“初雨效应”,也即污染物量明显增多的情况。对于管网沉积并不严重的城市排水系统而言,“初雨效应”主要体现在初雨阶段地表径流和管道冲刷所致的SS或COD等可沉淀污染物指标的增加,短期降雨冲刷过后,各项指标就会呈现清洁雨水对生活污水的浓度稀释特征。也就是说管网淤积不突出的欧美、日本等发达国家,污水处理厂某些水质指标在降雨初期存在升高的可能性,但降雨一段时间后都会有一定幅度的降低,在这种情况下增大

污水厂处理水量所引起的污染负荷变化,可通过源头排水户至末端污水厂的污染物转输全过程总量平衡关系进行核算。根据污染物总量守恒定律,排入污水收集管网的污染物总量应等于污水处理厂接纳的污染量与污水管网沿程损耗量之和,降雨期间排水户的排污量相对变化不大,而各种调蓄、溢流等会导致管网沿程污染物损耗增大,也就意味着对于污泥中占比不高、沿程增量不明显的污染物指标,尤其是溶解性或离子态污染物,降雨期间进入污水处理厂的总量实际上会呈现减少趋势。因此对于管网养护到位、污泥淤积不突出的城市而言,污水处理厂雨季超量处理通常只是增大了设施的水力负荷,部分时间段可能因径流和管道冲刷导致SS、COD等可沉淀指标负荷适度增加,但从降雨全时段污染总量平衡角度考虑,影响并不大;而氮、磷等以溶解态为主要赋存形式的污染物在降雨过程中则主要呈现稀释特征,污染负荷通常不仅不会增长,还会因溢流出现明显的降低趋势,这或许是欧美、日本等发达国家城市污水处理厂雨季超量处理工程稳定达标的重要原因。

但是我国污水收集管网旱季低流速沉积问题比较严重,尤其是合流制管网和超前规划建设分流制污水管网,旱季底泥沉积层厚度超过30%的情况比较常见,超过50%的情况也并不少见,另外多数城市的地表污染问题也比发达国家严重,因此近几年的城市黑臭水体治理工作暴露出许多合流制雨洪排口,甚至部分分流制冒溢点位出现降雨期间SS达到2 000 mg/L以上、COD达到1 000 mg/L以上的情况^[2-3]。在没有较好的一级处理设施的情况下,这种高SS、高COD的雨污水进入城市污水厂,必然会在生物单元形成无机泥砂沉积问题,进一步拉低城市污水厂雨季和雨后的MLVSS/MLSS水平,降低生物系统活性,一定程度上影响了污水处理厂的运行效能,增大搅拌推进等设施的能耗并增加设备磨损,影响污水处理设施的整体效能和使用寿命。

污水处理厂雨季超量处理的另一个重要影响因素是水力负荷,尤其是二沉池、滤池、膜池等以水力学指标为主要设计参数的工艺单元,很有可能直接接受水力负荷波动的冲击影响,造成生物池冒溢、二沉池跑泥并影响后续工艺单元效能,或超过滤池、膜池等工艺单元的最大处理能力而使部分指标出现超标的风险。因此,雨季超量处理首先需要考

虑的是水力负荷问题,避免超量处理引发跑泥、冒溢等风险;采取强化沉降措施的,也需要重点关注所采取措施对雨后生物系统的潜在影响。其次需要重点关注污水收集管网沉积物所致的生物系统MLVSS/MLSS较低的问题,原则上需配套功能完善、以SS和颗粒态COD去除为核心功能的一级或一级强化处理工艺设施,将沉积物冲刷形成的大量无机泥砂以及可沉淀有机物截留在一级或一级强化处理单元,尽量避免过量的无机泥砂进入生物系统。有条件时还可以考虑在降雨过后进行一级或一级强化污泥的有机物提取并作为污水处理厂的补充碳源,以缓解城市污水处理厂降雨期间低浓度进水引发的低生物活性问题,持续保障生物系统整体活性。未配置一级或一级强化处理单元设施,或相关设施无法满足雨季超量处理要求的城市污水处理厂,原则上不宜进行雨季超量处理。

2.2 城市雨洪排口污染物快速净化

降雨属于不可人为控制的事件,其在降雨历时、雨型、雨强等方面都具有高度的随机性和不确定性,因此可以通过源头减排、过程调蓄减量、污水处理厂超量处理等措施解决雨洪排口的降雨污染问题,但城市内可建设的雨污水存储和处理设施能力有限,污水处理厂雨季超量处理不可能解决所有雨洪排口污染问题,污水收集管网沉积物、雨水管网小散乱排污等导致的降雨冲刷入河污染,必将直接影响城市水环境质量。水体沿线雨洪排口降雨污染净化成为根治城市水体雨后返黑返臭问题,助力实现水污染控制和水生态修复的重要举措。

降雨时间和降雨量的不确定性决定了雨洪排口污染净化必须选择具有启动速度快、停留时间短的大通量技术装备,从而确保实现以相对较大的处理量最大限度地削减降雨入河污染总量的水体治理目标。以生物处理为核心功能单元的二级处理或深度处理技术虽然可以通过相对较长的停留时间和较大的工程占地实现相对较好的出水水质,但通常需要在降雨前数月进行微生物的培养驯化以确保降雨期间真正发挥生物处理功效,而且在两场降雨之间的相对较长时间段内还需要通过投加营养物质或其他污染水的方式来维持生物活性。此外,还涉及非降雨期间的排污口审批许可等管理问题,不仅不经济,而且不可持续,并不是绿色低碳的降雨污染净化技术方向。另外,雨洪排口的核心功能

是保障城市排水安全,通常需要在水体沿线多点布局,这就决定了排口净化设施一般也需要多点布设,从而增大了设施的运维管理难度,因此宜尽量选用智能化程度高、运维要求低的净化技术装备,尽量做到设施运维状况和雨洪排口出流水量的自动适应,有效降低雨洪排口净化设施运维的人工成本。由此,雨洪排口污染净化应尽量选择物理或物化处理工艺技术。

前已述及,我国的雨洪排口降雨污染主要来自于管道沉积物,表征为浓度相对较高的COD和SS,也即具有泥砂等无机组分含量高、快速沉降效果好的实际特征,通常只需要停留时间相对较短的一级处理,或辅以化学混凝沉淀、电化学沉淀等一级强化处理就可以实现较好的污染物去除效率,适度投加化学药剂还可以快速吸附去除胶体及其他溶解性小颗粒物,并沉淀去除大部分的TP;另外,清水掺混造成的旱季低浓度污染物是我国城市污水处理厂进水的典型特征,降雨期间,数倍的雨水稀释使雨洪排口的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度降低至10 mg/L以下,甚至低至5 mg/L以下的情况非常普遍。这也就意味着雨洪排口出水经简单的一级或一级强化处理后基本上以溶解性小分子有机物和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为主,排入城市水体后很容易通过水体生物群落的物理吸附和生物净化作用得以去除。这种一级或一级强化处理出水通常还具有相对较高的透明度,可以在很大程度上解决降雨溢流所致的沉水植物缺少阳光而大量衰亡的问题;与此同时,沉水植物光合作用形成的厌、缺、好氧交替环境,还能进一步提高城市水体溶解性污染物的快速吸附和净化去除能力,水体沿线排口一级强化+沉水植物生态净化已经得到了大量的工程验证,成为城市水体治理、雨后快速恢复与水质长效保持的成熟技术路线。

3 总结与建议

① 污水收集管网沉积物的降雨冲刷是我国城市水体沿线雨洪排口降雨污染物浓度过高的主要原因,是造成城市水体雨后持续性返黑返臭的根源。

② 污水收集管网沉积物具有高无机组分含量、高碳低氮磷的典型特征,具有相对较好的沉降性能,可通过一级或一级强化处理工艺实现主要污染物的高效净化。

③ 在满足水力负荷的情况下,城市污水处理厂雨季超量处理通常不存在溶解性氮、磷污染物的超负荷问题,在一级或一级强化处理工艺保障的情况下,通常也不存在COD、 BOD_5 、SS等污染物的超负荷问题。

④ 水体沿线入河排口降雨污染是城市水体雨后返黑返臭的根源,可快速启动的大通量一级强化成套设备与沉水植物生态净化耦合的治理技术路线是现阶段解决城市水体雨后返黑返臭问题的重要工程措施。

参考文献:

- [1] BERTRAND-KRAJEWSKI J L, BARDIN J P, GIBELLO C. Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer[J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(6/7): 109-117.
- [2] 吴春笃,张贝贝,任雁,等. 镇江市合流制管网溢流污染源解析[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(10): 182-185.
WU Chundu, ZHANG Beibei, REN Yan, *et al.* Analysis of combined overflow pipe pollution of Zhenjiang [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(10): 182-185(in Chinese).
- [3] 李海燕,徐波平,徐尚玲,等. 北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 919-926.
LI Haiyan, XU Boping, XU Shangling, *et al.* Research on pollution load of sediments in storm sewer in Beijing district [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 919-926(in Chinese).
- [4] 赵梦圆,王建龙,黄涛,等. 北京市雨水径流中颗粒物沉降特性[J]. *环境工程*, 2019, 37(2): 67-72.
ZHAO Mengyuan, WANG Jianlong, HUANG Tao, *et al.* Research on settling characteristics of particulate matters in urban storm-water runoff [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(2): 67-72(in Chinese).

作者简介:李文秋(1969-),男,河北南宫人,学士,高级工程师,研究方向为城市水环境治理与数字化管理。

E-mail:necw@vip.sina.com

收稿日期:2022-12-30

修回日期:2023-02-02

(编辑:丁彩娟)