

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.018

# 城市水体雨后污染特征及降雨污染快速净化对策

范波, 黄鹏, 孙永利, 张玮嘉, 李鹤男, 刘茜, 李檬,  
田腾飞, 赵青

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘要:** 我国城市排水管道旱季颗粒物沉积严重,降雨期间在雨水冲刷作用下沉积污染物再悬浮进入水体,是导致城市水体返黑返臭的主要原因。降雨过程中,通过对某城市河道及入河排口的跟踪监测和实验,分析了城市水体雨后水质变化规律及污染特征,发现雨后河道溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)均达到重度黑臭程度。三维荧光光谱显示,雨水排口降雨污染中的有机物以芳香蛋白类物质和微生物代谢产物为主,主要来源于生活污水和管道沉积微生物。排口出流沉降实验表明,雨水排口降雨污染具有颗粒物浓度高及易沉降的特征,沉降过程分为三个阶段,前5 min,对SS、COD、TP、TN的去除率可分别达到69.01%、32.54%、45.54%、28.55%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等溶解性污染物浓度无明显变化。基于上述特征,降雨污染快速净化方案需以去除颗粒物为核心,并应满足停留时间短、处理效率高、可间歇运行及快速启动等要求。

**关键词:** 降雨污染; 城市水体; 返黑返臭; 管道沉积物; 快速净化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0115-07

## Characteristics of Urban Water Bodies Pollution Following Rainfall and Strategies for Rapid Purification of Rainfall Pollution

FAN Bo, HUANG Peng, SUN Yong-li, ZHANG Wei-jia, LI He-nan, LIU Qian,  
LI Meng, TIAN Teng-fei, ZHAO Qing

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074,  
China)

**Abstract:** The deposition of particulates in urban drainage pipes is particularly severe during the dry season in China. The sediment is then flowed into the water body due to rainwater erosion during rainfall, which is the primary cause for re-formation of black and odorous urban water bodies. During the process of rainfall, the water quality and pollution characteristics of urban water bodies were analyzed through tracking monitoring the urban river channels and outlets. It was observed that the dissolved oxygen (DO) and oxidation-reduction potential (ORP) of river channels reached severe black and odorous degree after rain. The three-dimensional fluorescence spectra revealed that the organic substances in the rainwater pollution were predominantly aromatic protein compounds and microbial metabolites, originating mainly from domestic sewage and microorganisms deposited in pipes. The experiment on sedimentation of outlet flow indicated that the rainfall pollution in the rainwater outlet was characterized

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: 刘茜 E-mail: 18622206356@163.com

by high suspended solids and easy sedimentation. The sedimentation process could be divided into three stages. Within the first 5 minutes, the removal rates of SS, COD, TP, and TN reached 69.01%, 32.54%, 45.54% and 28.55%, respectively. However, there was no significant change in dissolved pollutants such as  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ . Based on the aforementioned characteristics, rapid purification scheme of rainfall pollution should focus on the removal of particulate matters as the core, while also meeting requirements for short hydraulic retention time, high treatment efficiency, intermittent operation, and fast start-up.

**Key words:** rainfall pollution; urban water body; re-formation of black and odorous water body; pipeline sediment; rapid purification

随着城市黑臭水体整治攻坚战的实施,全国城市水体旱天黑臭现象已基本消除,但雨季返黑返臭仍经常发生,已经成为当前城市水环境治理亟待解决的难题。降雨期间大量雨水涌入污水管道和合流制管道,在冲刷作用下,旱季形成的管道沉积物所携带的污染物重新悬浮进入水体,形成冲击性污染负荷,是城市水体雨后返黑返臭问题无法彻底根除的主要原因<sup>[1]</sup>。我国城市排水管道沉积物淤积严重,合流制管道中污染物沉积率高达40%以上,分流制管道也因混接错接、小散乱排污和外水入渗行为沉积现象严重<sup>[2]</sup>。合流制排水管道和分流制雨水排口降雨污染中,管道沉积物所占比例最高<sup>[3]</sup>。

虽然有关合流制和分流制雨水管道沉积物降雨径流冲刷效应等方面已有较多报道<sup>[3-5]</sup>,但雨水排口降雨污染进入城市水体后的污染特征及时空分布转化规律尚未得到深入研究和验证,且缺乏有效的应对策略。笔者以北方某河道为研究对象,进行水体、排口的水质调查和降雨污染沉降实验,通过降雨前后黑臭指标及主要污染物的变化,识别关键影响指标及时空变化规律;同时,基于管道沉积物的冲刷效应,开展雨水排口降雨污染沉降实验,探究污染物去除特性,研究降雨污染快速处理方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 河道跟踪监测方案

北方某河道是贯穿市区的主要城市河道之一。河道周边排水体制为分流制,通过对降雨期间雨水排口下游500 m水体连续监测和降雨前后水质进行对比,研究降雨期间及降雨后水体返黑返臭情况和水质污染特征,检测指标包括DO、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、氧化还原电位(ORP)、透明度、悬浮颗粒物(SS)、TN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等,并进行三维荧光光谱分析。

### 1.2 降雨污染沉降实验

雨水排口降雨污染中含有大量的排水管道沉积物,通过沉降特性实验研究悬浮颗粒物和附着污染物的去除特征。采用14个 $H=100\text{ cm}$ 、 $D=45\text{ cm}$ 的圆柱形有机玻璃反应器,取降雨时雨水口的出流水进行实验,分别静置不同的时间,检测反应器液面以下约10 cm处水样中SS、TP、TN、COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等指标的变化情况。

### 1.3 检测方法

使用多参数水质检测仪测定排口及下游水体温度、DO和ORP等理化参数;水体透明度、SS、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。

采集水体日常水样及降雨期间排口排放水样,使用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后,用荧光分光光度计对水样溶解性有机物进行三维荧光光谱扫描。参数设定:激发波长( $\lambda_{\text{Ex}}$ )为220~450 nm,发射波长( $\lambda_{\text{Em}}$ )为220~500 nm;狭缝宽度为5 nm;光电倍增管(PMT)电压为700 V;扫描速度为2 400 nm/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 雨水排口降雨污染对水体水质的影响

#### 2.1.1 降雨过程中水质的变化情况

由于城市建成区以外区域受人类活动影响相对较小,地表径流冲刷产生的降雨径流污染负荷相对较低,且具有高DO特征,因此建成区外水体雨后DO呈升高趋势,污染物浓度上升幅度有限。相比之下,城市水体受城市生产和居民生活影响显著,污染源种类繁多,成分复杂,污染物输入量远远超过非城市水体,区域污染特征显著<sup>[6-8]</sup>。本实验对降雨期间及雨后城市水体DO、ORP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和透明度4项指标的变化情况进行了跟踪检测,从降雨开始

共检测 96 h,降雨持续 8 h 左右后停止,结果如图 1 所示。从图 1(a)可知,初始 DO 浓度为 3.68 mg/L,降雨期间快速下降至 0.2 mg/L 以下,雨停后并未恢复,厌氧状态持续至 48 h 以后;降雨期间氨氮浓度从 0.51 mg/L 持续升高至 12.90 mg/L,雨后虽略有下降,第 36、48 小时的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度仍为初始浓度的 18.43 和 13.92 倍;ORP 受降雨影响,从 202.70 mV 降至 -234 mV 的还原状态。

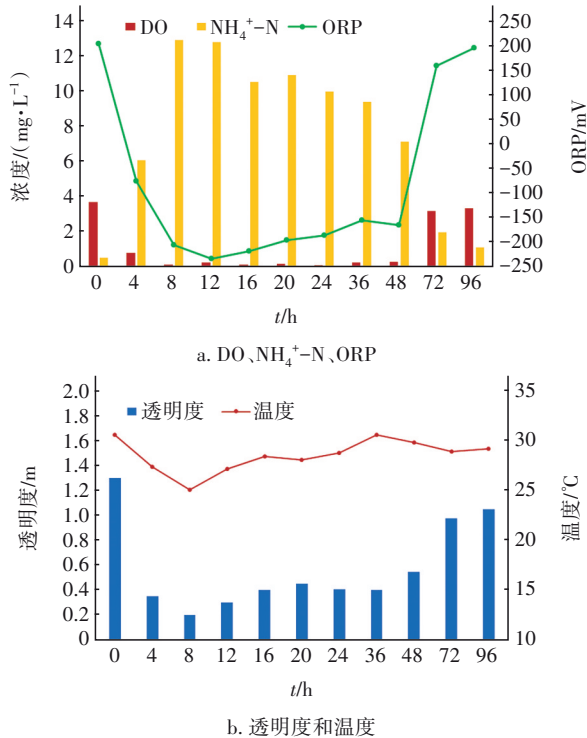


图 1 降雨期间及雨后河道水质的变化

Fig.1 Change of water quality during and after rainfall

从图 1(b)可知,透明度从晴天的 1.3 m 最低降至 0.2 m。根据《城市黑臭水体整治工作指南》城市水体黑臭程度分级标准(见表 1),本次降雨河道 DO 和 ORP 均达到重度黑臭标准,水体黑臭持续时间超过 48 h,其中重度黑臭持续时间超过 24 h。

表 1 城市黑臭水体污染程度分级标准

Tab.1 Classification standard for pollution level of black and odorous urban water bodies

特征指标	轻度黑臭	重度黑臭
透明度/cm	25~10*	<10*
溶解氧/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	0.2~2.0	<0.2
氧化还原电位/mV	-200~50	<-200
氨氮/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	8.0~15	>15

注: \*表示当水深不足 25 cm 时,该指标按水深的 40% 取值。

### 2.1.2 主要污染指标变化情况

对三次降雨前后河道水质进行检测,取样点为雨水排口下游 500 m,雨前水样选择距离上次降雨一周以上且水体水质恢复后的某个晴天,雨后水样为排口排水之后 6 h 左右。第 1 次雨后采样时间为 2022 年 6 月 29 日,24 h 降雨量为 23 mm(中雨),距上一次降雨间隔为 11 d;第 2 次雨后采样时间为 2022 年 7 月 6 日,24 h 降雨量为 45 mm(大雨),距上一次降雨间隔为 8 d;第 3 次雨后采样时间为 2022 年 7 月 28 日,24 h 降雨量为 15 mm(小雨),距上一次降雨间隔为 18 d。图 2 为降雨前后河道水质的变化。

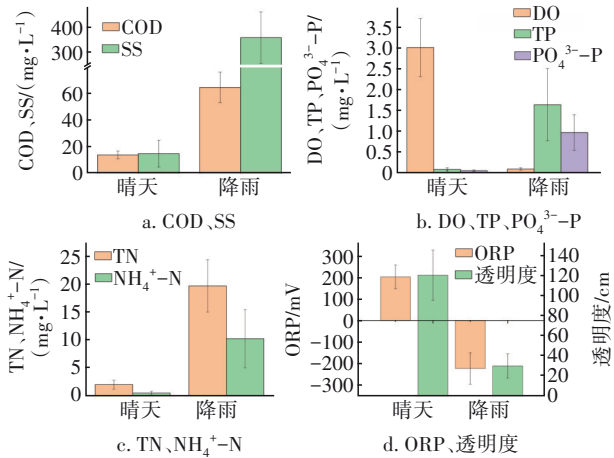


图 2 降雨前后河道水质的变化

Fig.2 Change of water quality before and after rainfall

从图 2 可知,3 次测试雨后污染物浓度均大幅升高。雨前 N、P 等浓度均较低,雨后  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均浓度分别从 0.5 和 0.05 mg/L 升高至 10.23 和 0.97 mg/L,由于降雨污染的高悬浮颗粒物特征,雨后水体 TN 和 TP 平均浓度分别从 2.02 和 0.08 mg/L 升高至 19.66 和 1.64 mg/L;SS 浓度升高 2 300%,COD 浓度升高 364%;DO 平均浓度从 3.02 mg/L 降至 0.2 mg/L 以下,ORP 平均值从 202 mV 降至 -222 mV,透明度平均值从 1.2 m 降至 0.3 m,DO 和 ORP 都达到重度黑臭水平。雨水排口降雨污染是造成水体水质恶化并返黑返臭的直接原因。

虽然河道所处区域为分流制排水体制,但仍有高负荷污染物随降雨冲刷进入水体,这是由于降雨地表径流、混接错接生活污水混入和管道沉积物冲刷等引起的,且雨水径流与雨污混接污水在管道内的沉积物是分流制雨水管道排放污染物的主要来源<sup>[9]</sup>。由于混接错接,晴天时生活污水进入雨水管



道并发生颗粒物沉积。沉积物长时间在管道内停留,在厌氧和高有机负荷下,产生大量的小分子有机物等还原性物质随降雨冲刷进入水体,造成雨后水体DO和ORP急剧降低,迅速返黑返臭;管道沉积物在降雨径流冲刷作用下,发生颗粒物再悬浮及 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等溶解性污染物释放过程,因此雨水排口降雨污染中通常SS、N、P等污染负荷较高。

## 2.2 三维荧光光谱分析

图3为晴天水体和降雨期间雨水排口水样的三维荧光光谱。三维荧光光谱是利用水体中溶解性有机物(DOM)的荧光性质进行化学组分分析,不同有机质组分划分为I~V五个区域,分别为芳香蛋白类物质I、芳香蛋白类物质II、富里酸类物质、溶解性微生物代谢产物和腐殖酸类物质。通过分析荧光光谱中荧光峰强度、位置和个数的变化,能更加准确地判断水体中DOM的分布、组成和来源<sup>[10]</sup>。

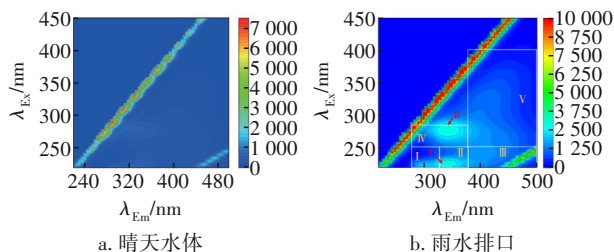


图3 晴天水体和降雨期间雨水排口水样的三维荧光光谱  
Fig.3 Three-dimensional fluorescence spectra of water samples in clear days and rainwater outlets during rainfall

由图3(a)可知,晴天水样的三维荧光信号较弱,无明显荧光峰值,这与DOM浓度较低有关。由图3(b)可知,雨天雨水排口水样在5个区域均有一定的荧光强度,说明DOM浓度较高,且I、II、IV区有较强的2个荧光峰。其中峰A跨越I、II区,代表低激发波长色氨酸类物质,芳香蛋白类物质浓度较高说明排口来水受到了生活污水污染;峰B位于IV区,代表类蛋白、辅酶、小分子有机酸、色素等溶解性微生物代谢产物,主要来源于管道微生物对沉积物中蛋白质等有机物的分解代谢;III区和V区代表富里酸类物质和腐殖酸类物质的区域荧光强度相对较弱,说明水样腐化程度并不高。

综上可知,雨水排口降雨污染中的溶解性有机物主要来源于混接错接混入的生活污水,以及污水颗粒物在管道沉积后,蛋白质等有机物被管道微生物分解代谢后的小分子有机物;结合雨水排口降雨

污染中较高的氮、磷浓度,共同证明生活污水混入了雨水管道,造成水体雨后污染。

## 2.3 沉降特性实验

雨水排口雨天出流水沉降过程中SS的变化情况见图4。可以看出,雨水排口降雨污染中污染物负荷较高,且具有很好的沉降分离特征。相较于水体日常10~20 mg/L的SS浓度,降雨污染SS初始浓度高达1 026 mg/L,与降雨冲刷管道沉积物引起的悬浮颗粒物浓度升高有关。沉降180 min后SS降至150 mg/L,去除率为85.38%,沉降过程经历了高效沉降期、快速沉降期和平缓期三个阶段。前5 min为高效沉降期,悬浮颗粒物沉降速度极快,SS去除率为69.01%,去除速度为142 mg/min,完成了总去除率的80.83%;5~20 min为快速沉降期,悬浮颗粒物沉降速度仍然较快,SS去除率为8.78%,去除速度为6 mg/min,完成了总去除率的10.27%;20 min之后为平缓期,SS下降速度越来越慢,SS去除率为7.60%,去除速度为0.49 mg/min,占总去除率的8.90%。

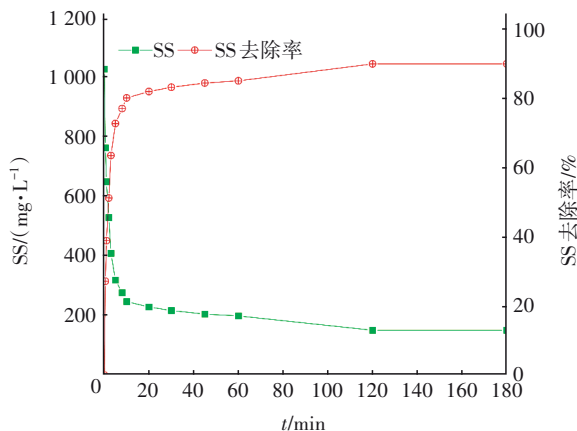


图4 沉降过程中SS的变化

Fig.4 Change of SS during settlement process

沉降过程中污染物的变化如图5所示。从图5(a)、(b)可以看出,沉降过程中,溶解性污染物 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 无明显变化,分别维持在1.50~1.73 mg/L和22.4~23.8 mg/L,且较为稳定;TP和TN与SS一样,也经历了高效沉降期、快速沉降期和平缓期三个阶段,180 min总去除率分别为51.64%和38.68%,其中前5 min的去除率分别为45.54%和28.55%,分别占总去除率的88.19%和73.81%。由图5(c)可知,COD的初始浓度为252 mg/L,沉降180 min后的总去除率为53.57%。COD的变化过程虽然也经历了从快到慢的不同阶段,即实验前5 min

去除速度最快,随后速度放缓,但随着时间的延长,20~120 min内仍有明显去除,COD在第5分钟的去除率为32.54%,占总去除率的60.74%,明显低于SS、TP和TN的占比。综上所述,高效沉降期去除的SS以易沉降无机颗粒为主,之后虽然沉降速度放缓,但沉降颗粒物的有机物含量较高,因此对COD的去除有一定的持续性。

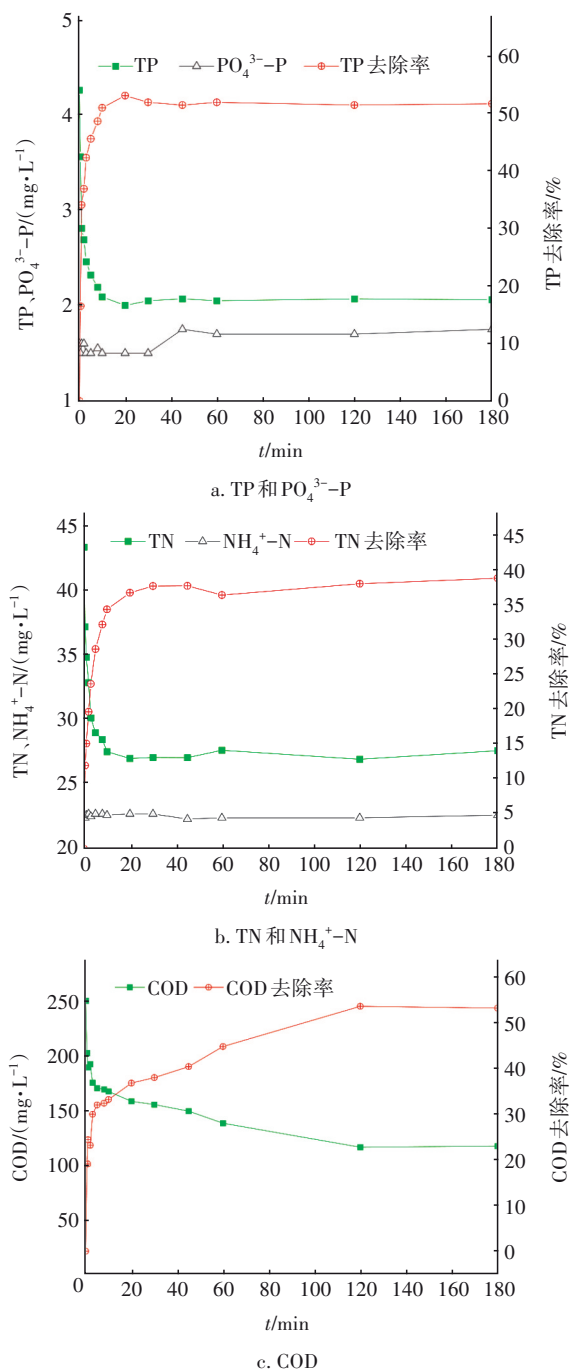


图5 沉降过程中污染物的变化

Fig.5 Change of pollutants during settlement process

降雨过程中,在地表径流冲刷作用下,泥土、砂石、树枝、塑料袋等不同类型的杂物随雨水经排水管道进入水体,其中砂石、树枝等大尺寸粒径的无机颗粒物具有相对密度大、易沉淀的特征,是高效沉降期所去除污染物的重要组分;同时,排水管网沉积物本身含有一定的粗颗粒砂石,这部分砂石长期在管道环境中,被有机质含量较高的管道污泥包围裹挟,形成相对密度较大的粗颗粒物,降雨期间在雨水冲刷作用下扰动再悬浮后被输送至水体。这部分粗颗粒物粒径最大、沉降速率最快、污染物含量最高,也是在高效沉降阶段被去除,因此该阶段SS、COD、TN、TP等污染物的去除量较大。

快速沉降期去除的是以有机颗粒物为主的管道沉积物,此部分沉积物是由颗粒物在积累过程中通过胞外聚合物、蛋白质和多糖等黏性物质聚合、稳定后形成的沉降速率较大的颗粒<sup>[11]</sup>。这部分沉积物中有机质含量较高,去除SS的同时,N、P也得到进一步的去除。平缓期沉降速度较为缓慢,污染物去除效率最低,此时水中的SS以胶体颗粒和轻质、松散、细小的污泥絮体为主,胶体在水体中不发生沉降,而絮体沉降相对缓慢,因此SS在这一阶段去除率较低。这两部分物质均可通过化学混凝沉淀作用得到较好的去除。

## 2.4 降雨污染快速净化方案

雨水排口降雨污染是导致城市水体雨后黑臭的直接原因,因此降雨污染控制是解决水环境污染问题的重要途径。而我国市政基础设施建设发展不均衡,城市排水系统存在建设、运行和管理等方面的历史欠账和现实问题,难以在短时间内从源头上有效解决,因此入河排污口快速净化是当前解决我国特有的雨后水体返黑返臭问题的有效举措<sup>[12]</sup>。

雨水排口降雨污染携带大量的管道沉积物,具有颗粒物浓度高和易沉降等特征,且水质、水量波动较大。快速净化系统不仅需具有高效的颗粒物去除能力,且应能满足抗冲击能力强、可快速启动、可间歇运行,以及运行维护简单等要求,因此常用的快速净化工艺以物理化学处理方法为主。

快速过滤技术通过滤料、滤网及滤布等过滤装置的拦截作用,可实现SS的快速去除,但是污染物的去除率相对较低<sup>[13]</sup>,且容易发生滤料堵塞和板结等问题,应用相对较少。水力旋流分离技术利用离心沉降作用对降雨污染中固体颗粒物进行分离,可

有效去除粗颗粒和浮渣等,对SS和COD具有较高的去除率,在国外也有较多应用;但是旋流分离技术对极小的颗粒分离效率较低,无法有效去除降雨污染所携带的大量沉积再悬浮颗粒物,水体黑臭问题难以彻底解决,需采用强化处理手段作为辅助。化学混凝技术可高效去除颗粒态悬浮物质,对传统物理手段无法去除的微小颗粒物具有很好的去除效果,对SS、COD、TP等以颗粒态赋存的污染物去除率较高,同时对溶解态 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 也有较好的去除效果;但是化学混凝方法处理负荷较低,通常需要与调蓄池联用,同时存在药剂大量使用和化学污泥造成的二次污染等问题。磁分离技术在传统的混凝技术上增加了磁分离过程,可加速化学絮体的沉降速度,在分离效率和处理效果方面具有明显优势,但是也存在投药量和产泥量大、能耗高、磁种流失和回收困难等问题。

笔者所在课题组<sup>[14]</sup>提出了一种化学一级强化与物理快速处理相结合的降雨污染快速净化方案,首先通过高效沉降去除大部分悬浮颗粒物,然后再进行化学混凝-沉淀-过滤处理,不仅可降低混凝过程的药剂用量、停留时间和处理负荷,而且化学絮体先预沉淀后过滤,亦可提升分离效率、降低滤池负荷,对SS、COD、N、P等污染物均可达到较好的去除效果。

虽然入河排污口快速净化技术正逐渐得到行业科研人员的重视和关注,合流制溢流污染快速净化也已写入《城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》等多项政策文件,但目前仍缺乏技术成熟、运行可靠的产品和设备;同时在控制标准、土地许可、排放许可、费用保障、考核机制等方面也需要相应的技术标准和政策支撑,这都是目前城市水体雨后返黑返臭防治和降雨污染控制相关工作的重点方向。

### 3 结论

① 雨水排口降雨污染具有高SS、高还原性、高污染负荷等特征。3次调查结果表明,雨后水体DO降至0.2 mg/L以下,ORP降至-222 mV,透明度从1.2 m左右降至0.3 m; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 从0.5 mg/L升至10.23 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 从0.05 mg/L升至0.97 mg/L;TP和TN分别高达1.64、19.66 mg/L;SS浓度升高2300%,COD浓度升高364%。降雨后水体DO和ORP均快速恶化至重度黑臭水平,氨氮和透明度也

达到轻度黑臭程度,且水体雨后黑臭具有持续性。

② 雨水排口降雨污染中的溶解性有机物以色氨酸类、辅酶、小分子有机酸、色素等类蛋白物质为主,主要来自于生活污水混入和管道沉积物的微生物代谢产物。

③ 雨水排口降雨污染颗粒物极易沉降,沉降过程分为高效沉降期、快速沉降期和平缓期,前5 min的高效沉降期中SS、COD、TP、TN去除率分别可达到69.01%、32.54%、45.54%、28.55%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等溶解性污染物无明显变化。

④ 降雨污染快速净化是缓解我国水体雨后返黑返臭问题的最有效举措,快速净化系统应兼具停留时间短、处理负荷高、颗粒物去除能力强、抗冲击能力强、可快速启动、可间歇运行,以及运行维护简单等特征,根据出流特征可因地制宜地选择物理、化学,或两者相结合的处理方案。但目前仍缺乏技术成熟、性能稳定的产品和设备,在技术标准和政策方面也需要相应的支撑。

### 参考文献:

- [1] 孙永利. 城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 1-6.  
SUN Yongli. Connotation and way of quality and efficiency improvement of municipal wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 1-6 (in Chinese).
- [2] 徐祖信, 张辰, 李怀正. 我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J]. 给水排水, 2018, 44(10): 1-5, 39.  
XU Zuxin, ZHANG Chen, LI Huaizheng. Classification and systematic treatment of black order problem in urban rivers in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(10): 1-5, 39 (in Chinese).
- [3] 李思远. 合流制管网污水溢流污染特征及其控制技术[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
LI Siyuan. Research on the Pollution Property of Combined Sewer Overflows and Its Control Technology [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).
- [4] 岳桢梧, 李一平, 周玉璇, 等. 南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2018-2029.  
YUE Zhenwu, LI Yiping, ZHOU Yuxuan, et al. Analysis on the source tracing and pollution on characteristics of rainfall runoff in old urban area of



- Nanning City[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2018–2029 (in Chinese).
- [5] 吴俊. 排水管道中雨污水颗粒物沉降速率特征分析[J]. 环境工程, 2023, 41(4): 1–9.
- WU Jun. Analysis of settling velocity of particulates in flows in dry and wet weather from combined sewer[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(4): 1–9 (in Chinese).
- [6] 曾康, 黄廷林, 马卫星, 等. 暴雨径流对分层水库水质的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 4979–4986.
- ZENG Kang, HUANG Tinglin, MA Weixing, *et al.* Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9): 4979–4986 (in Chinese).
- [7] 陈金月, 陈水森, 付尧, 等. 广东省水质现状及驱动因素[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7921–7931.
- CHEN Jinyue, CHEN Shuisen, FU Rao, *et al.* Analysis of water quality status and driving factors in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7921–7931 (in Chinese).
- [8] 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 等. 台风强降雨输入水源水库的泥沙沉降模拟分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1900–1907.
- YAO Ling' ai, ZHAO Xuemin, MA Qianli, *et al.* Simulation of the impact of typhoon-induced suspended solids precipitation on water quality in a reservoir for drinking water [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(10): 1900–1907 (in Chinese).
- [9] 徐强强, 李阳, 马黎, 等. 城市雨水管道沉积物氮磷污染溶出特性试验研究[J]. 环境科学研究, 2023, 34(3): 646–654.
- XU Qiangqiang, LI Yang, MA Li, *et al.* Experimental study on leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in urban rainwater pipeline sediment [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 34(3): 646–654 (in Chinese).
- [10] 隋志男, 鄧二铨, 姚杰, 等. 三维荧光光谱区域积分法解析辽河七星湿地水体DOM组成及来源[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(2): 114–120.
- SUI Zhinan, ZHI Erquan, YAO Jie, *et al.* Characterization of DOM composition and origin using three-dimensional fluorescence spectroscopy coupled with region integration method in Qixing wetland [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(2): 114–120 (in Chinese).
- [11] 黄乃先, 齐一凡, 金伟. 排水管道沉积物控制的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 507–513.
- HUANG Naixian, QI Yifan, JIN Wei. Research progress on the control of sediments in the drainage pipe [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 507–513 (in Chinese).
- [12] 李文秋, 孙永利, 张维, 等. 城市排水管网末端雨洪排口降雨污染特征及治理对策[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 32–36.
- LI Wenqiu, SUN Yongli, ZHANG Wei, *et al.* Rainfall pollution characteristics of outlets and control countermeasures at the end of urban drainage pipe network[J]. China Water & Wasterwate, 2023, 39(12): 32–36 (in Chinese).
- [13] 于东升. 人工快速渗滤系统处理城市初雨径流污染试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- YU Dongsheng. Experimental Study on Artificial Rapid Infiltration System Treating Urban Initial Runoff Pollution[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017 (in Chinese).
- [14] 范波, 孙永利, 郑兴灿, 等. 一种降雨污染快速净化系统与工艺: 202310668857. X[P]. 2023–09–01.
- FAN Bo, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, *et al.* A High-rate Purification System and Process for Rainfall Pollution: 202310668857. X [P]. 2023–09–01 (in Chinese).

**作者简介:** 范波(1985–), 女, 山东烟台人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水环境整治及生态修复、城镇污水处理等工作。

**E-mail:** lancyfb@163.com

**收稿日期:** 2023–11–16

**修回日期:** 2024–03–13

(编辑: 任莹莹)