

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.007

# 流速驱动下管网污染物沉积-冲刷特征及效能响应

张玮嘉<sup>1</sup>, 孙永利<sup>1</sup>, 高晨晨<sup>1</sup>, 刘龙志<sup>2</sup>, 葛铜岗<sup>1</sup>, 尚巍<sup>1</sup>,  
李鹏峰<sup>1</sup>, 郑华清<sup>1</sup>, 李思雨<sup>1</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 针对污水管网污染物低流速沉积的防控技术难题,构建污水管道沉积-冲刷模拟中试装置,深入研究污水管网流速变化与污染物沉积-冲刷的响应规律。结果表明,高流速冲刷可显著提升污染物收集效率,当流速调控至0.8 m/s以上时,沉积物的冲刷效应显著增强,冲刷强度对污水流速高度敏感;流速变化直接影响污染物沉积和再悬浮的迁移过程,在复合流速运行模式下,污染物浓度整体呈现“沉积衰减-冲刷提升-沉积衰减”的变化规律。因此,当实际污水管道长时间处于0.3 m/s以下的低流速运行时,采取阶段性高流速冲刷措施,可有效减少有机物沉积、提升污染物收集效率。

**关键词:** 污水管网; 污染物沉积; 冲刷响应; 流速调控; 沉积防控

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0046-06

## Sedimentation and Scouring Characteristics of Pollutants in Sewage Pipe Network and Their Efficiency Responses under Varying Flow Velocities

ZHANG Wei-jia<sup>1</sup>, SUN Yong-li<sup>1</sup>, GAO Chen-chen<sup>1</sup>, LIU Long-zhi<sup>2</sup>, GE Tong-gang<sup>1</sup>,  
SHANG Wei<sup>1</sup>, LI Peng-feng<sup>1</sup>, ZHENG Hua-qing<sup>1</sup>, LI Si-yu<sup>1</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430077, China)

**Abstract:** This study conducted an in-depth investigation into the response characteristics of pollutants sedimentation and scouring under varying flow velocities in sewage pipe network using a specially designed sewage pipe sedimentation-scouring simulation pilot device, to address the technical challenges associated with preventing and controlling the sedimentation of pollutants under low-flow conditions in sewage pipe network. High-flow scouring significantly improved the collection efficiency of pollutants. When the flow velocity exceeded 0.8 m/s, the sediment scouring effect was markedly enhanced, and scouring intensity exhibited high sensitivity to sewage flow velocity. Variations in flow velocity directly influenced the processes of pollutants sedimentation and resuspension. Under multiple flow velocity operating conditions, the overall pollutants concentration followed a distinct pattern characterized by “sedimentation attenuation-scouring lift-sedimentation attenuation”. Therefore,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203200、2022YFC3203204); 中国市政工程华北设计研究总院有限公司课题(2025-47-HJY)

通信作者: 孙永利 E-mail: tjsunyongli@163.com

implementing phased high-flow scouring measures can effectively mitigate organic matters sedimentation and enhance pollutants collection efficiency when the actual sewage pipe operates at a low flow velocity of less than 0.3 m/s over an extended period.

**Key words:** sewage pipe network; pollutants sedimentation; scouring response; flow velocity regulation; sedimentation prevention and control

城市污水管网长期高液位、低流速运行导致的污染物沉积衰减问题,是污水管网转输效能低下以及污水处理厂进水浓度偏低、碳氮磷比例失调的重要原因。流速作为衡量管道运行效果的关键指标,直接决定了污水中颗粒物的沉降情况<sup>[1]</sup>。污水管道的实际流速波动与居民生活污水排放规律密切相关,在流速交替变化的工况下,污水与沉积物之间会产生复杂的物理沉积与冲刷携带效应<sup>[2]</sup>,从而影响管道内污染物迁移转化、沉积物形成以及污水水质,进而影响污水管网对污染物的收集效率及系统运行性能。因此,通过设计与运维协同调控污水流速,是降低污水管道沉积、提升污染物收集效能的有效手段。

近年来,管道沉积物研究主要聚焦于污染物迁移转化规律、机制解析<sup>[3-5]</sup>与沉积-冲刷模型<sup>[6-8]</sup>。已有研究表明,在相对健康的实际污水管网和流速较高的模拟系统中,以污水COD浓度计,每千米沉积降解率约为2.5%~4.5%。部分学者进一步揭示了污水管道沉积与冲刷释放规律,金鹏康等<sup>[9]</sup>研究发现,管道循环转输6 h时,0.32 m/s流速下污水中有机物变化以沉积贡献为主,0.6 m/s流速下冲刷释放效应增强,0.9 m/s流速下冲刷释放成主导;桑浪涛等<sup>[10]</sup>研究发现,当流速<0.6 m/s时,污水中颗粒态污染物的沉积作用大于冲刷作用,当流速>0.6 m/s时冲刷强度增大,沉积物被水流大量携带。上述研究成果为污水管道污染物的沉积-冲刷变化规律研究提供了较好的理论支撑,但在污水管道运行中,低-高-低复合流速工况更贴近实际情况,而污染物输送效能在流速波动变化时受沉积-冲刷多重作用的交互影响机制尚不明晰,不能有效支撑污水管网运行工况优化及沉积防控。

为此,笔者构建了污水管道沉积-冲刷模拟中试装置,深入研究污水流速变化与污染物沉积-冲刷特征及效能响应关系,分析流速调控对管道沉积防控的影响特征与技术路径,以期对污水管网运行

工况优化及污染物收集效能提升提供可靠的参数依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

本研究构建的污水管道沉积-冲刷模拟中试装置如图1所示。该装置主要由循环水箱(进水箱和出水箱)、污水管道、检查井及蠕动泵等组成。污水管道作为沉积-冲刷的核心反应器,采用直径为300 mm的透明PVC管进行模拟,其底端设置中部和尾部控泥口,便于试验观测记录以及沉积底泥的全量收集。出水箱通过蠕动泵将污水送回进水箱,形成循环。试验过程中,通过控制阀门开启度和蠕动泵转速来调节污水流量,并结合流量计数据与管道液位计算断面的实时流速。



图1 污水管道沉积-冲刷试验装置

Fig.1 Picture of sewage pipe sedimentation-scouring test device

### 1.2 试验方法

试验用污水取自某污水泵站,试验初始水质如下:COD为320~380 mg/L,  $\text{NH}_3\text{-N}$ 为29~36 mg/L, TN为34~44 mg/L, TP为4.9~6.0 mg/L, SS为260~310 mg/L。为了研究高流速冲刷对污染物的影响,将污水在0.3 m液位、0.1 m/s低流速下循环运行24 h,至污染物全部沉积后,开展0.6、0.8、1.0和1.2 m/s四组高流速冲刷试验。复合流速试验是在污水管道无沉积的基础上,通过0.1 m/s-0.3 m/s-0.6 m/s-0.3 m/s-0.1 m/s的“低-高-低”复合流速运行模式,开展污水中污染物动态变化特征模拟试验。

### 1.3 取样频次与分析方法

高流速冲刷试验在初始阶段的10 s、20 s、30 s、

1 min、2 min、3 min、4 min、5 min 密集取样,随后每隔 5 min 取样 1 次,连续取样 30 min,共取样 14 次;复合流速试验在运行起止时刻及每次调流速前后的 2 min 和 30 min 于污水管道中部进行取样,共取样 22 次。每批次试验结束后全量收集沉积底泥。

污染物主要监测指标包括 SS、COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 等,污水水质和沉积底泥分析方法参考《水和废水监测分析方法》(第 4 版);同时,采用 MQ-Turb06 数字式悬浮物传感器,以 1 min 的测试频率在线监测管道内污水 SS 浓度变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同流速下污水管道沉积物的冲刷特征

#### 2.1.1 污染物冲刷强度

冲刷试验过程中污水污染物浓度的历时变化如图 2 所示。

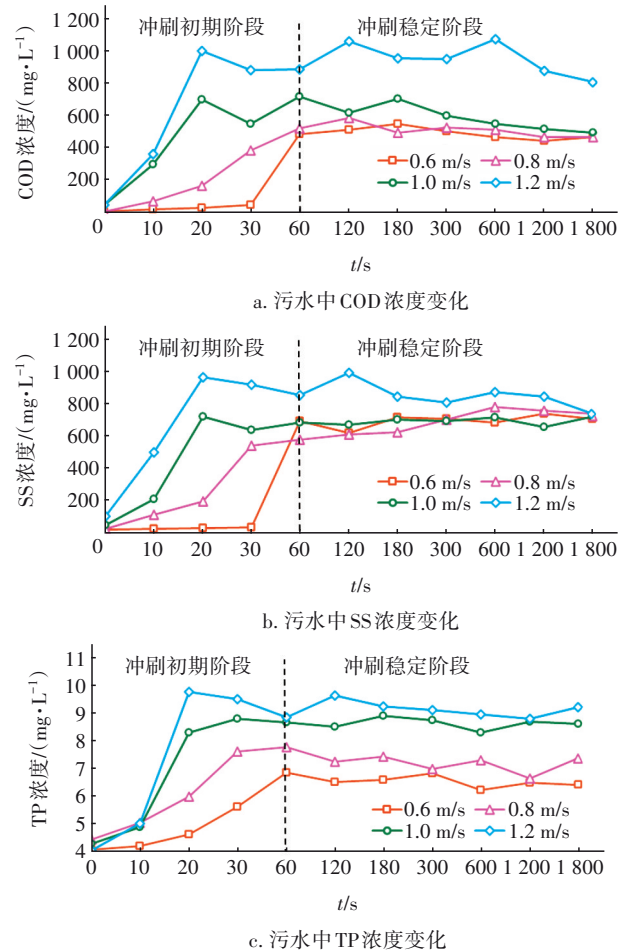


图2 不同流速冲刷过程中污水污染物浓度变化

Fig.2 Changes in pollutants concentration of sewage during scouring process at different flow velocities

从图 2 可以看出,0.6、0.8、1.0、1.2 m/s 流速下

沉积物均在 1 min 内表现出显著的冲刷效应,且流速越大,污染物冲刷至高值稳定后的时间越短、浓度越高。其中,当流速从 0.6 m/s 增至 1.0 m/s 以上时,污水中污染物浓度达到峰值的时间从 60 s 缩短至 20 s。随着管道流速的增加,水流携污能力增强,即冲刷强度增加,颗粒迁移几率大于沉积几率,致使污染物浓度升高。经核算,4 种流速下 SS 的平均冲刷强度依次为 666、1 024、1 992、2 556 mg/(L·min),COD 的平均冲刷强度依次为 476、746、1 935、2 835 mg/(L·min),TP 的平均冲刷强度依次为 3、5、12、17 mg/(L·min)。在 0.8、1.0 和 1.2 m/s 流速下,SS 的冲刷强度较 0.6 m/s 流速时分别增加 50%、2.0 倍、2.8 倍,COD 增加 60%、3.1 倍、5.0 倍,TP 则增加 70%、3.0 倍、4.7 倍。另外,污染物的冲刷响应速度表现为 SS>COD>TP,这可能与污染物的赋存形态密切相关。SS 以无机粗颗粒为主,易被水力扰动而迅速进入悬浮状态;COD、TP 中的有机组分多附着于细颗粒或胶体物质,需要更长时间方能释放。可见,SS 更易被快速冲刷,而 COD 和 TP 的冲刷强度对污水流速更加敏感,当流速达到 1.0 m/s 时可显著提升污染物颗粒的再悬浮与迁移能力。

#### 2.1.2 颗粒物迁移空间特征

污水管道沉积-冲刷装置中、后段的污水 SS 在线监测数据如图 3 所示。

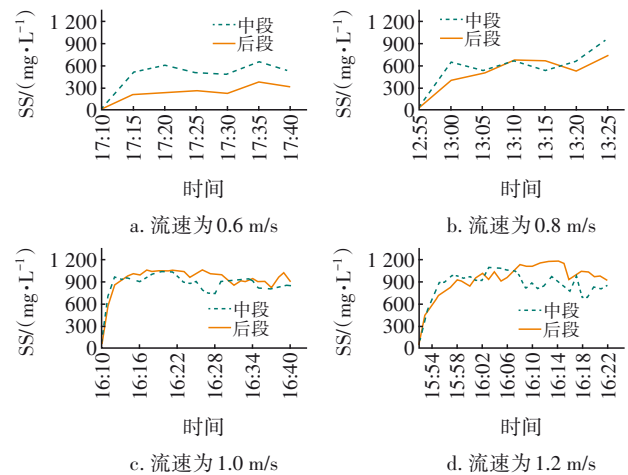


图3 不同流速冲刷过程中污水在线 SS 浓度变化

Fig.3 Changes in online sewage SS concentrations during scouring process at different flow velocities

从图 3 可以看出,冲刷流速越低,中、后段 SS 浓度差异越显著,在 0.6 m/s 流速下,管道中段 SS 浓度可达到后段的 2 倍,而在 0.8、1.0 和 1.2 m/s 高流速



下,中、后段SS浓度差异消失。分析认为,不同流速的冲刷强度会显著影响管道污水颗粒态污染物的浓度变化与迁移轨迹。冲刷强度较小时,仅能驱动表层沉积颗粒以滚动或跳跃形式短距离移动<sup>[10]</sup>,颗粒在悬浮一段距离后因动能不足重新沉降,导致污染物在中段堆积、后段浓度降低,形成类似“搬运-堆积”的动态平衡;而高流速下水流冲刷强度显著增强,沉积层受到强烈冲刷,使更多颗粒脱离床面在垂向快速混合,呈现出全段浓度均匀的“完全悬浮”状态。可见,在实际管道运行中,若冲刷强度不足,仅能实现局部沉积物迁移,反而可能加重下游淤堵,而流速达到0.8 m/s以上时,有利于全段沉积物的高效清除,避免二次淤积。

2.2 复合流速下污染物沉积-冲刷响应机制

2.2.1 流速变化对污水污染物的影响

复合流速沉积-冲刷试验前后污水污染物浓度变化见表1。可知,复合流速试验运行10 h后,污水污染物衰减率排序为:SS>COD>TP>TN>NH<sub>3</sub>-N。这可能缘于污染物的赋存形态、迁移机制及生化转化速率的差异<sup>[4]</sup>,SS以无机粗颗粒为主,高流速可破坏沉积物结构而促进其释放,但在流速回降时其会优先沉积;而COD和TP存在有机-无机复合迁移,高流速期颗粒态物质随SS共迁移,但溶解部分则缓慢释放;TN与NH<sub>3</sub>-N的低衰减率则是由于颗粒态有机氮需经历水解、氨化、硝化反应多步骤转化<sup>[11]</sup>,远超10 h试验周期。可见,SS和COD是管道沉积与冲刷的核心调控对象,直接影响管网运行效能。

表1 复合流速试验前后污水污染物浓度变化

Tab.1 Changes in pollutants concentration of sewage before and after multiple flow velocity test

| 项目                         | SS    | COD   | TP    | TN   | NH <sub>3</sub> -N |
|----------------------------|-------|-------|-------|------|--------------------|
| 初始浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 350   | 184   | 3.73  | 27.2 | 21.1               |
| 结束浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 204   | 121   | 2.88  | 25.9 | 20.9               |
| 变化率/%                      | -41.7 | -34.2 | -22.8 | -4.8 | -0.9               |

复合流速试验过程中污水SS和COD浓度历时变化如图4所示。可以看出,在流速从0.1 m/s逐步提升至0.6 m/s再阶梯式回降的过程中,污染物浓度呈现“沉积衰减-冲刷提升-沉积衰减”的典型特征。可见,污水污染物的沉积-再悬浮-冲刷-沉积迁移变化过程与污水流速密切相关,流速的阶跃变化通过改变沉积物-水界面剪切应力驱动污染物在沉积-冲刷多重作用下迁移,主导着界面物质交换的

动态平衡<sup>[10]</sup>。低流速阶段(0.1~0.3 m/s),较低的剪切力仅扰动表层松散颗粒,导致部分沉积物再悬浮;当流速跃升至0.6 m/s时,剪切力突破临界阈值,足以剥离底层致密沉积物,导致污染负荷剧增<sup>[12]</sup>;流速回降阶段(0.6 m/s→0.3 m/s→0.1 m/s),则因水力扰动减弱,悬浮颗粒快速再沉积形成二次衰减峰。因此,对低流速污水管道采取阶段性高流速冲刷措施,有助于降低污水输送过程中的颗粒物损失,减少管道内有机物长期沉积,提高污染物收集效能。

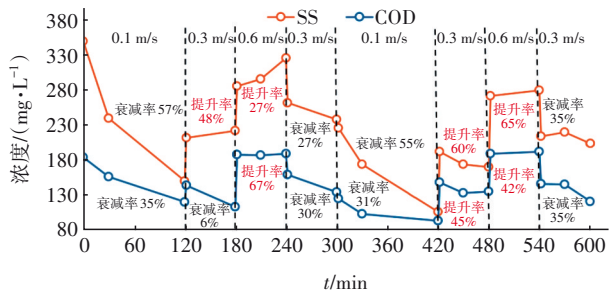


图4 复合流速试验过程中污水污染物浓度变化

Fig.4 Changes in pollutants concentration of sewage during multiple flow velocity test

复合流速运行状态下,污水管道不同位置的污水SS浓度变化如图5。

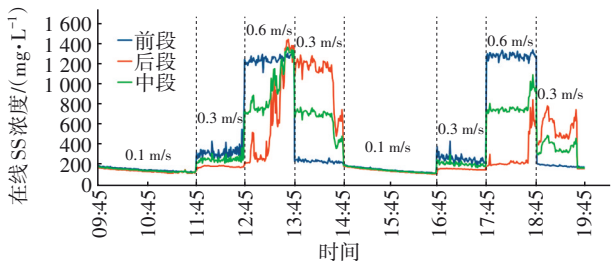


图5 复合流速试验过程中污水在线SS变化

Fig.5 Changes in online sewage SS concentrations during multiple flow velocity test

由图5可知,流速对颗粒态污染物的沉积衰减和冲刷释放影响显著,污染物在沉积-冲刷过程中存在时空异质性。流速从0.1 m/s逐步升至0.6 m/s的冲刷过程中,管道入口段因湍流强度高,前段SS浓度和冲刷速率显著高于后段,沉积物逐步向水流方向推移,SS峰值达1 400 mg/L。由于不断的水力冲击作用,让底部的悬浮颗粒互相碰撞、摩擦,使得表层沉积物逐渐冲散,颗粒物在水流推动下逐步向出口方向迁移并在管道后段二次富集。因此,冲刷强度的空间差异也可能进一步加剧污染物浓度的

分布不均,最终会对污水处理厂进水水质产生较大影响。

### 2.2.2 流速调控对底泥沉积的防控效果

复合流速试验运行10 h后,全量收集模拟管道中的沉积底泥,各污染物沉积量结果见表2。运行结束后,沉积底泥湿质量为953 g、干质量为634 g,沉积物中COD、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N的单位累积量分别为82.63、0.80、0.51、0.18 g/(m<sup>2</sup>·d)。对比“低-高-低”复合流速与持续低流速(小于0.3 m/s)工况下的污染物沉积量,结果如图6所示。

表2 复合流速试验结束后底泥污染物沉积量

Tab.2 Pollutants deposition in sediment after multiple flow velocity test

| 项目                                          | COD   | NH <sub>3</sub> -N | TP   | TN   |
|---------------------------------------------|-------|--------------------|------|------|
| 总质量/g                                       | 57.84 | 0.13               | 0.36 | 0.56 |
| 单位累积量/(g·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 82.63 | 0.18               | 0.51 | 0.80 |

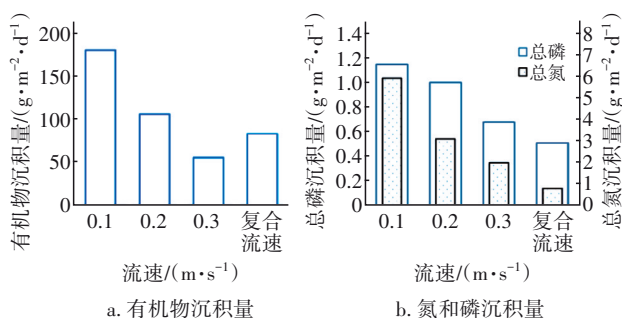


图6 不同运行工况下污染物沉积量对比

Fig.6 Comparison of pollutants sedimentation under different operating conditions

从图6可以看出,流速的交替变化动态调控底泥中有机物和氮、磷的沉积与释放,可有效控制底泥污染物积累。复合流速下沉积物中COD、TP和TN的质量分别较0.1 m/s流速下减少了54%、56%、86%,分别较0.2 m/s流速下减少了21%、49%、74%。由于持续低流速运行时颗粒物会不断沉降并形成致密沉积层,而复合流速通过周期性引入短时高流速,在流体剪切力作用下破坏沉积物表层结构,打断生物膜连续发育过程,有效抑制沉积物的长期累积。可见,当实际管道流速持续在0.3 m/s以下运行时,通过采用阶段性复合流速运行的措施,可在一定程度上缓解甚至解决污水管道污染物沉积问题。

## 3 结论

① 高流速冲刷对提升污水管道污染物收集效能作用显著,调控流速至0.8 m/s以上时,沉积物

发生明显的冲刷效应。在0.6、0.8、1.0、1.2 m/s流速条件下,COD的平均冲刷强度分别为476、746、1 935、2 835 mg/(L·min),SS的平均冲刷强度分别为666、1 024、1 992、2 556 mg/(L·min),冲刷强度随流速的增加而显著提高。

② 污水污染物的沉积-再悬浮-冲刷-沉积迁移变化过程与污水流速显著相关。在0.1 m/s-0.3 m/s-0.6 m/s-0.3 m/s-0.1 m/s的污水流速动态变化过程中,污水污染物浓度整体呈现“沉积衰减-冲刷提升-沉积衰减”规律,表明污染物沉积和再悬浮的迁移行为受流速变化的直接影响,复合流速引发的剪切力周期性变化显著影响沉积物-污水界面的物质交换。

③ 当污水管道在0.3 m/s以下低流速运行工况时,通过阶段性提升至较高流速的冲刷措施,采用低-高-低复合流速短时冲刷运行模式,可有效减少污染物沉积,提升污染物收集效能,降低污水输送过程中碳源的消耗,有助于污水处理厂进水有机物浓度的提升。

## 参考文献:

- [1] 高晨晨,孙永利,穆莹,等.城市居民生活污水污染物沉积衰减规律及影响[J].中国给水排水,2023,39(3):67-72.  
GAO Chenchen, SUN Yongli, MU Ying, et al. Deposition and attenuation law of pollutants in urban residential domestic sewage and its impact [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(3): 67-72 (in Chinese).
- [2] 韩剑霜,石烜,张建锋,等.污水管道沉积物分层冲刷的起动规律及其污染贡献特性[J].中国环境科学,2023,43(10):5208-5213.  
HAN Jianshuang, SHI Xuan, ZHANG Jianfeng, et al. Starting law and pollution contribution characteristics of stratified sediment scouring in sewage pipes [J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5208-5213 (in Chinese).
- [3] 穆莹,高晨晨,孙永利,等.污水管道沉积底泥污染物利用潜力分析[J].中国给水排水,2023,39(7):114-119.  
MU Ying, GAO Chenchen, SUN Yongli, et al. Analysis of utilization potential of sediment pollutants deposited in sewage pipelines [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 114-119 (in Chinese).

- [4] 石烜,田嘉盟,任博,等. 流态变化对污水管网沉积污染物分布及转化的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3275-3282.  
SHI Xuan, TIAN Jiameng, REN Bo, *et al.* Influence of flow regime changes on the distribution and transformation of sediment pollutants in sewer system [J]. China Environmental Science, 2021, 41(7): 3275-3282 (in Chinese).
- [5] 薛甜,石烜,赵楠,等. 污水管网不同汇流条件下沉积物运移分布规律[J]. 中国给水排水, 2023, 39(7): 107-113.  
XUE Tian, SHI Xuan, ZHAO Nan, *et al.* Migration and distribution of sediment in sewage sewer network under different confluence conditions [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 107-113 (in Chinese).
- [6] LUO H, OBERG N, LANDRY B J, *et al.* Assessing the system performance of an evolving and integrated urban drainage system to control combined sewer overflows using a multiple-layer based coupled modeling approach [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127130.
- [7] 高原,王红武,张善发,等. 合流制排水管道沉积物及其模型研究进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 15-18, 27.  
GAO Yuan, WANG Hongwu, ZHANG Shanfa, *et al.* Current research progress in combined sewer sediments and their models [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 15-18, 27 (in Chinese).
- [8] 王红武,董敬磊,张一龙,等. 排水管道沉积物的动态模拟及方法比较[J]. 中国给水排水, 2017, 33(3): 110-114.  
WANG Hongwu, DONG Jinglei, ZHANG Yilong, *et al.* Dynamic modeling and methods comparison for sewer sediments [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 110-114 (in Chinese).
- [9] 金鹏康,卞晓峥,焦丁,等. 城市污水管网污染物沉积与冲刷释放规律研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 253-257.  
JIN Pengkang, BIAN Xiaozheng, JIAO Ding, *et al.* On the pollutant deposition and erosion release in the urban sewer networks [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 253-257 (in Chinese).
- [10] 桑浪涛,石烜,张彤,等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 1965-1971.  
SANG Langtao, SHI Xuan, ZHANG Tong, *et al.* Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network [J]. Environmental Science, 2017, 38(5): 1965-1971 (in Chinese).
- [11] 任武昂. 城市污水输送、处理过程中氮组分的迁变特性及转化规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
REN Wu'ang. The Study of Migration Characteristics and Transforming Discipline of Nitrogen Compounds in the Transportation and Treatment Process of Urban Wastewater [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese).
- [12] 高月香,张毅敏,张永春. 流速对太湖底泥污染物释放的影响[J]. 环境工程, 2014, 32(8): 10-14.  
GAO Yuexiang, ZHANG Yimin, ZHANG Yongchun. Effects of flow velocity on the release of contaminants from Taihu Lake sediment [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(8): 10-14 (in Chinese).

作者简介:张玮嘉(1996- ),女,湖南湘潭人,硕士,工程师,研究方向为污水处理提质增效及管网效能诊断。

E-mail:zwj18813039899@126.com

收稿日期:2025-03-04

修回日期:2025-04-08

(编辑:刘贵春)