

城市排水与
雨洪管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.018

南方沿海城市分流制排水系统管道沉积物特征分析

康瑞鹏¹, 毕东河¹, 卢伟¹, 朱敏¹, 陈泽鹏¹, 黄鑫妮¹,
黎小源², 张尚中², 蔚阳³

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 2. 东清合创<深圳>环境科技有限公司, 广东 深圳 518004; 3. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518071)

摘要: 对南方沿海城市分流制排水管网的沉积物特征进行了分析。结果表明,研究区域的雨水和污水管道沉积物均未检测出苯并(a)芘、苯酚、氰化物、多氯联苯等常见有毒物质;公园绿地区的雨水管道沉积物中无机物、硫化物、全氮、石油烃(C₁₀~C₄₀)、总磷含量都较其他区域要低;排水管道沉积物中的颗粒以0.05~2.0 mm的砂粒为主,而在公园绿地区粒径较小的粉粒和黏粒占比也较大,说明地表植被可以有效阻滞大颗粒物进入排水系统;雨水管道沉积物中重金属含量排序为:工业区>居民区>公园绿地区;管道沉积物中的微生物以 *Christensenellaceae-R-7-Group*、*Acinetobacter* (不动杆菌)和 *Desulfovibrio* (硫化振动菌)为优势菌属。

关键词: 排水系统; 管道沉积物; 颗粒组成; 面源污染控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0119-06

Characteristics of Sediments in Separate Drainage Pipelines in Southern Coastal Cities

KANG Rui-peng¹, BI Dong-he¹, LU Wei¹, ZHU Min¹, CHEN Ze-peng¹,
HUANG Xin-ni¹, LI Xiao-yuan², ZHANG Shang-zhong², YU Yang³

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China; 2. Dongqing Hechuang <Shenzhen> Environmental Technology Co. Ltd., Shenzhen 518004, China; 3. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518071, China)

Abstract: The characteristics of sediment from the separate drainage pipelines in southern coastal cities were analyzed. Common toxic substances such as benzo(a)pyrene, phenol, cyanide and polychlorinated biphenyls were not detected in the sediments from stormwater and sewage pipelines in the study area. The concentrations of inorganic matter, sulfide, total nitrogen, petroleum hydrocarbons (C₁₀~C₄₀), and total phosphorus in the sediment from stormwater pipelines of the park green area were lower compared to those in other regions. The particles in the pipeline sediments were mainly sand particles ranging from 0.05 mm to 2.0 mm, while the proportion of smaller particles such as silt and clay was also higher in park green area, indicating that surface vegetation effectively prevented large particles entering the drainage system. The descending order of heavy metals content in stormwater pipeline sediments was as follows: industrial area, residential area and park green area. The dominant bacterial genera in the pipeline sediments were *Christensenellaceae-R-7-Group*, *Acinetobacter*, and *Desulfovibrio*.

Key words: drainage system; pipeline sediment; particle composition; non-point source pollution control

城市排水管网,无论分流制管网还是合流制管网都会出现沉积物积聚的情况,这会影响管网的过流能力,加剧内涝及污染排放问题。污水管网,由于非满管流设计,在流速较低时,会将污水中的各种污染物进行沉积,包括有机物(如食物残渣、油脂等)和无机物(如砂石、塑料碎片等)。雨水管网按照某一重现期的雨量设计,在小雨及大雨未达到设计峰值时,流速较慢,也会将地表径流携带的灰尘、垃圾、汽车尾气沉降和轮胎磨损物、有毒有害物质等沉积在管道中^[1]。合流制管网同时输送雨水和污水,其沉积物组成更为广泛。沉积物可能会造成管道堵塞,影响管道的正常运行和工作效率,大量沉积物进入水体还可能引发环境危机和公共健康问题^[2-4]。有研究评估,管道沉积物给接纳水体带来的SS负荷占比近60%,高于来自地表径流的比例^[5],而其他负荷,如COD、TP、TN等污染负荷率也可达30%以上^[6]。

管道沉积物的形成与多种因素相关,设计的非满管流,难以避免雨、污水中的污染物在小流量时沉积。此外,水质、管道坡度及微生物种类等也影响沉积类型和程度。由于施工不规范造成的坡度过小甚至逆坡更容易形成沉积。管道中的有机营养物质会促进微生物的生长,与颗粒杂质结合,导致沉积物形成速度加快^[7-9]。水流速度是影响城市污水管道沉积物形成的主要因素之一^[10-11],通过水动力学沉积模型可以模拟水流速度、管道坡度、管道材料黏性等对城市雨水管道中沉积物形成的影响^[12]。

近年来,我国一些大中型城市开始实施或完成了分流制改造工程,以提升污水处理效率,减少城市内涝,提高城市的防洪能力^[13-14]。但由于一般只对市政主干管进行分流,小区仍然是混流状态,改造后的雨水管网可能仍包含一些污水成分。另外,在施工时也易出现错混接问题,导致改造后的分流制排水系统与污水管道中的沉积物性质和迁移等方面的差异性可能不明显,但其沉积物排放的污染也不容忽视。笔者针对南方沿海某城市分流制管网中的管道沉积物,通过采样分析其中的有机物、

重金属、微生物等,确定沉积物中的污染物种类和含量、理化和生物特性,探讨影响沉积物形成和迁移的因素和机制,以期城市排水管道风险安全评估、城市面源污染控制、城市管道维护运营等提供参考。

1 研究方法

深圳市位于广东省南部,是一座海滨城市,水系发达,河流共310条,属亚热带季风气候,降水丰沛,年平均降水量为2 072 mm,其中宝安区年平均降水量为1 632 mm。研究对象为宝安区的排水管道沉积物。根据土地使用情况,选取了具有代表性的3个区域类型,分别为居民生活区、公园绿地区及工业区。采样均在排水干管检查井进行,干管直径为DN800,材料为混凝土。对研究区域2023年的降雨特征进行统计分析,全年降雨前期连续干天<1周的频次占比为60%,超过2周的全年有3次,占比为10%;全年降雨量为中雨的频次占比为48.1%,中雨以上频次占比为15.6%;全年小时降雨强度>2.08 mm/h的频次占比为7.9%。综合考虑前期连续干天和最大小时降雨强度等因素,本研究选取一场典型中雨进行雨后采样,其前期干天为8 d,降雨强度随降雨历时的变化如图1所示,24 h降雨量为12.1 mm,小时最大降雨强度为3.2 mm/h。

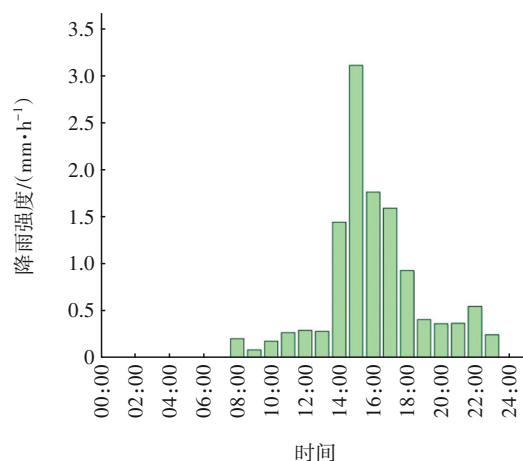


图1 采样前降雨强度过程线

Fig.1 Process line of rainfall intensity before sampling

根据研究目的选取pH、全氮、含水率、多氯联苯、总磷、有机质、机械组成、氟化物、氰化物、水溶

性盐总量、汞、石油烃($C_{10}\sim C_{40}$)、砷、硫化物、苯并(a)芘、苯酚、铁、铅、铜、铬、锌、锰、镉、镍等24项理化指标,参照2019版《土壤环境监测分析方法》及相关文献方法进行采样、前处理及分析。对居民区管道沉积物的微生物群落选择16S rRNA基因序列进行扩增和高通量测序,通过生物信息学工具对测序数据进行质量控制、比对、OTU聚类,得到各个样本中的微生物种类和丰度信息。

2 结果与讨论

2.1 非金属成分含量

排水管道沉积物来自地表径流,又随径流冲刷进入河流水体。地表径流中的污染物可能来自大气沉降、汽车尾气、轮胎磨损、道路摩擦、工业生产等,其中的毒性物质直接排放,不仅影响水环境,还可能通过供水系统危害人类健康,而目前对管道沉积物中的毒性物质研究较少。本研究结果表明,苯并(a)芘、苯酚、氰化物、多氯联苯等这些来自汽车尾气、橡胶软化剂、工业生产的常见毒性物质在管道沉积物中并未检出,说明研究区域并没有相关污染源,或者这些污染源受到了严格的控制和管理,排除了该区域管道沉积物中毒性物质的威胁。

不同区域排水管道沉积物中的非金属成分含量如表1所示。工业区雨水管道沉积物中的石油烃($C_{10}\sim C_{40}$)含量最高,约为公园绿地区的4倍,说明土地利用类型对管道沉积物的影响较大。与其他区域相比,公园绿地区的雨水管道沉积物中硫化物、全氮、石油烃($C_{10}\sim C_{40}$)、总磷含量都较低,但氟化物含量较其他区域要高。这是因为公园绿地区的土壤渗透性好,减少了地表径流,植被可以减少雨水对土壤的冲刷,使径流速度减慢,利于绿植及微生物吸附和降解径流中的SS及其他物质;而氟化物常用作杀虫类农药,如氟化磷、硫氟磷和氟甲酰胺等,可能在绿地园林使用了相关虫情管理药物,随着降雨冲刷进入管道而沉积。工业区雨水管沉积物的全氮含量为0.333%,比居民生活区污水管道沉积物中的全氮含量(0.215%)还要高,这说明工业区的生产活动对营养物质的贡献不容忽视。在居民生活区,污水管道沉积物中的全氮、总磷、氟化物含量都要高于雨水管道沉积物,这也符合污水管道常年输送高有机质、高氮磷生活污水的特点。不同区域管道沉积物中的主要成分不同,同一区域污水管道

与雨水管道沉积物中的污染物占比也不同。因此,针对不同区域及类型的管道沉积物,需采用不同的控制与管理方法。

表1 不同区域排水管道沉积物中的非金属成分含量

Tab.1 Content of non-metallic components in sediment of drainage pipelines in different regions

项 目	雨水管道沉积物			污水管道沉积物
	工业区	公园绿地	居民生活区	居民生活区
pH	7.62	8.00	7.67	7.01
全氮/%	0.333	0.079	0.16	0.215
总磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1 200	542	1 100	1 720
氟化物/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	357	571	272	338
石油烃($C_{10}\sim C_{40}$)/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	342	83	152	81
硫化物/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	348	68.6	309	317

2.2 机械组成

图2为不同区域管道沉积物的机械组成、含水率及有机质含量(Y代表雨水管道、W代表污水管道)。各区域管道沉积物中的颗粒以尺寸介于0.05~2.0 mm的砂粒为主,这是因为较大粒径的颗粒物更容易沉积、较小的颗粒更容易被水流携带排出系统。在公园绿地区雨水管道沉积物中,粒径较小的粉粒和黏粒占比也较大,这说明植被覆盖能够有效阻挡雨水直接冲刷地表,减少土壤侵蚀,植被阻滞作用降低了径流中较大悬浮颗粒物的迁移,而较小的粉尘颗粒由于雨水冲刷形成悬浮固体颗粒流入管道,部分沉积下来。在居民生活区,雨水和污水管道沉积物的机械组成近似,污水管道沉积物中的有机质含量略高于雨水管道,说明该区域雨、污管道输送的水质差异并不大,这是因为该区域的雨污分流主要是市政干管,而源头小区及楼宇并未彻底分流,周边大量城中村,无法进行彻底雨污分流。此外,位于商铺旁的雨水算子,经常有生活污水及餐饮废水甚至油脂垃圾倾倒,导致该区域雨水管道沉积物组分与污水管道相近。从沉积物含水率与有机质含量的曲线整体变化来看,有机质对水分具有较强的吸附能力,有机质含量高,则具有更高的含水率。综上所述,大粒径(>0.05 mm)的砂粒占据管道沉积物的主要部分,有机质含量影响沉积物的含水率,公园绿地因为草坪绿植的阻滞作用,

大粒径砂粒明显减少。降雨时,沉积物直接排入受纳水体造成面源污染,因此从源头-过程-末端进行污染物控制非常必要。源头小区如不能彻底分流,应进行截流,加强民众意识,加强雨水管污水倾倒管控;其次,管道应进行日常维护,防沉积,清理沉积物;最后,建立分散的雨水调蓄和处理设施,防止高浓度雨污混流水直排。

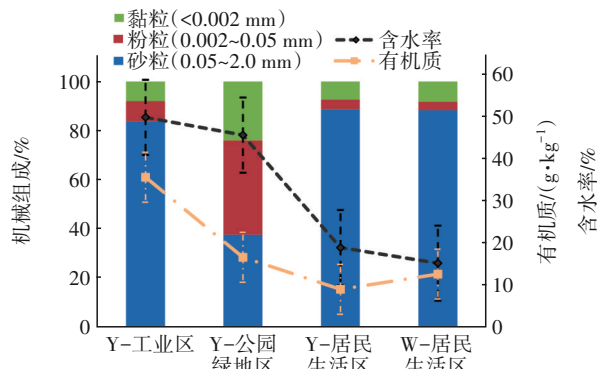


图2 管道沉积物的机械组成、含水率及有机质含量

Fig.2 Mechanical composition, moisture content and organic matter content of pipeline sediments

2.3 重金属成分含量

排水管道沉积物中的重金属含量见图3。

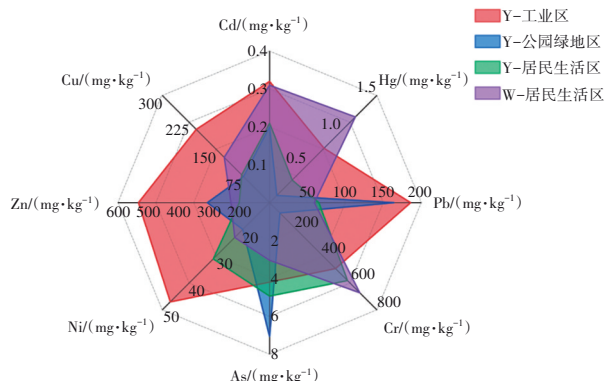


图3 不同区域排水管道沉积物中的重金属含量对比

Fig.3 Comparison of heavy metal contents in sediments of drainage pipelines in different regions

工业区管道沉积物中各类重金属含量均较高,雷达图中围成的面积最大,其中铅、锌、铜含量分别为186、532、205 mg/kg。铅通常在电池、电子行业广泛应用,铜、锌材料大量用于机械加工行业,而该工业区以电子、机械制造加工业为主,这说明排水管网中重金属受到了生产活动的影响,重金属通过沉降,随降雨进入排水系统。公园绿地区管道沉积物中砷和铅的含量(7.6和164 mg/kg)明显高于居民生

活区(4.93和65.1 mg/kg),砷、铅可能与大面积的园林施肥及防病害药物喷洒有关。铬可能来源于建筑钢材风化、磨损过程,公园绿地区因建筑物相比较少,管道沉积物中的铬含量为77 mg/kg,明显低于其他区域。

总体来看,排水管道沉积物中的重金属含量与《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)中污泥产物的污染物浓度限值相比,均小于A标准允许的农用地类型,包括耕地、园地、牧草地等的限值。对于排水管道清淤产生的污泥的资源化利用,可以经过处理进行土地利用,或者转化为建材等。

2.4 微生物群落结构

居民生活区排水管道沉积物中各水平微生物分类单元数统计如图4所示。来自污水管道与雨水管道的沉积物样品中的Taxa分类单元数未显示出明显的差异性,表明相同区域排水管道的微生物多样性相似,微生物群落的稳定性相似。

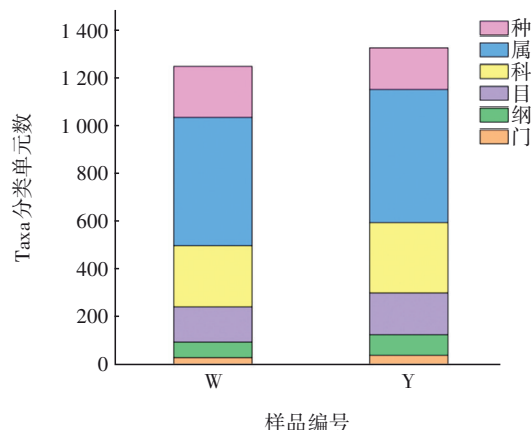


图4 居民生活区排水管道沉积物中各水平微生物分类单元数统计

Fig.4 Statistics of microbial taxonomic units at various levels in sediments of drainage pipelines in residential area

图5所示为居民生活区排水管道沉积物样品中相对丰度排名前20的属水平微生物组成。污水管道沉积物中属水平微生物相对丰度排名前3的是 *Simplicispira* (简单螺旋菌属, 6.44%)、*Rhodobacter* (红细菌属, 5.69%)、*Trichococcus* (三毛球菌属, 3.97%), 这3类菌属在雨水管道沉积物中的相对丰度分别为0.07%、0.08%、0.28%。雨水管道沉积物中属水平微生物相对丰度排名前3的是 *Christensenellaceae-R-7-Group* (7.26%)、*Bacteroidetes-Vadinha17* (2.88%)、*Limnobacter* (2.85%), 这3类微生物菌属在污水管道

沉积物中的相对丰度分别为0.9%、0.05%、0.67%。*Rhodobacter*在无氧环境下可以利用硫化物、亚硝酸盐等无机物质进行呼吸,与雨水管道相比,污水管道的环境更适合该菌属生长繁殖。*Limnobacter*可代谢甲基硫醇,这是一种存在于淡水环境中的硫化化合物,*Limnobacter*在雨水管道中相对丰度较高,说明雨水管道中更倾向是一个淡水环境并存在一定量的硫化化合物。

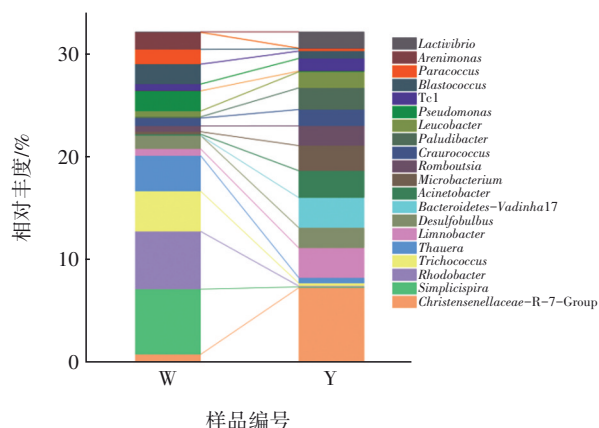


图5 居民生活区排水管道沉积物样品中相对丰度排名前20的属水平微生物组成

Fig.5 Composition of the top 20 genus level microorganisms with relative abundance in sediment samples of drainage pipelines in residential area

OTUs分类单元出现频率可反映一个OTU的普遍性或特异性,居民生活区排水管道沉积物样品中OTUs出现频率最高的10个菌属如图6所示(Y-W表示Y和W样品共有)。Y样品(雨水管道沉积物)中占据主导地位的菌属为*Christensenellaceae-R-7-Group*、*Acinetobacter*(不动杆菌)和*Desulfovibrio*(硫化振动菌),OTUs出现频率分别为3.61%、1.44%和1.31%。对应在Y-W的OTUs出现频率为5.24%、1.35%和2.04%,反映了雨水和污水管道沉积物中微生物群落组成的相似性。*Christensenellaceae-R-7-Group*、*Acinetobacter*和*Desulfovibrio*是雨水和污水管道沉积物样品共有的主要菌属。从已知的生物学特性和功能来看,*Acinetobacter*能降解多种有机污染物;*Desulfovibrio*以硫酸盐为电子受体进行呼吸,产生硫化氢,适宜无氧或低氧环境,与沉积物中硫化物及有机质的成分和含量相关,反映了管道沉积微生物与管道内部环境之间的作用,这对于提高管道沉积物的微生物降解效率以及处理工艺选择具

有指导意义。

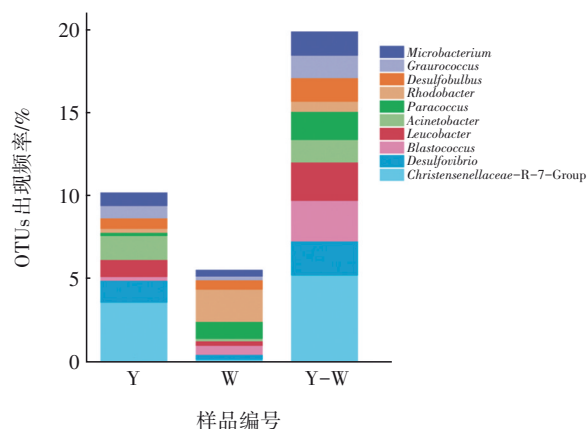


图6 居民生活区排水管道沉积物样品中OTUs出现频率最高的10个菌属

Fig.6 Top 10 bacterial genera with the highest frequency of OTUs in sediment samples of drainage pipelines in residential area

3 结论

① 研究区域的排水管道沉积物中未检测出苯并(a)芘、苯酚、氰化物、多氯联苯等常见毒性物质。受区域环境和生产生活影响,工业区雨水管道沉积物中的硫化物、石油烃($C_{10}\sim C_{40}$)及全氮含量较高,公园绿地区雨水管道沉积物中的氟化物、居民生活区污水管道沉积物中的磷含量相对较高,不同功能区管道沉积物具有各自的特点,可为不同土地利用区域的特征污染物监测、控制及管理提供参考。

② 排水管道沉积物的颗粒粒径分布表明,公园绿地能够有效减少地表大粒径砂粒的冲刷。管道沉积物的含水率与有机质含量呈正相关,较高含量的有机质会吸附更多水分,这可为排水管道沉积物的处理、脱水、砂粒资源化利用提供参考。

③ 排水管道沉积物中的重金属含量均小于《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)中的A标准限值,满足就地土地利用、资源化利用要求。

④ 居民生活区污水和雨水管道微生物群落在组成上具有相似性,其中优势菌属*Acinetobacter*(不动杆菌)和*Desulfovibrio*(硫化振动菌)的功能特性可为研究管道沉积物的微生物降解提供参考。

参考文献:

[1] 黄鑫妮,康瑞鹏,朱敏.排水管网沉积物的特征、危

- 害及控制措施[J]. 清洗世界, 2022, 38(11): 182-184, 187.
- HUANG Xinni, KANG Ruipeng, ZHU Min. Characteristics, hazards and control measures of sediments in drainage pipe networks [J]. *Cleaning World*, 2022, 38(11): 182-184, 187 (in Chinese).
- [2] 付博文. 城市污水管道中污染物沉积特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
- FU Bowen. Study on the Deposition Characteristics of Pollutants in Urban Sewage Pipelines [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016 (in Chinese).
- [3] ASHLEY R, CRABTREE B, FRASER A, *et al.* European research into sewer sediments and associated pollutants and processes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(4): 267-275.
- [4] 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.
- 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 (in Chinese).
- [5] 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 and Technology*, 2006, 54(6/7): 109-117.
- [6] 徐尚玲. 城市排水管道沉积物径流冲刷污染效应的研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2013.
- XU Shangling. Study on the Effect of Runoff Erosion Pollution of Sediment in Urban Drainage Pipe [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013 (in Chinese).
- [7] 王健, 刘国华, 齐鲁, 等. 城市排水管道沉积物与污水间物质转移转化研究进展[J]. 中国给水排水, 2021, 37(24): 34-44.
- WANG Jian, LIU Guohua, QI Lu, *et al.* Research progress in material transformation between sediment and sewage in urban drainage pipeline [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(24): 34-44(in Chinese).
- [8] LIU Y W, NI B J, GANIGUE R, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments [J]. *Water Research*, 2015, 70: 350-359.
- [9] JIN P K, WANG B, JIAO D, *et al.* Characterization of microflora and transformation of organic matters in urban sewer system [J]. *Water Research*, 2015, 84: 112-119.
- [10] 郭海泉. 西安市截流干管水质水量变化规律与解析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
- GUO Haiquan. Variation Law and Analysis of Water Quality and Quantity of Interception Main Pipe in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [11] 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).
- [12] BERTRAND-KRAJEWSKI J L, CHEBBO G, SAGET A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon [J]. *Water Research*, 1998, 32(8): 2341-2356.
- [13] 赵一涛. 城市雨污分流改造的问题及其技术措施研究[J]. 四川建材, 2023, 49(1): 222-224.
- ZHAO Yitao. Research on the problems and technical measures of urban rainwater and sewage diversion transformation [J]. *Sichuan Building Materials*, 2023, 49(1): 222-224 (in Chinese).
- [14] 陶媛. 海绵城市建设理念在老旧小区雨污分流改造中的实践[J]. 中国市政工程, 2020(3): 56-59, 131.
- TAO Yuan. Practice of sponge city construction concept in the transformation of rain and sewage diversion in old residential areas [J]. *China Municipal Engineering*, 2020(3): 56-59, 131 (in Chinese).

作者简介:康瑞鹏(1995-),男,山西祁县人,硕士,工程师,主要研究方向为排水管网的优化设计、管网系统的智慧控制。

E-mail:1286808986@qq.com

收稿日期:2024-01-23

修回日期:2024-06-17

(编辑:刘贵春)