

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.018

污水管道沉积底泥污染物利用潜力分析

穆莹^{1,2}, 高晨晨^{1,2}, 孙永利^{1,2}, 李思雨^{1,2}, 郑兴灿^{1,2}, 李鹏峰^{1,2},
张文安^{1,2}

(1. 中国建设科技集团股份有限公司, 北京 100120; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 以华北地区某城市污水管道沉积底泥为研究对象,在分析底泥中碳、氮、磷和VSS/SS等常规污染物含量及其组分占比的基础上,探索城市污水管道沉积底泥污染物向上覆水溶出的条件及其碳源应用于污水处理的潜力。结果表明:污水管道沉积底泥污染物中碳、氮、磷含量较高,且具有高COD/TN、高COD/TP特征,比值分别达到37.8和180.4,且BOD₅/TN和BOD₅/TP分别达到8.4和40.3;适宜的搅拌-沉淀作用能够实现沉积底泥中可生物利用碳源的高效提取,同时上覆水中的BOD₅/TN和BOD₅/TP可分别提升至11.2和48.4,有机组分占比从35%提高至52%。

关键词: 污水管道; 沉积底泥; 污染物特征; 碳源可利用性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0114-06

Analysis of Utilization Potential of Sediment Pollutants Deposited in Sewage Pipelines

MU Ying^{1,2}, GAO Chen-chen^{1,2}, SUN Yong-li^{1,2}, LI Si-yu^{1,2}, ZHENG Xing-can^{1,2},
LI Peng-feng^{1,2}, ZHANG Wen-an^{1,2}

(1. China Construction Technology Consulting Co. Ltd., Beijing 100120, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: This paper analyzed the content and proportion of conventional pollutants such as carbon, nitrogen, phosphorus and VSS/SS in the sediment from a municipal sewage pipeline in North China, and explored the dissolution conditions of sediment pollutants to overlying water in the municipal sewage pipeline and the utilization potential of carbon sources for sewage treatment. The content of carbon, nitrogen and phosphorus in the sediment from the sewage pipeline was high and characterized by high COD/TN and COD/TP (37.8 and 180.4). In addition, the BOD₅/TN and BOD₅/TP were 8.4 and 40.3, respectively. Proper stirring-sedimentation process achieved efficient extraction of biodegradable carbon sources from the sediment. The BOD₅/TN and BOD₅/TP in overlying water increased to 11.2 and 48.4, respectively, and the proportion of organic components increased from 35% to 52%.

Key words: sewage pipeline; deposited sediment; pollutant characteristics; carbon source availability

基金项目: 中国建设科技集团科技创新基金-重大科技攻关项目(Z2022C02); 住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-166); 中国建设科技集团科技创新基金-青年基金资助项目(Z2021Q09)

通信作者: 孙永利 E-mail: tjsunyongli@163.com

我国城镇污水管网低流速、高液位运行导致的污染物沉积问题较为普遍,且在短期内难以根治。据相关研究,我国大管径的合流制管道在远距离输送过程中污染物沉积率高达40%,北京、广州、西安等多地区域内50%~90%的排水管道存在不同程度淤积现象^[1-2]。同时,污水中颗粒物沉积过程常携带大量碳源,导致污水处理厂进水碳氮比、碳磷比低,为满足污水处理出水氮、磷达标排放要求,污水处理厂在实际运行中常常不得不额外投加碳源。随着国家“双碳”战略推进,污水中碳源流失、污泥清掏运输工作量大及处理处置效率较低等工程问题日渐凸显。此外,当雨季来临时,合流区域内大量径流雨水将沉积物冲刷入河还会造成水体污染,甚至反复黑臭^[3-4]。有研究表明,暴雨发生时受纳水体30%~80%的污染负荷来源于溢流排放的管道沉积物^[5-6]。

目前,学者针对管网底泥的研究多侧重于不同粒径分布、微生物对污染物的迁移转化作用以及底泥中重金属污染物的含量分析等,对污水管道沉积底泥中碳源提取利用潜力的研究尚不多见。实际上,管道底泥富含高碳低氮磷的优质碳源且有机质丰富,结合污水处理厂对进水碳源的需求,以及进水碳氮磷比例失调的现状,有必要进行从底泥中分离提取高碳低氮磷形式碳源作为污水处理厂进水补充碳源的研究,从而有效减少污水处理厂外加碳源投加量。据此,笔者开展了相关试验研究,在进一步了解管道底泥泥质特征的基础上,探索从底泥中提取碳源应用于污水处理的可行性,以期将底泥“变废为宝”。

1 材料与方法

1.1 底泥来源

测试底泥为2022年4月取自华北地区某城市多个点位的市政污水管道沉积底泥混合物,取样前一周内无雨雪等特殊气候条件影响。取样底泥表明明显可见大颗粒砂石以及卫生纸、树叶等杂质。管道底泥的基本特性表现如下:含水率为77.5%,VSS/SS为35%,以小于2 mm的泥沙为主要物质,其大于10 mm、5~10 mm、2~5 mm和小于2 mm的粒径占比分别为2%、2%、4%和92%。

1.2 试验条件及方法

本研究重点对底泥中污染物组分含量及其碳

源作为污水处理厂进水补充碳源的可行性进行测试分析。

1.2.1 污水管道底泥污染物组分含量测试

目前尚无针对管道底泥的标准分析方法,本研究对管道底泥有机组分含量的测定参照《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)中有机物含量测试方法,以VSS/SS表示。COD、溶解态化学需氧量(SCOD)、BOD₅、TN、STN、NH₃-N、NO₃⁻-N、TP、溶解态总磷(STP)、PO₄³⁻-P各项指标的测定参考《水和废水监测分析方法》(第4版),均以单位干质量底泥中含量核算。

除有机组分含量为全污泥测试外,其他指标在测试前需剔除2 mm以上的大粒径颗粒物,将污泥充分混匀后以蒸馏水稀释至相应测试倍数,并在泥水混合物搅拌为均质状态下进行取样测试,试验所用分析数据为多次测试的均值。

1.2.2 提取底泥中碳源的可行性

结合实际工程的可操作性,选择自来水为污染物提取介质,测试不同试验条件下底泥中碳、氮、磷各组分释放或悬浮于上覆水的情况,筛选有利于提取底泥中可生物利用碳源且能够提高上覆水中BOD₅/TN、BOD₅/TP及VSS/SS的条件。本研究中底泥和自来水的混合质量比为1:3,并采用2 mm筛网过滤混合液以避免砂石和杂质的影响,试验条件见表1。

表1 搅拌-沉淀试验条件

Tab.1 Stirring-sedimentation test conditions

项目	搅拌力度/ ($r \cdot \min^{-1}$)	搅拌持续 时间/min	沉淀时间/ min
a	0	0	0
b	80	15	0
c	80	10	5
d	0	0	15

2 结果与讨论

2.1 污水管道底泥污染物组分含量分析

为确定从底泥中提取碳源应用于污水处理的潜力,结合污水处理厂进水重点关注水质指标及污水生物处理过程对高碳氮比、高碳磷比的需求,测试分析底泥中不同形态碳、氮、磷的含量及占比情况,判别提取底泥中碳源作为污水处理厂进水补充碳源的可行性。

2.1.1 管道底泥中碳、氮、磷含量与组分分析

管道底泥中碳、氮、磷含量丰富,但富集量差异明显,COD、TN和TP含量分别为132.0、3.5和0.73 g/kg,碳含量明显高于氮、磷含量。通过进一步分析发现,管道底泥中碳、氮、磷污染物均以颗粒态为主,含量分别为128.2、2.7和0.67 g/kg,占比分别达到97.1%、77.1%和91.8%。溶解态碳、氮、磷占比高低顺序为氮>磷>碳,虽然溶解态碳组分占比最低,仅为2.9%,但其溶解态含量最高,为3.8 g/kg,明显高于溶解态氮、磷含量。管道底泥中溶解态碳、氮、磷含量高低顺序为碳>氮>磷,具备提取高碳低氮磷形式碳源的条件。

管道底泥碳源中SCOD占比仅为2.9%,而BOD₅占比达到22%,说明底泥的颗粒物中富含大量可生物利用碳源,将颗粒物全部去除不利于可生物利用碳源的高效提取与回用。此外,管道底泥的氮、磷组分中,STN占比为22.9%,以NO₃⁻-N和NH₃-N为主要赋存形态,NO₃⁻-N/STN和NH₃-N/STN分别为39.4%和58.7%;STP占比为8.2%,以PO₄³⁻-P为主要赋存形态,PO₄³⁻-P/STP达到83.6%。这主要是由于管道淤积底泥经长期沉积形成,其含氮、含磷有机物在厌氧条件下发生水解反应,生成氨氮和磷酸盐^[6],未经扰动时常赋存于底泥中。

2.1.2 管道底泥中碳源与氮、磷含量比值

污水管网沉积底泥中碳含量丰富、氮磷含量相对较少,COD/TN和COD/TP分别达到37.8和180.4,远高于许多污水处理厂的进水碳氮比、碳磷比。有研究表明,污水处理厂在实际运行中BOD₅/TN需达到4~5才能满足脱氮需求,而实际上全国城镇污水处理厂在2007年—2017年进水BOD₅/TN的波动范围在3~4之间^[7-8]。另外,污水处理厂进水BOD₅/TP需大于20才能满足生物除磷要求,且比值越高越有利于提高除磷效果^[8]。而管道沉积底泥的BOD₅/TN为8.4,BOD₅/TP为40.3,不仅能满足污水处理过程对除磷脱氮的需求,还有利于提升污水处理厂的进水碳氮比、碳磷比,改善污水处理厂进水水质。

管道沉积底泥碳源丰富、可生化性较高,说明管道底泥碳源有较好的可利用潜力。但其SCOD/STN为4.8,SCOD/STP为62.1,分别低于COD/TN和COD/TP,说明相较于氮磷,底泥颗粒物富含更多的碳物质。而SCOD/STN低于BOD₅/TN,说明颗粒物

富含大量可生物利用碳源,可以通过进一步提取颗粒物中可生物利用碳源,实现提取液中BOD₅/COD的提高。

管道底泥中碳、氮、磷的富含量与管网运行状况密切相关,当管网低流速运行时,碳、氮、磷等污染物协同颗粒物沉降富集,其中溶解性物质通常不会沉淀,且长期沉积在管道内的含氮、含磷有机物还可能发生水解反应,向水中释放氨氮、磷酸盐等^[3]。因此,管道底泥总体呈现高碳氮比、高碳磷比的特征。

2.2 搅拌-沉淀作用对上覆水污染物的影响

管道底泥碳源丰富且呈现高碳氮比、高碳磷比的特征,但底泥中无机组分占比相对较高,无法直接用于污水处理。本研究通过搅拌-沉淀试验,筛选有利于分离底泥中无机组分、提取底泥中可生物利用碳源、降低氮磷释放量的试验条件,实现底泥中可作为污水处理厂进水补充碳源的高BOD₅/TN、高BOD₅/TP、高VSS/SS的物质提取。

2.2.1 对上覆水中碳浓度及组分占比的影响

搅拌和沉淀作用对上覆水中碳浓度及组分占比的影响见图1。

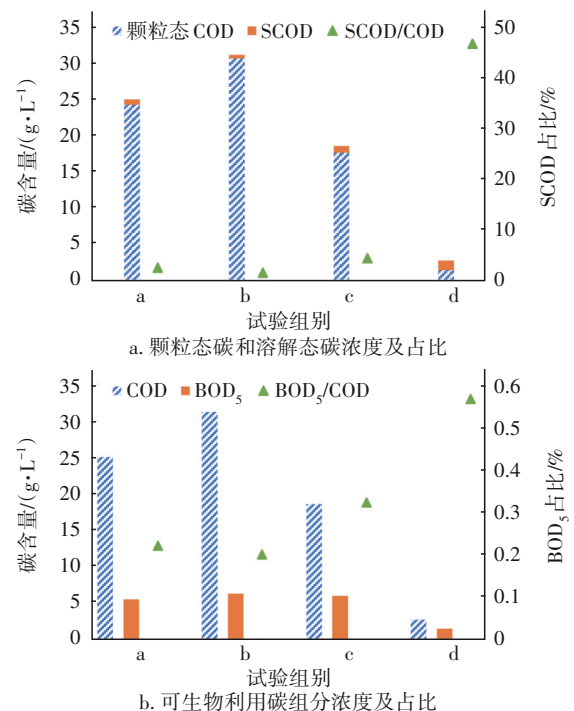


图1 搅拌和沉淀作用对上覆水碳浓度及组分占比的影响

Fig.1 Effects of stirring and sedimentation on carbon concentration and component proportion in overlying water

由图1可知,在搅拌作用下,相较于a组,b组上覆水中BOD₅和COD浓度均有所提高,分别增加了14.3%和24.6%,说明搅拌作用有利于BOD₅和COD从底泥中释放,但在持续搅拌作用下BOD₅/COD较低,不利于提高上覆水中可生物利用碳源占比。

相较于a组,d组经持续沉淀作用,上覆水中颗粒态COD浓度明显降低且SCOD浓度有所升高,SCOD/COD达到47.2%。此外,d组上覆水中BOD₅/COD也明显上升,达到0.56,说明上覆水中可生物利用碳源占比明显提升,但d组经持续沉淀作用后BOD₅在上覆水中的浓度明显降低,降幅达到71%。因此,沉淀作用虽然能够提升上覆水中可生物利用碳源占比,但却会明显减少其浓度,不利于实现可生物利用碳源的高效提取。

在上覆水中,相较于a组,c组颗粒态COD浓度降低了27.2%,且SCOD浓度升高了25%,SCOD/COD有所升高。此外,c组BOD₅浓度较a组升高了8.9%,较b组虽略有降低,但BOD₅/COD较a、b两组均明显提高。c组BOD₅/COD虽低于d组,但BOD₅浓度明显高于d组,说明在c组条件下,可以在从底泥提取可生物利用碳源的同时,提高上覆水的BOD₅/COD。

2.2.2 对上覆水中氮浓度及组分占比的影响

搅拌和沉淀作用对上覆水中氮浓度及组分占比的影响见图2。可知,各组上覆水中STN浓度均略有升高,且均以NH₃-N和NO₃⁻-N为主要成分,其中b、c、d三组中NH₃-N浓度约为NO₃⁻-N浓度的2~3倍。相较于a组,c组的STN增幅最大,为20%。d组因沉淀作用颗粒态氮与总氮均明显降低,降幅分别达到90.5%和68.6%。相较于颗粒态氮,各组的STN浓度差异较小。

相较于a组,b、c、d三组的NH₃-N浓度均有所升高,其中c组增幅最大,达到24 mg/L,d组增幅最小,仅为4 mg/L。这主要是由于搅拌作用可将底泥中水解产生的氨氮溶解至液相,且延长搅拌时间可使底泥中氨氮充分释放,而d组仅受沉淀作用影响,不利于氨氮的溶解释放。此外,搅拌过程中上覆水表层充分复氧,部分氨氮可发生氧化反应,而沉淀过程未持续提供复氧条件,因此c组的氨氮浓度略高于b组。

相较于a组,b、c、d三组的NO₃⁻-N浓度均略有降低,其中d组降幅最大,达到21 mg/L,b组降幅最

小,为13 mg/L。b、c两组在持续搅拌作用下,一方面表层复氧作用使NH₃-N氧化生成NO₃⁻-N,另一方面下层溶液中NO₃⁻-N经缺氧反硝化生成N₂,这两个过程可能同时发生。c组在搅拌后经过了一定沉淀时间,NH₃-N氧化生成NO₃⁻-N的作用降低,而NO₃⁻-N的缺氧反硝化作用提高,因此c组的NH₃-N浓度高于b组,而NO₃⁻-N浓度低于b组。d组在持续沉淀过程中维持了上覆水的缺氧环境,NO₃⁻-N浓度最低。因此,沉淀作用更有利于实现上覆水中较低的TN浓度,并满足NH₃-N和NO₃⁻-N浓度处于较低水平。

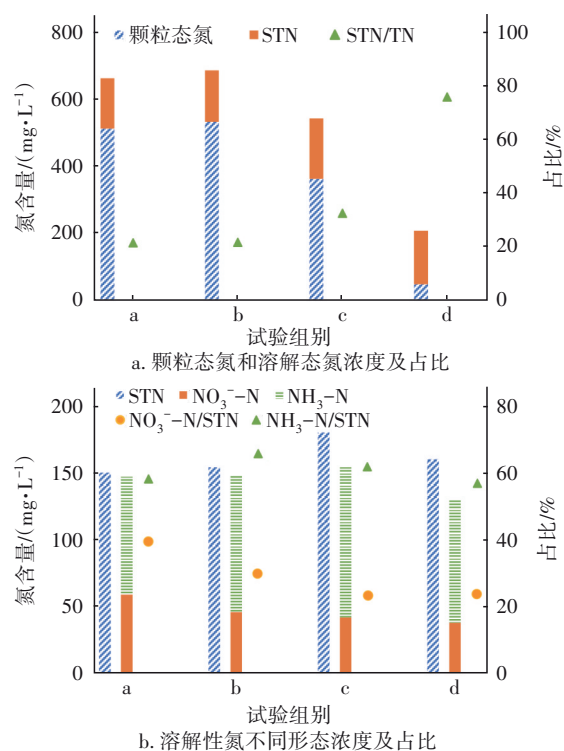


图2 搅拌和沉淀作用对上覆水氮浓度及组分占比的影响
Fig.2 Effects of stirring and sedimentation on nitrogen concentration and component proportion in overlying water

2.2.3 对上覆水中磷浓度及组分占比的影响

搅拌和沉淀作用对上覆水中磷浓度及组分占比的影响见图3。可知,d组上覆水中TP浓度最低,最有利于实现上覆水中较低的TP浓度。而且d组的颗粒态磷浓度明显降低,较a组降幅为91.4%,但STP和PO₄³⁻-P浓度明显高于其他组。这是因为试验开始时,泥水初始混合过程将底泥中的含磷有机物在管道厌氧条件下水解产生的PO₄³⁻-P溶解至溶液中,且持续的沉淀过程为缺氧/厌氧微生物创造了

环境条件,有利于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的释放,因此d组的STP/TP最高,达到59.0%。

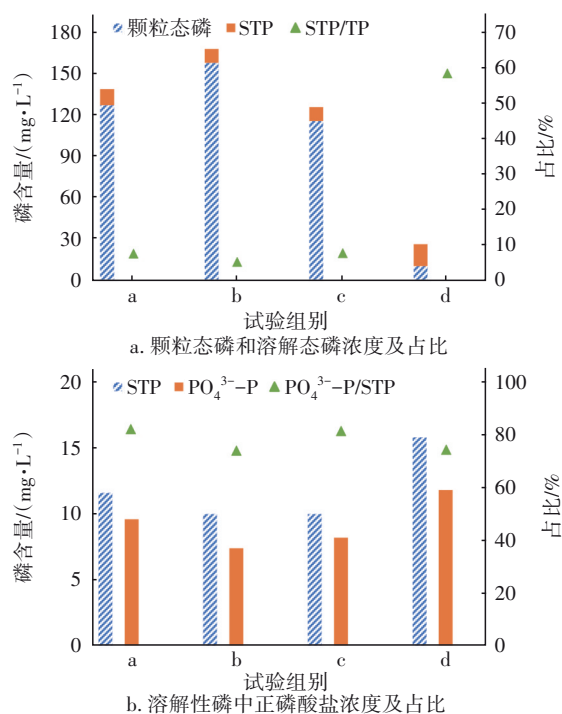


图3 搅拌和沉淀作用对上覆水磷浓度及组分占比的影响
Fig.3 Effects of stirring and sedimentation on phosphorus concentration and component proportion in overlying water

由图3可知,各组试验条件下 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均为STP的主要组成, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ /STP均在80%左右,其中b、c两组上覆水中的STP随同 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较a组有所降低,且b组的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度降幅略大于c组。这是因为搅拌作用在混合液表层提供复氧条件,为微生物创造了好氧吸磷环境,因此 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度降低,而c组较b组减少了搅拌时长,缩短了好氧吸磷过程, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度降低较少。因此,把控适宜的搅拌及沉淀时间有利于同时降低各形态的磷浓度。

2.3 提取底泥中碳源的可行性

从以上数据分析结果可知,污水管网沉积底泥中不仅碳物质含量丰富,而且其 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 远高于污水处理厂进水,表明管道底泥中的碳源具有较高可利用潜力。但管道底泥中泥沙类无机组分的含量较高,直接投加至污水处理厂进水有可能增加其SS运行负荷,因此需关注提取液中的VSS/SS情况,选取有利于提高提取液中有机组分占比的条件。

搅拌和沉淀作用对上覆水中 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP

的影响见图4。由 BOD_5/TN 来看,相较于a组,c组提高了33%,而d组在沉淀作用下比值反而降低了8.3%。这是因为虽然沉淀作用更有利于降低上覆水中TN浓度,但TN降幅低于 BOD_5 降幅,因此,搅拌-沉淀作用最有利于提高上覆水中的 BOD_5/TN 。由 BOD_5/TP 来看,c组和d组分别由a组的40.3提高至48.4和59.7,说明沉淀作用更有利于提高上覆水中的 BOD_5/TP 。

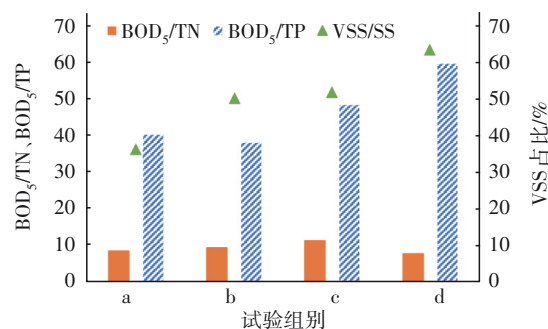


图4 搅拌和沉淀作用对上覆水中 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 与VSS/SS的影响

Fig.4 Effects of stirring and sedimentation on BOD_5/TN , BOD_5/TP and VSS/SS in overlying water

由图4还可知,搅拌和沉淀作用都有利于提高上覆水中有机组分占比,b组和c组的VSS/SS分别由a组的37%提高至50%和52%,而d组提高至64%,可见沉淀作用更有利于提高上覆水中有机组分占比。

由上述分析可知,沉淀作用有利于提高上覆水中的 BOD_5/TP 、VSS/SS和 BOD_5/COD ,降低TN、TP在上覆水中浓度,且沉淀时间越长作用越明显,但仅有沉淀作用并不利于高效提取可生物利用碳源以及提高 BOD_5/TN 。综合对比发现,适宜的搅拌-沉淀作用更有利于提高上覆水中的 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 和VSS/SS,同时实现生物可利用碳源的高效提取。

3 结论

① 污水管道底泥中碳、氮、磷含量丰富,且均以颗粒态为主,占比分别达到97.1%、77.1%和91.8%;STN以 NO_3^- -N和 NH_3 -N形态为主,分别占比39.4%和58.8%;STP以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主,占比为83.6%。

② 底泥中的碳、氮、磷组分具有高 COD/TN 、高 COD/TP 特征,比值分别达到37.8和180.4;且可生物利用碳源丰富, BOD_5/TN 和 BOD_5/TP 也可达到8.4和40.3;同时,管道底泥泥沙及杂质较多,无机

组分占比高,VSS/SS仅为35%。

③ 搅拌作用能够降低上覆水中的STP和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,减少可生物利用碳源损耗;沉淀作用有利于降低上覆水中颗粒态氮、磷浓度,并提高有机组分占比。因此,适宜的搅拌-沉淀作用更有利于提高上覆水中 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 、VSS/SS,同时实现可生物利用碳源的高效提取。

参考文献:

- [1] 崔爽. 合流制管道沉积物中氮和有机物污染特性研究[D]. 北京:北京建筑大学,2014.
CUI Shuang. Research on Transformation and Pollution Characteristics of Nitrogen and Organics in Combined Sewer Sediments [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014 (in Chinese).
- [2] 付博文,金鹏康,石山,等. 西安市污水管网中沉积物特性研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(17): 119-122,127.
FU Bowen, JIN Pengkang, SHI Shan, *et al.* Sediment characteristics of sewer network in Xi'an City [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 119-122, 127 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] AHYERRE M, CHEBBO G. Identification of in-sewer sources of organic solids contributing to combined sewer over-flows [J]. Environmental Technology, 2002, 23(9): 1063-1073.
- [5] 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.
- [6] 佃柳,郑祥,郁达伟,等. 合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 76-83,94.
DIAN Liu, ZHENG Xiang, YU Dawei, *et al.* Research progress on characteristics and control of combined sewer overflows pollution [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 76-83,94 (in Chinese).
- [7] 李激,王燕,罗国兵,等. 城镇污水处理厂一级A标准运行评估与再提标重难点分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 1-12.
LI Ji, WANG Yan, LUO Guobing, *et al.* Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I-A standard and analysis on emphasis and difficulties in upgrading the standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 1-12 (in Chinese).
- [8] 邹吕熙,李怀波,郑凯凯,等. 太湖流域城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2019, 45(7): 39-45.
ZOU Lüxi, LI Huaibo, ZHENG Kaikai, *et al.* Analysis on the characteristics of influent water quality from wastewater treatment plants in Taihu Basin [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(7): 39-45 (in Chinese).

作者简介:穆莹(1986-),女,天津人,硕士,高级工程师,主要从事污水处理技术开发及相关政策研究。

E-mail:493200861@qq.com

收稿日期:2022-12-08

修回日期:2023-01-05

(编辑:沈靖怡)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福