

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.11.012

铸铁供水管道沉积物污染富集特征

袁海伟¹, 胡露¹, 钟涛¹, 姜兴华¹, 田一君¹, 周乐安²

(1. 环保桥<湖南>生态环境工程股份有限公司, 湖南 长沙 410205; 2. 长沙理工大学
水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 对南方某给水管网采用冰浆清管技术进行清洗,并从冲洗时间、冲洗水理化性质和微生物群落组成等方面分析管道污染状况。结果表明,管道沉积物在冲洗前期释放较快,6 min后水中浊度与颗粒总数达到最大,冲洗水呈碱性,主要金属污染物为管道腐蚀产生的铁和絮凝剂主体物质铝,氯离子在沉积物中的峰值可达11 731 mg/L。TOC的变化表明,有机物在管壁内富集,并为微生物生长提供了碳源。微生物群落结构分析显示,富集的微生物以*Phreatobacter*为主(73%),由于有*Sphingomonas*、*Pseudomonas*被检出(含条件致病菌),需要关注微生物的释放风险。

关键词: 供水管道; 水垢; 沉积物; 冲洗水; 生物富集; 释放风险

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0085-06

Characteristics of Sediment Accumulation in Cast Iron Water Supply Pipelines

YUAN Hai-wei¹, HU Lu¹, ZHONG Tao¹, JIANG Xing-hua¹, TIAN Yi-jun¹,
Zhou Le-an²

(1. Hunan Huanbaoqiao Ecology and Environment Engineering Co. Ltd., Changsha 410205,
China; 2. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science &
Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The ice pigging technology was utilized to clean a water supply network in the South China. Additionally, the pollution status of the pipeline was evaluated by analyzing factors such as flushing duration, the physicochemical characteristics of the flushing water, and the composition of the microbial community. The sediment within the pipeline was released quickly during the initial phase of flushing. After six minutes, the turbidity and total particle count in the water reached their peak values. The flushing water exhibited alkaline characteristics. The primary metallic contaminants identified were iron, resulting from pipeline corrosion, and aluminum, which is the principal component of the flocculant. Notably, the peak concentration of chloride ions in the sediment could reach up to 11 731 mg/L. The variation in TOC suggested an enrichment of organic matter within the pipeline wall, thereby supplying a carbon source that supported microbial growth. Analysis of the microbial community structure revealed that the predominant microorganisms were *Phreatobacter*, with relative abundance accounting for 73%. Given the presence of *Sphingomonas* and *Pseudomonas* (including opportunistic pathogenic bacteria), attention should be directed towards the potential risks associated with microbial release.

基金项目: 芙蓉计划省企业科技创新创业团队支持计划项目

通信作者: 胡露 E-mail: 954267105@qq.com

Key words: water supply pipeline; scale; sediment; flushing water; bioenrichment; release risk

供水管网中污染物的积累引起了科研人员的广泛关注。研究表明,给水经过处理后污染物仅以微量水平存在,但管道具有较强的吸附能力与极大的吸附容量,胶体、微生物和痕量重金属等污染物进入后将富集于铸铁管道水垢和松散沉积物中^[1-3]。一旦管道水垢/沉积物与水相间的平衡失稳时,污染物将通过物理、化学和生物的方式再次释放于水体中,导致供水末端污染物浓度远超出厂水要求,严重时将超出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的限值,危害人体健康^[4-5]。污染物广泛存在于管道水垢/沉积物中,其潜在的生态风险和污染物种类相关。因此,有必要识别和量化管道中污染物的种类与浓度,以更准确地了解管道中污染物水平升高的潜在危害。

笔者选取南方某城市给水厂,对其管道沉积物进行冲洗,提取不同冲洗时间的管道出水水样,并对水样中颗粒物、TOC、金属污染物、阴离子污染物、微生物群落结构特征等进行了表征,通过深入分析与讨论,初步明确了给水管网中固液相失衡带来的污染释放特征。

1 材料与方法

1.1 管道样本收集

南方某城市给水厂的处理工艺包括混凝、沉淀、过滤和消毒,其出水水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。该水厂铸铁管道自2020年开始投入使用,所选管道为DN300,冲洗长度为900 m。对管道进行冲洗时,选取冲洗时间为0、2、4、6、8、12、16、20、30、40、50 min的出水样本进行理化性质测定。取样前,对取样瓶进行灭菌。不同采样时间的水样如图1所示,表观可见在冲洗时间为2~12 min时,冲洗出水呈明显的黄色。

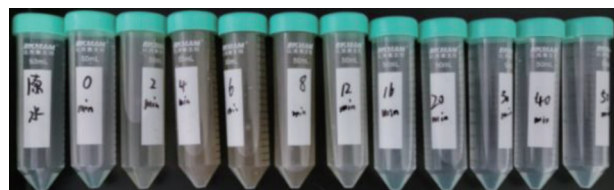


图1 不同采样时间的水样

Fig.1 Water samples at different sampling times

1.2 理化性质分析

分别对不同时间收集的水样进行理化性质分析,包括pH、TOC、浊度、硫酸根、硝酸根、颗粒粒径分布、总硬度、氯离子、常见金属污染物(铁、锰、铜、铝、锌)等。其中pH以pH计进行实时测定;浊度采用浊度仪进行测定;颗粒物粒径采用颗粒计数仪进行测定;总硬度与碱度按照《水和废水监测分析方法》(第4版)中的相关方法进行测定。水样经过0.45 μm滤膜后,金属污染物以电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行定性与定量,阴离子种类(硫酸盐、硝酸盐、氯离子)与浓度采用离子色谱法进行测定,TOC采用TOC仪在通入氮气条件下进行定量分析。

1.3 生物富集情况分析

以无菌PP桶(10 L)分别收集冲洗前后的3份水样,按照DNA提取试剂盒(FastDNA SPIN kit)操作说明提取DNA,并分别在OD₂₆₀与OD₂₈₀处检测DNA的纯度与浓度。扩增引物为338F(5'-ACTCCT-ACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACH-VGGGTWTCTAAT-3'),测序区域为V3-V4^[6]。对DNA扩增产物进行纯化建库。富集微生物的测序分析与广州基迪奥生物科技有限公司合作完成。

2 结果与分析

2.1 冲洗水物理性指标的时间响应

当管网停止供水时,管内残留水记为RW。在冲洗过程中,实时检测排口出水的电导率,以确定泵入管网的冲洗水是否到达出口。依据管网冰浆冲洗工程实践,当电导率接近5 mS/cm时,表明最初泵入管道内的冰浆混合水从排口流出,此时标记冲洗时间为0。在冲洗尚未开始的条件下,RW的浊度为0.209 NTU,此时出水水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。开始冲洗时发现,冲洗水的浊度显著增加,为9.49 NTU,第6分钟达到最大值(2 320 NTU),如图2所示。此后,随着冲洗的持续进行,水样浊度逐渐下降,并在50 min后低于国家标准限值(1 NTU),即表明完成了对管道内淤积沉积物的冲洗。对比徐海峰等^[7]获得的结果,该冲洗时间合理。

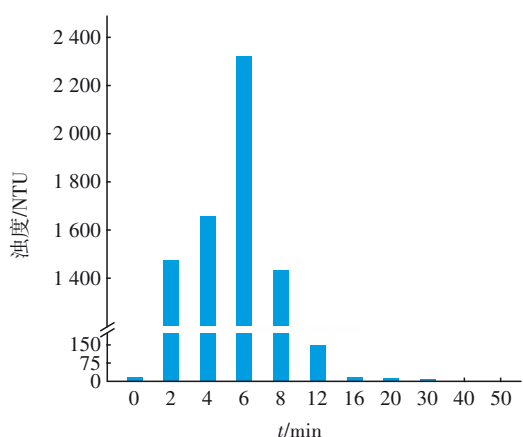


图2 冲洗时间对水样浊度的影响

Fig.2 Effect of flushing time on turbidity of water samples

在管道清洗过程中,初期浊度增加较快,6 min后即呈下降趋势,附着沉积物的“黄水”主要发生在前期。这一结论对冲洗水中颗粒粒径分布同样适用,在第2~16分钟可以检测到不同粒径分布范围内颗粒数(CNT)的显著变化,如图3所示。

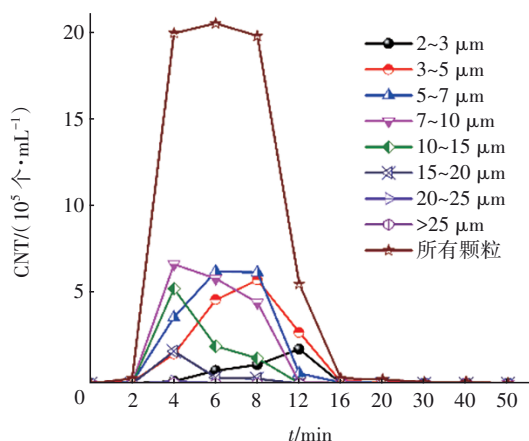


图3 冲洗时间对不同粒径颗粒数的影响

Fig.3 Effect of flushing time on number of particle with different diameters

由图3可知,颗粒在缓慢增长后,不同粒径的颗粒数总和在第6分钟达到峰值(2.1×10^6 个/mL),第16分钟又下降至 3.3×10^4 个/mL。而对于不同粒径的颗粒而言,冲洗过程略有差异。可以显著观察到的是,粒径较小的颗粒峰值的出现时间较晚。例如粒径为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 的颗粒,其颗粒数在第12分钟达到峰值 2.0×10^5 个/mL; $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 颗粒则在第8分钟到达峰值 5.9×10^5 个/mL;粒径为 $5 \sim 7 \mu\text{m}$ 的颗粒在第6分钟达到峰值 6.4×10^5 个/mL;粒径为 $7 \sim 25 \mu\text{m}$ 的颗粒均在第4分钟达到峰值。与之前研究一致的是,粒径较小($2 \sim 7 \mu\text{m}$)的颗粒物占据主导地位^[8]。

综上所述,污染物在冲洗前期即得到大量释放,浊度与颗粒数均在第6分钟达到峰值,表明此时管道沉积物内污染物释放达到最大值。此后,随着冲洗过程的进行,沉积物富集污染下降,直至第40~50分钟得以稳定。

2.2 金属污染物富集与pH的变化

管壁因腐蚀释放的金属被氧化为金属氧化物并附着于管道内壁,若管壁沉积物覆盖金属腐蚀垢,会引发管垢金属氧化物溶解而进入管壁沉积物中,造成沉积物金属含量远高于管网水。当在铸铁管内进行给水输送时,会发生不同程度的金属释放。对管道进行冲洗时使金属在沉积物中显著富集,且以铁与铝为主,如图4所示。

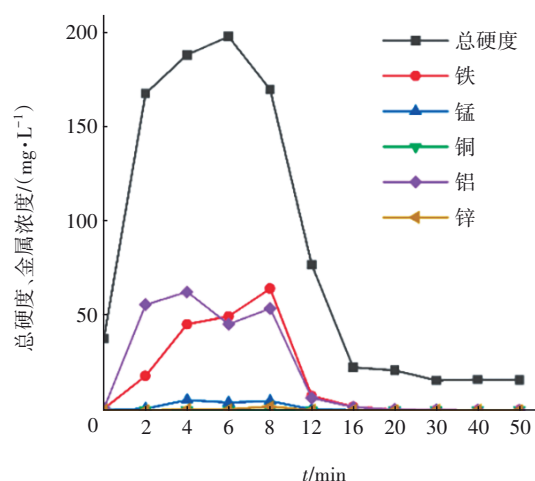


图4 总硬度及金属污染物浓度的变化

Fig.4 Change in total hardness and metal pollutants concentration

铝盐的冲洗释放与水厂处理所用絮凝剂相关,冲洗水中铝盐最高浓度可达 62.8 mg/L ,表明沉降不完全的絮凝颗粒在管道内发生沉积。而铁的释放则表明,在输送水过程中铸铁管道发生了腐蚀。金属管道内常伴随化学(电化学)腐蚀与微生物腐蚀,微生物的富集和水中碳酸氢盐的分解等都能导致管道腐蚀。管道内铁的释放在第8分钟达到最大,冲洗浓度可达 64.6 mg/L ,表明该水厂中腐蚀现象显著。冲洗至20 min后,出水铁浓度降至 0.3 mg/L 以下。此外,水的总硬度变化明显,说明管道中钙镁发生沉积。伴随冲洗过程总硬度先增加后降低,最大值为 198.3 mg/L ,且最后稳定于 $15 \sim 16 \text{ mg/L}$ 。由此可知,给水的总硬度低且沉积不显著,满足要求。其他金属污染物(锰、铜、锌等)也随着冲洗时间发

生变化,其中锰浓度最高可达5.4 mg/L,而铜、锌的浓度相对较低,分别为0.16、0.52 mg/L。可见,该水厂中铜、锌污染物沉积较少,污染以铁、铝为主,锰次之。管网中水力或水质的变化易导致重金属的再释放,从而引发用户端浓度升高,因此,金属腐蚀是需要关注的污染之一。

管道金属的腐蚀因素之一是pH的变化,而管道沉积物的富集势必反过来调控给水pH。pH偏高或偏低均能导致管道锈蚀物的结构发生变化。在对管道实施冲洗时,可监测到管道冲洗水逐渐呈现碱性,pH在7.76~9.17之间变化,冲洗过程促进了沉积碱度的释放。有研究指出^[9],pH增加对给水管网管壁锈蚀物释放具有促进作用,最终导致冲洗水中金属污染物浓度升高。因此,维持给水管网内pH的稳定性,对防止管壁沉积的重金属释放及保障饮用水安全具有重要意义。

2.3 有机物与阴离子的变化

管道沉积的有机物为微生物提供寡营养状态,破坏了饮用水的生物稳定性,导致病菌滋生,其是决定饮用水中微生物生长潜力的重要因素。水样过滤膜后,管道沉积物中的有机物浓度通过TOC进行定量分析,RW的TOC为0.934 mg/L,冲洗时间对沉积物中TOC的影响如图5所示。

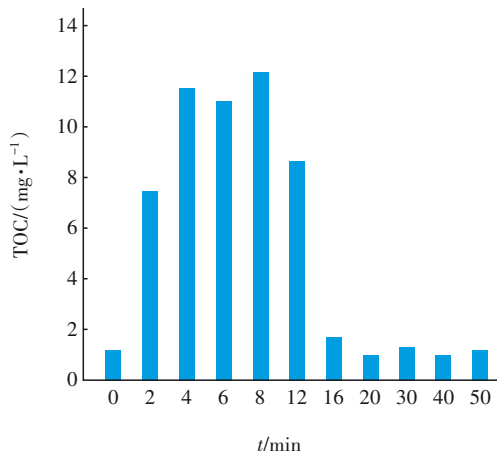


图5 冲洗时间对沉积物中TOC的影响

Fig.5 Effect of flushing time on TOC concentration in sediment

由图5可知,对管道进行冲洗时,2~12 min管道冲洗水的TOC均在7 mg/L以上,在冲洗的第2分钟TOC即可达到7.48 mg/L,第8分钟时达到峰值,比第2分钟高约62%。即在2~12 min冲洗水的TOC高于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的限值

(5 mg/L)。在本研究中,管道内沉积物中的有机物在3年内呈现富集状态,但总体含量较低。

冲洗水中阴离子浓度的变化也同样呈现先增加后下降的趋势。其中,硝酸盐浓度(0.5~1.1 mg/L)始终满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),表明管网内部硝酸盐累积量较少。此外,硫酸盐浓度(4~9 mg/L)在冲洗水中尽管也存在一定的波动,但均远低于标准限值(250 mg/L)。可见,该给水管网的硝酸盐与硫酸盐浓度较低,使得二者在管道中富集较少。氯离子浓度随冲洗时间的变化趋势虽然与前两者一致,但浓度表现出巨大反差。RW的氯离子浓度为6.41 mg/L;在冲洗水中,0~30 min内的氯离子浓度较高,峰值可达11 731 mg/L,如图6所示。氯离子的冲洗流出表明,供水过程中余氯在管道内壁因被形成的管垢/沉积物截留而得以富集。对于铸铁管道而言,管道腐蚀过程消耗的余氯占全部余氯消耗的主要部分。因此管垢的形成不但影响了管内氯的富集,也消耗了余氯,使给水中对微生物的消毒作用减弱,为用户带来潜在风险。

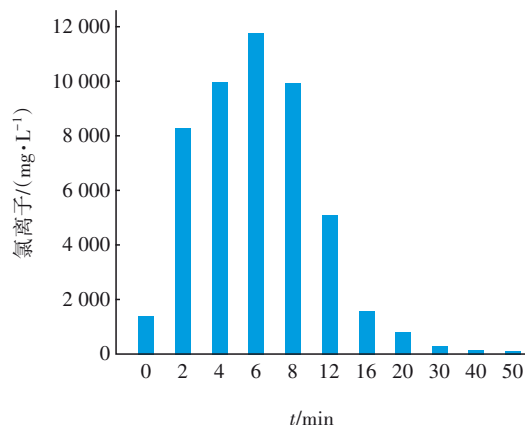


图6 冲洗时间对氯离子浓度的影响

Fig.6 Effect of flushing time on chloride ion concentration

2.4 管道沉积物中微生物群落解析

金属管道中的铁、铜和锌等可为微生物的生长提供必要的营养物质,金属管道也因易发生腐蚀而增加了管壁粗糙度和微生物的适应性,有利于微生物在管壁富集形成生物膜^[10]。然而,生物膜的吸附作用可以将金属离子富集于其表面,进而导致管壁内金属积累浓度高于给水本身^[11]。更有甚者,微生物可通过改变电极电势或形成浓差电池间接参与电化学腐蚀,也能引起微生物腐蚀。因而,微生物的富集可加速管道腐蚀,引起给水管网中重金属的

释放^[12-13]。微生物的存在和增长可能导致水质恶化、水体异味等问题,带来人居环境的健康风险。

对微生物样品富集菌群进行分析,结果表明 *Phreatobacter* 为主要优势菌属,且在生物膜中的含量远高于给水(见图7)。在生物膜样本中,其丰度可达73%,而在水样中为47%。该微生物可参与分解有机废物和污染物以及氮循环过程。有研究指出^[14], *Phreatobacter* 在氯消毒环境中广泛存在,是一类典型的给水管网微生物。

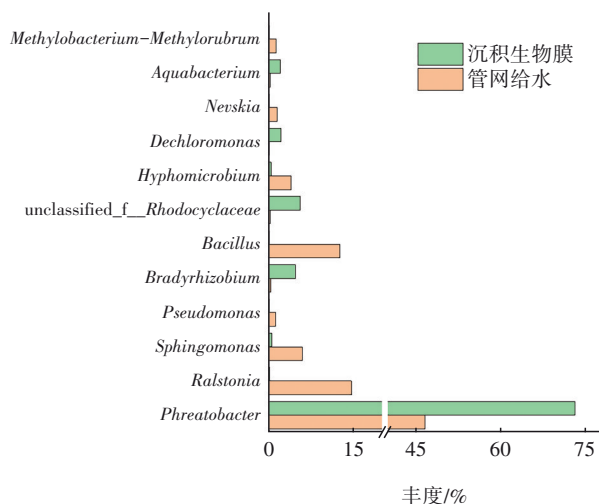


图7 管道给水与生物膜的微生物富集

Fig.7 Microbial enrichment in pipeline feed water and biofilm on the wall

unclassified_f_Rhodocyclaceae 为未分类的红环菌科菌属,可以完成铁呼吸代谢,是生物膜中的优势菌属,丰度为5.6%。而水样中的丰度仅为0.2%,表明在饮用水环境中该类微生物能够在生物膜得以富集。当该微生物附着于管壁以后,相比其他微生物,其更具有竞争优势。*Sphingomonas* 在水样中的丰度相对较高,检出占比达到了5.9%,高于生物膜中的0.5%。这说明该微生物更适合生存于水样中,但是 *Sphingomonas* 也可以附着在管道内表面,形成生物膜,进而保护其自身免受外界环境干扰。*Bradyrhizobium* 是革兰氏阴性菌,可完成氮的固定,其在生物膜样本中的含量高于水样,在生物膜中的丰度为4.7%,而在水样中仅为0.31%。该菌在不利条件下呈多形态,通常含有聚 β -羟基丁酸盐颗粒,此类储能物质能帮助该微生物穿梭在饮用水管网系统中,直至附着到适宜生存的管壁位点,表明生物膜更利于该类微生物生存。

微生物在自然环境中广泛存在,具有多样性和复杂性。不同的微生物菌株可能具有不同的功能和特点。其中, *Sphingomonas*、*Pseudomonas* 属中的 *S. paucimobilis*、*P. aeruginosa*、*P. putidis* 具有致病性或耐药性,其存在可能引发水质风险。样本中多数微生物都具有氮呼吸功能、有机物降解能力和铁呼吸能力,此类管网微生物生态是由水质因子选择的结果。在饮用水管网系统中,管道和水质条件可能影响微生物的生长和功能表现。为确保管网系统的卫生安全和水质稳定性,需要综合考虑不同细菌的功能和相互作用,并进行有效监测和管理。

3 结论

① 采用冰浆清管技术对该给水管网进行清洗时,沉积物污染释放呈现先增加后减少的趋势,各项水质理化指标在50 min后呈现下降且稳定于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值以下,表明50 min是该管网冲洗的合适时间。

② 管内沉积物呈碱性,且存在有机污染物积累,消毒产物氯离子含量在沉积物中的变化幅度显著,主要的金属污染物为管道腐蚀产生的铁和给水处理过程中所用的絮凝剂主体铝。

③ 富集菌群主要为 *Phreatobacter*。此外, *Sphingomonas*、*Pseudomonas* 属在水样中有检出,并且在两种菌属中存在 *S. paucimobilis*、*P. aeruginosa*、*P. putidis* 等致病性菌株,需要监控其对饮用水带来的安全性风险。

参考文献:

- [1] SUN H F, SHI B Y, YANG F, et al. Effects of sulfate on heavy metal release from iron corrosion scales in drinking water distribution system[J]. Water Research, 2017, 114:69-77.
- [2] 庄媛,张堯,于影,等. 给水管网疏松沉积物的结构特征及其风险识别[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3455-3462.
ZHUANG Yuan, ZHANG Yao, YU Ying, et al. Structure characteristics and health risk of loose deposits in drinking water distribution system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3455-3462(in Chinese).
- [3] 陈晓晨,肖亮,陈之歆,等. 给水管网生物稳定性研究:现状、挑战与未来[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 1-9.

- CHEN Xiaochen, XIAO Liang, CHEN Zhixin, *et al.* A review on the biological stability of drinking water distribution system: current status, challenges and future [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(10): 1–9 (in Chinese).
- [4] ZHU Y, WANG H B, LI X X, *et al.* Characterization of biofilm and corrosion of cast iron pipes in drinking water distribution system with UV/Cl₂ disinfection [J]. *Water Research*, 2014, 60: 174–181.
- [5] HANNA-ATTISHA M, LACHANCE J, SADLER R C, *et al.* Elevated blood lead levels in children associated with the flint drinking water crisis: a spatial analysis of risk and public health response [J]. *American Journal of Public Health*, 2016, 106(2): 283–290.
- [6] ZHOU L A, WU Y L, JIANG Q, *et al.* Pyrolyzed sediment accelerates electron transfer and regulates rhodamine B biodegradation [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167126.
- [7] 徐海峰, 胡正平, 童斐, 等. 新建给水管道冲洗技术研究 [J]. *给水排水*, 2020, 46(S1): 924–925, 928.
- XU Haifeng, HU Zhengping, TONG Fei, *et al.* Research on flushing technology of newly laid water supply pipeline [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(S1): 924–925, 928 (in Chinese).
- [8] 蒋浩男, 李大鹏, 张雪, 等. 净水厂颗粒活性炭吸附池反冲洗水特征研究 [J]. *给水排水*, 2023, 49(7): 8–13.
- JIANG Haonan, LI Dapeng, ZHANG Xue, *et al.* Study on characteristics of backwash water from granular activated carbon adsorption tank in water purification plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(7): 8–13 (in Chinese).
- [9] WANG W D, SONG S, QIAO Z X, *et al.* Evaluation on the rural drinking water quality in a centralized supplied area of China [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2016, 15(2): 435–442.
- [10] CULLOM A C, MARTIN R L, SONG Y, *et al.* Critical review: propensity of premise plumbing pipe materials to enhance or diminish growth of *Legionella* and other opportunistic pathogens [J]. *Pathogens*, 2020. DOI: 10.3390/pathogens9110957.
- [11] RILSTONE V, VIGNALE L, CRADDOCK J, *et al.* The role of antibiotics and heavy metals on the development, promotion, and dissemination of antimicrobial resistance in drinking water biofilms [J]. *Chemosphere*, 2021, 282: 131048.
- [12] JIA S C, TIAN Y M, LI J X, *et al.* Field study on the characteristics of scales in damaged multi-material water supply pipelines: insights into heavy metal and biological stability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127324.
- [13] THAYANUKUL P, KURISU F, KASUGA I, *et al.* Evaluation of microbial regrowth potential by assimilable organic carbon in various reclaimed water and distribution systems [J]. *Water Research*, 2013, 47(1): 225–232.
- [14] STANISH L F, HULL N M, ROBERTSON C, *et al.* Factors influencing bacterial diversity and community composition in municipal drinking waters in the Ohio River Basin, USA [J]. *PLOS One*, 2016, 11(6): e0157966.

作者简介: 袁海伟(1983–), 男, 河南开封人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境污染防治。

E-mail: 82117669@qq.com

收稿日期: 2024-07-11

修回日期: 2024-08-21

(编辑: 任莹莹)