

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.007

供水管网水质化学稳定性分析及水质敏感区识别

刘志刚¹, 徐巧¹, 王亚超¹, 毛慧¹, 周正协¹, 何建荣¹,
王项荣¹, 韦学玉²

(1. 宁波市水务环境集团有限公司, 浙江 宁波 315041; 2. 安徽工程大学 建筑工程学院,
安徽 芜湖 241000)

摘要: 针对南方某市多水源供水现状,研究了供水管网水质化学稳定性变化特征,并对该市供水管网水质敏感区进行识别。选取了该市不同水厂供水区域内20个管网采样点2019年3月—2021年3月的余氯、浊度及总铁数据,对不同区域不同季节的管网水质特性进行分析。结果表明,该市供水管网水质整体较好,管网水质敏感区主要集中在供水管网末梢、老旧城区及部分供水分界点,在水源调度过程中需重点关注。管网水质中浊度与余氯具有一定的负相关性,而水体浊度的增加与管道内壁含铁污染物的释放有关。

关键词: 供水管网; 水质化学稳定性; 水质敏感性; 余氯

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0045-06

Analysis of Water Chemical Stability and Identification of Sensitive Areas in Water Supply Network

LIU Zhi-gang¹, XU Qiao¹, WANG Ya-chao¹, MAO Hui¹, ZHOU Zheng-xie¹,
HE Jian-rong¹, WANG Xiang-rong¹, WEI Xue-yu²

(1. Ningbo Water Environment Group Co. Ltd., Ningbo 315041, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: This paper investigated the characteristics of water chemical stability in a multi-source water supply network in a southern city, and identified the water quality sensitive areas of the water supply network. The data of residual chlorine, turbidity and total iron from 20 sampling points of the city from March 2019 to March 2021 were selected to analyze the water quality characteristics of the pipeline network in different regions and seasons. The water quality of the water supply network in the city was overall good, and the water quality sensitive areas were mainly located at the end of the water supply network, the old urban areas and some water supply demarcation points, which should be paid attention to in the process of water supply dispatching. There was a negative correlation between turbidity and residual chlorine, and the increase of turbidity was related to the release of iron-containing pollutants in the inner wall of the pipeline.

Key words: water supply network; water chemical stability; water quality sensitivity; residual chlorine

为了有效缓解城市用水需求,许多城市采用多水源联合供水模式,以确保饮用水供应安全稳定^[1]。但是,供水管网在长期服役过程中由于腐蚀老化、维护管理不当等问题,普遍存在管网腐蚀结垢等情况。当进行供水调度或者水源切换时,由于水力条件(流速、流向等)改变引发的管道水体扰动,以及供水管网内壁腐蚀层与水体形成的化学平衡被打破^[2],导致原先稳定的污染物发生释放与迁移,水质参数例如浊度、色度、铁和锰浓度及细菌总数等出现超标现象,严重时甚至还会出现大规模“黄水”等事件^[3-4]。笔者以南方某市供水管网为研究对象,通过对管网水质化学稳定性判别,并结合管网水重点指标分析,确定供水管网水质特征及水质敏感区分布,探究适用于该市供水系统的水质调控策略,以进一步降低管网“黄水”风险。

1 供水管网现状

该市下辖多个水厂,本次研究的两座水厂分别位于中心城区东西两侧,两水厂供水量约为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,约占全市供水总量的 $2/3$ 。其中,A水厂供水规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水源为J水库,采用强化常规处理工艺(强化混凝-沉淀-过滤);B水厂供水规模亦为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水源为B水库,采用常规处理工艺(混凝-沉淀-过滤)。考虑中心城区供水安全、供水区域水量分配及管线施工难度等因素,该市利用环网进行供水调度。如图1所示,A、B两水厂出水分别通过两根DN1 600的出厂管进入供水环网,M、N分别为进入供水环网的入口点,不同供水区域通过环网接口进行水量分配。

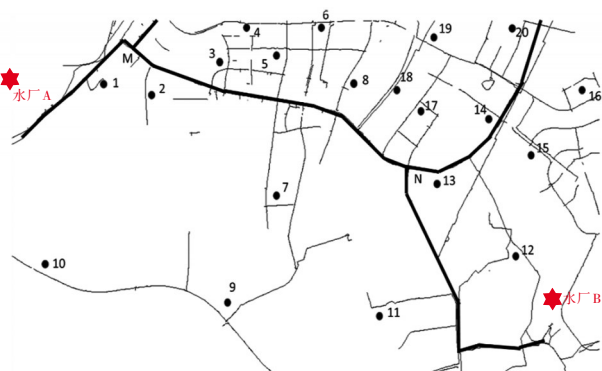


图1 供水管网及取样点分布

Fig.1 Distribution diagram of water supply network and sampling points

2 供水系统水质化学稳定性现状

水质化学稳定性是一个综合性指标,目前国内

外对于水质化学稳定性的评价指标大致可分为两类^[5]:第一类是基于碳酸钙溶解平衡理论的指标,包括LSI(Langelier饱和指数)、RSI(Ryznar稳定指数)、CCPP(碳酸钙沉淀势)、AI(侵蚀指数),这类指标主要与水体的pH、碱度、硬度、温度等有关;另一类是基于其他水质参数的指标,例如LR(拉森指数)、Riddick指数等,这类指标主要与水体的碱度、pH、腐蚀性阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等)等有关。供水管网中水体与管壁之间存在一系列物理、化学及生物作用,水体对管道的腐蚀是各种因素共同作用的结果。对水质稳定性进行评价时,应综合考虑多个指标,才能更加准确反映水体的腐蚀或结垢情况。

本研究主要采用饱和指数LSI、稳定指数RSI、侵蚀指数AI和拉森指数LR评价A、B两水厂出水的化学稳定性。其中,LSI的评价标准:LSI<0,腐蚀倾向;LSI=0,既不沉积也不溶解;LSI>0,结垢倾向。RSI的评价标准:RSI=4.0~5.0,严重结垢;RSI=5.0~6.0,轻度结垢;RSI=6.0~7.0,基本稳定;RSI=7.0~7.5,轻微腐蚀;RSI=7.5~9.0,严重腐蚀;RSI>9.0,极严重腐蚀。AI的评价标准:AI≤10,高度腐蚀;10<AI<12,中度腐蚀;AI≥12,无腐蚀。LR的评价标准:LR<0.2,水质稳定;0.2<LR<0.6,轻微腐蚀;LR>0.6,严重腐蚀。

2019年1月—2021年2月A、B两水厂出水的化学稳定性分析结果如图2所示。A、B两水厂出水LSI均值分别为-2.32和-2.26,RSI均值分别为11.87和11.40,表明两个水厂出水均具有较严重的腐蚀倾向;在侵蚀指数AI方面,B水厂出水均值为9.49,对水泥砂浆内衬及水泥管具有高腐蚀倾向,A水厂出水均值大于10,具有中度腐蚀倾向;在拉森指数LR方面,两个水厂出水的LR值大多在0.6以上,表明两水厂出水对铁质管道及管网内部腐蚀层均具有严重的腐蚀倾向。从季节变化上分析,在夏秋季(6月—10月)两水厂出水的饱和指数LSI处于高峰值,稳定指数RSI处于低峰值,表明水厂出水化学稳定性较同年其他时间段要好,腐蚀性相对较弱;在冬春季(11月至次年3月—5月)出厂水饱和指数LSI处于低峰值,稳定指数RSI处于高峰值,表明水厂出水化学稳定性较同年其他时间段要差,腐蚀性较强。在侵蚀指数AI方面,B水厂出水无明显季节性变化规律,A水厂出水在夏秋季对钢筋混凝土管和水泥砂浆内衬管道的腐蚀性比冬春季要弱;

在拉森指数LR方面,两水厂出水均表现为夏秋季出水腐蚀性较冬春季要弱,水质稳定性相对较好。

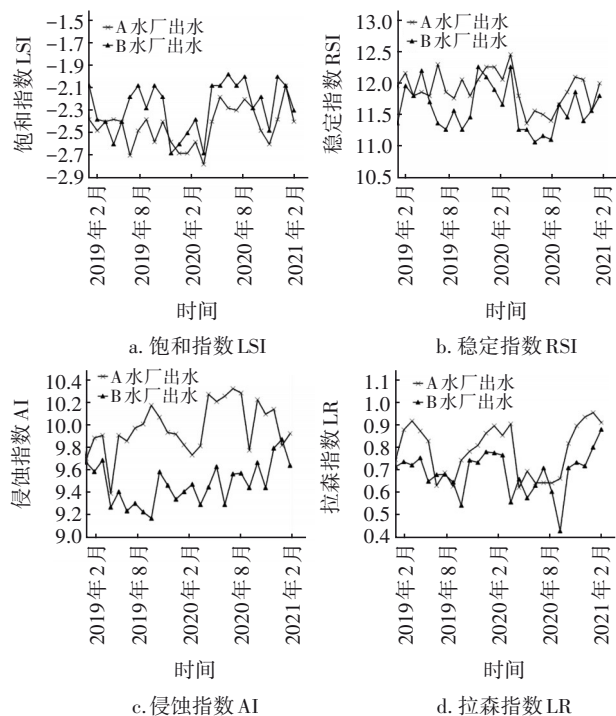


图2 A、B两个水厂出水化学稳定性变化

Fig.2 Change of chemical stability of finished water in waterworks A and B

综上所述,A、B两水厂出水化学稳定性较差,都具有一定的管网腐蚀风险,并且A水厂出水化学稳定性较B水厂要差;在季节性变化规律上,夏季高水温期出厂水化学稳定性要优于冬季低水温期。此外,两个水厂供水范围内的管网水化学稳定性在管网中变化不大,主要受出厂水水质影响。因此,当进行水源切换时,尤其是B水厂供水区域切换至A水厂供水时,具有较高的管网水质波动风险。

3 管网水质敏感性判别

3.1 采样点选择与评价

分别在A、B两水厂供水管网选取10个采样点,共计20个。采样点主要分布在主干管、住宅集中区、供水分界处、管网末梢等位置,具体见图1。管网采样点数据为2019年1月—2021年2月的逐月数据。分别选取余氯、浊度、总铁作为管网采样点水质敏感评价指标,分析方法采用国家标准方法。

3.2 管网水余氯分布情况

对20个管网水样的余氯浓度分布进行统计,结果如图3所示。A、B两水厂均采用次氯酸钠消毒,管网水中余氯浓度的衰减随着管道距离的增加而

增大,同时,在管道流速较慢、水龄较长的区域会引起余氯的快速衰减。因此,在供水管网末梢及供水管网“死水区”往往会出现余氯偏低的情况。

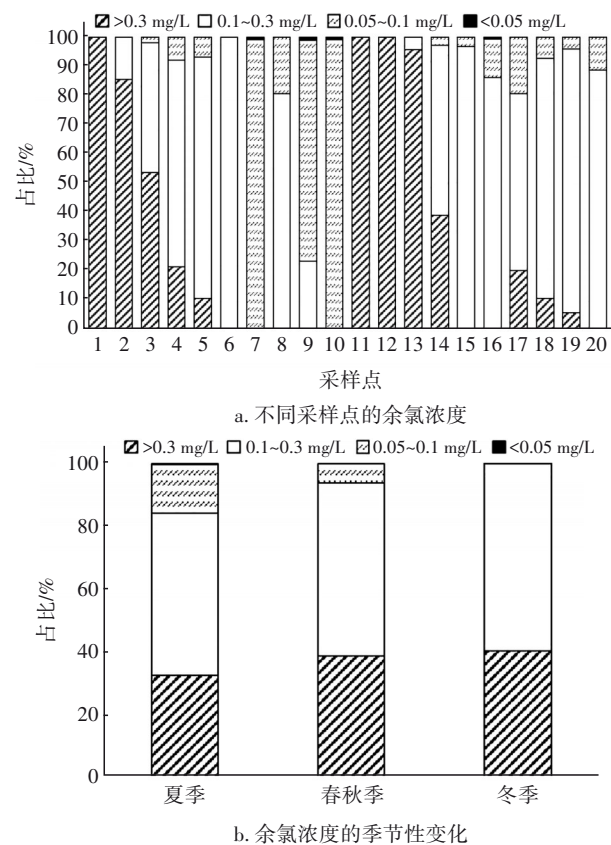


图3 管网水的余氯浓度分布

Fig.3 Distribution of residual chlorine concentration in pipeline network water

由图3可知,供水干管沿线如1、11、12号等采样点管网水的余氯浓度较高,基本维持在0.3 mg/L以上,供水干管流速大、水龄短,余氯衰减量小;除采样点7、9和10号外,其余各点管网水的余氯浓度基本维持在0.1 mg/L以上;9号和10号采样点管网运输距离较长,余氯浓度普遍在0.1 mg/L以下,表明水体经过长距离管网运输后存在一定衰减,在管网末梢存在余氯偏低的风险;此外,7号采样点距离供水主干管距离并不远,同样存在较明显的余氯衰减现象,分析原因主要是该区域以集中农村用户为主,用水量较少,管网水停留时间长导致了余氯的快速衰减。另外,7号和16号采样点均存在不同程度的余氯明显衰减现象,表明管网余氯偏低不仅与配水管网长度有关,同样与水力工况、管龄、采样等因素有关,需要进一步甄别。

除了上述因素外,水温也是影响供水管网水质

的重要因素之一^[6]。因此,对不同季节管网中的余氯水平进行统计分析,结果如图3(b)所示。根据水温特性,将管网水分为3个温度区间:夏季(水温在20℃以上,主要集中在6月—10月)、春秋季节(水温在15~20℃,主要集中在4月、5月、11月)和冬季(水温在15℃以下,主要集中在12月—3月)。从图3(b)可以看出,余氯浓度分布存在一定的季节性差异。夏季、春秋季节和冬季管网监测点余氯平均浓度分别约为0.26、0.31、0.32 mg/L;从浓度分布占比来看,全年各监测点余氯未达标率(<0.05 mg/L)约为0.45%,均发生在夏季,表明夏季水温较高,更容易发生余氯衰减过快的现象。

3.3 管网水浊度分布情况

管网水浊度分布情况如图4所示。

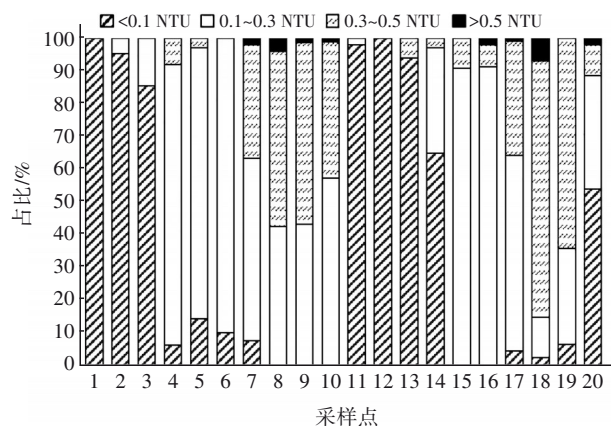


图4 管网水浊度分布

Fig.4 Distribution of turbidity in pipeline network water

由图4可知,各监测点的浊度达标率为100%(<1 NTU),基本维持在0.5 NTU以下,供水主干管及周边管网监测点如1、2、11、12号等的浊度较低,基本维持在0.1 NTU以下;其余监测点的浊度基本在0.1~0.5 NTU之间。部分监测点如8、9、18号等的浊度有超过0.5 NTU的现象,但均低于1 NTU,分析原因可能是该处管网位于两个水厂的供水分界处,水质差异及水力工况的突变导致管道内壁腐蚀层稳定性较差,从而影响管网水浊度。通过对比余氯和浊度的分布发现,浊度与余氯具有一定的负相关性,即浊度较低的监测点其余氯浓度较高,如1、2、11、12号,浊度基本小于0.1 NTU,余氯则大于0.3 mg/L。通过分析不同季节管网水浊度可知,管网水浊度变化无明显季节性差异,从整体趋势上看,春秋季节与冬季的浊度略低于夏季。

3.4 管网水总铁分布情况

管网水总铁浓度分布如图5所示。各监测点总铁浓度达标率为100%(<0.3 mg/L),均在0.1 mg/L以下,其中约93.2%在0.03 mg/L以下。总铁浓度相对较高的区域主要集中在管网末梢及供水分界处,这两处区域的供水干管水力稳定性相对较差,更容易因水力波动引发管壁腐蚀层中铁等污染物的释放,从而引起管网水总铁浓度升高。此外,部分监测点如7号和15号,经调查上述区域为老旧农村区域,管网使用年限较长,因此,该处管网内壁腐蚀对管网水的影响较其他区域严重^[7],管网水的总铁浓度也相对较高。此外,管网水总铁浓度无明显季节性差异。

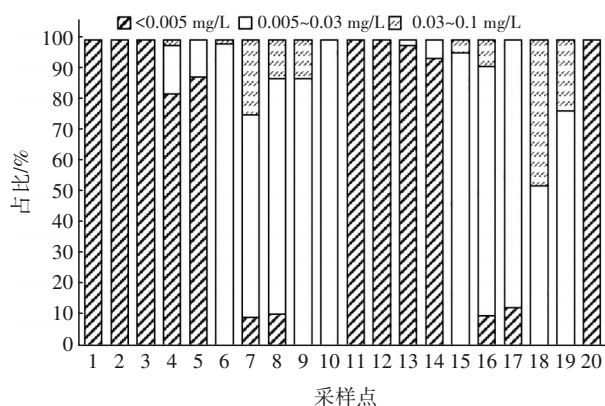


图5 管网水总铁浓度分布

Fig.5 Distribution of iron concentration in pipeline network water

综上,初步判定该市供水区域内管网水质敏感区主要集中在管网末梢如9号和10号采样点、老旧管网区域如7号采样点,以及供水分界处如8、17、18、19号等采样点,这些采样点的余氯、浊度和总铁浓度均值见表1。对各指标的相关性进行初步分析可知,管网水浊度和总铁浓度具有较好的正相关性($R^2=0.94$),表明水体浊度的增加与管道内壁含铁污染物的释放有关。有研究表明^[8],管网水中余氯浓度对铁的释放具有重要影响,余氯的氧化性能够防止管道腐蚀层表面被破坏,从而抑制铁的释放。也有研究表明,余氯对铁的释放具有复杂的作用过程,低浓度余氯下易形成氧浓差电池腐蚀,促进铁的释放;而高浓度余氯会通过抑制铁细菌的抑制及参与电化学腐蚀反应,从而降低铁的释放^[9]。而本研究中余氯浓度对铁的释放无明显影响,分析原因:一方面是实际管网水余氯浓度较低,与前人研究存

在差异;另一方面可能是本次试验以实际管网水为研究对象,实际管网中管垢成分与分布复杂,同时,水力条件的不稳定性导致两者无明显规律。

表 1 管网水质敏感区的水质情况

Tab.1 Water quality in sensitive areas of pipeline network water

采样点	余氯/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU	总铁/(mg·L ⁻¹)
7	0.06	0.27	0.023
8	0.17	0.33	0.028
9	0.10	0.31	0.025
10	0.07	0.28	0.019
17	0.22	0.26	0.018
18	0.21	0.40	0.042
19	0.20	0.32	0.026

4 水源切换对管网水质的影响

为综合分析水源切换对管网水质的影响,对该市水源切换前后(B水厂供水切换成A水厂供水)24 h内的水质敏感区混合水样进行分析,结果如图 6 所示。可知,水源切换后,7个水质敏感区的余氯无明显变化规律,不同点位的余氯变化规律不同;浊度和总铁浓度均出现不同程度的上升。两水厂出厂水总铁和浊度水平基本相当,表明水体中浊度和总铁浓度的增加主要受管网沉积物影响。一方面,水源切换后,部分管网因水力条件(包括流速和流向)改变,对管网沉积物的扰动作用导致污染物的释放;另一方面,水源切换后改变了水体与管网沉积物的化学平衡,导致污染物的溶解和释放。此外,从浊度与总铁浓度的变化可以看出,浊度的增加与总铁浓度释放具有一定相关性,这与前文的研究结果基本一致。

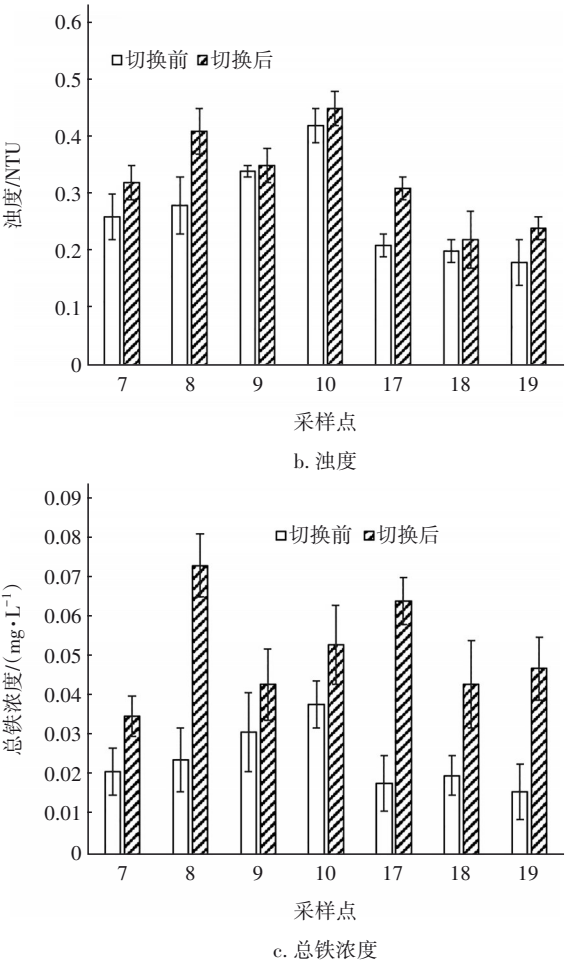
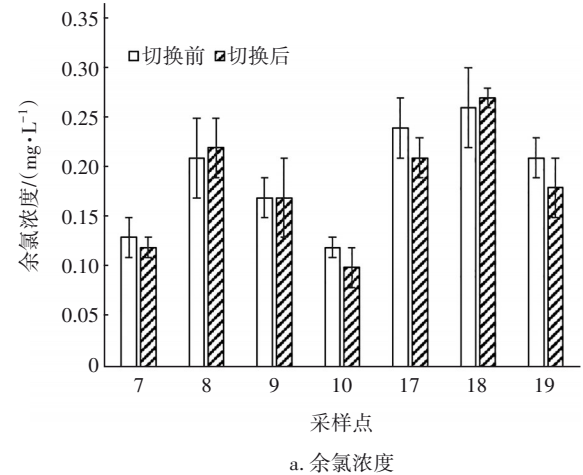


图 6 水源切换对管网水质的影响
Fig.6 Influence of water source switching on water quality of pipeline network

5 结论与建议

- ① 该市 A、B 两水厂出厂水及管网水的化学稳定性较差,都具有一定的管网腐蚀风险。其中,A 水厂出水的化学稳定性较 B 水厂出水要差,当进行水源切换时,存在一定的管网水质波动风险。
- ② 管网水水质整体较好,仅余氯在夏季偶有不达标情况,浊度和总铁浓度的达标率均为 100%;供水管网余氯衰减受供水距离、停留时间、水温等因素影响;供水管网的浊度与余氯具有一定负相关性,而水体浊度的增加与管道内壁含铁污染物的释放有关。因此建议加强夏季对管网余氯的调控,部分管网末梢及余氯衰减明显区域建议进行二次加氯或老旧管网改造。
- ③ 管网水质敏感区主要集中在供水管网末梢、老旧城区及部分供水分界处。供水管网末梢容易出现余氯偏低现象,建议采取局部二次加氯措

施;老旧城区由于管网老化等易发生余氯偏低、浊度及总铁浓度升高,建议进行老旧管网改造或加强管道冲洗排放;供水分界处在进行水源调度时易发生浊度和总铁浓度升高现象,建议适当提高水厂出水的化学稳定性,在水源切换过程中加强水质监控与管网冲洗排放。

参考文献:

- [1] 米子龙, 张晓健, 邬慧婷, 等. 水源切换引发供水管网腐蚀产物释放的控制对策[J]. 中国给水排水, 2013, 29(22): 44-48.
MI Zilong, ZHANG Xiaojian, WU Huiting, *et al.* Control of release of corrosion products caused by water source switch in drinking water distribution systems [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(22): 44-48 (in Chinese).
- [2] 尚修竹. 城市供水系统水质变化对供水管网管道腐蚀影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
SHANG Xiuzhu. The Impact of Water Quality Variation on Water Supply Pipeline Corrosion[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese).
- [3] 赵蓓, 李林彬, 赵云鹏, 等. 水源水质对地下水管网铁释放的影响和控制技术研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(23): 52-57, 63.
ZHAO Bei, LI Linbin, ZHAO Yunpeng, *et al.* Influence of source water quality on iron release in groundwater distribution networks and its control technology [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(23): 52-57, 63 (in Chinese).
- [4] 徐洪福, 李贵伟, 金俊伟, 等. 南方某市供水管网锰致“黄水”问题的成因与控制[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 5-9.
XU Hongfu, LI Guiwei, JIN Junwei, *et al.* Mechanism and control of yellow water event in drinking water distribution system in a southern city of China [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 5-9 (in Chinese).
- [5] 王冠, 杨晓亮, 宋武昌, 等. 给水管网水质化学稳定性判定指标及控制技术研究进展[J]. 城镇供水, 2015(3): 69-72.
WANG Guan, YANG Xiaoliang, SONG Wuchang, *et al.* Research progress on chemical stability assessment indicators and control technologies for water quality in water supply network [J]. City and Town Water Supply, 2015(3): 69-72 (in Chinese).
- [6] 侍路梦, 吴慧芳, 王玉敏, 等. 供水管网余氯衰减变化规律及模型研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 52-57, 62.
SHI Lumeng, WU Huifang, WANG Yumin, *et al.* Decay pattern and model of residual chlorine in water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 52-57, 62 (in Chinese).
- [7] 柳剑男, 王文东, 陈志文, 等. 部分城市自来水中典型无机金属元素的达标状况[J]. 中国给水排水, 2020, 36(5): 46-51.
LIU Jiannan, WANG Wendong, CHEN Zhiwen, *et al.* Concentrations of typical inorganic metal elements in tap water in 36 cities [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(5): 46-51 (in Chinese).
- [8] 邬慧婷. 南北方两个城市供水管网黄水问题的特性与控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
WU Huiting. Characteristics and Control Strategies of “Red Water” Problem in Drinking Water Distribution Systems of Two Cities in South and North China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).
- [9] 谭浩强. 城市供水管网铁释放特性及其风险管理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
TAN Haoqiang. Characteristics and Risk Management of Iron Release in Drinking Water Distribution Systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).

作者简介: 刘志刚(1986—), 男, 安徽安庆人, 博士, 高级工程师, 主要从事城市水资源与供排水、城市水环境与生态研究工作。

E-mail: zcigmondliu@126.com

收稿日期: 2022-06-18

修回日期: 2022-09-13

(编辑: 刘贵春)