

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.006

供水系统水质化学稳定性变化及调控策略

刘志刚^{1,2}, 徐巧¹, 周正协¹, 何建荣¹, 王项荣¹, 李轶²

(1. 宁波市水务环境集团有限公司, 浙江 宁波 315041; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对实际净水厂不同水处理工艺对水体水质化学稳定性的影响,研究了净水过程中水质化学稳定性沿程变化规律,并提出了相应调控策略。结果表明,混凝沉淀会明显降低水体水质的化学稳定性,增强腐蚀倾向,超滤和砂滤对水质化学稳定性影响较小,使用次氯酸钠进行消毒能够略微提高水体水质的化学稳定性。当混凝剂聚合氯化铝(PAC)投加量为2 mg/L时,可实现去除浊度和保持化学稳定性的最佳效果;当碱剂Ca(OH)₂投加量为4 mg/L时,能够基本实现水体水质的化学稳定性。结合实际案例发现,通过供水区域调度管理、管网冲洗排放、老旧管网改造等措施,能够有效降低供水水源切换引起的管网水质风险,保障管网水质稳定。

关键词: 供水系统; 水质; 化学稳定性; 调控策略

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0045-06

Water Quality Chemical Stability of Water Supply System and Its Control Strategy

LIU Zhi-gang^{1,2}, XU Qiao¹, ZHOU Zheng-xie¹, HE Jian-rong¹, WANG Xiang-rong¹, LI Yi²

(1. Ningbo Water Environment Group Co. Ltd., Ningbo 315041, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the effect of different water treatment processes on the chemical stability of water quality in water purification plants, the variation law of water quality chemical stability along the process of water purification was investigated, and the corresponding control strategies were proposed. The coagulation and precipitation process significantly reduced the chemical stability of water quality and enhanced the corrosion tendency. The ultrafiltration and sand filtration process had little influence on the chemical stability of water quality, and the use of sodium hypochlorite for disinfection slightly improved the chemical stability of water quality. When the dosage of coagulant polyaluminum chloride (PAC) was 2 mg/L, the best turbidity removal performance and water quality chemical stability were achieved. When the dosage of alkali agent Ca(OH)₂ was 4 mg/L, the chemical stability of water quality could be basically achieved. According to practical engineering case, the water quality risk caused by water source switching was effectively reduced and the water quality stability of the pipe network was ensured through the measures such as water supply dispatch management in the service area, pipe network flushing and discharge, and old pipe network reconstruction.

Key words: water supply system; water quality; chemical stability; control strategy

为了有效缓解城市用水需求、保障供水水质,许多城市采用多水源切换供水或联合供水的方式^[1]。但是,供水管网在长期服役过程中由于腐蚀老化、维护管理不当等原因,普遍存在腐蚀结垢等问题。当进行供水调度或者水源切换时,输送水体与管道内壁腐蚀层长期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,如浊度、色度、铁锰含量及细菌总数等出现超标,严重时甚至还会出现大规模“黄水”等事件的发生^[3]。因此,在多水源联合供水的新模式下,如何科学有效地进行供水配置与调度、保障城市供水安全,已成为供水行业亟待解决的问题。

南方某市以4座大型水库作为城市供水水源,通过5座净水厂进行饮用水的生产与供应。近年来,由于供水面积的不断扩大,已进行多次大规模供水调度,其间也发生过多起因水源切换而引发的水质问题。因此,在相似原水条件下,笔者分析了净水厂在不同处理工艺下水质化学稳定性的变化规律,探究了适用于该市供水系统的水质化学稳定性调控策略,以进一步降低管网“黄水”风险。

1 材料与方法

1.1 水质化学稳定性判别体系

在实际供水系统中,水质化学稳定性与多种因素有关,例如:温度、pH、溶解氧、碱度、硬度、硫酸盐、氯离子等。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:第一类是基于碳酸钙溶解平衡理论的指标,包括Langelier饱和指数(I_L)、Ryznar稳定指数(I_R)、碳酸钙沉淀势(CCPP)、侵蚀指数(AI),这类指标主要与水体的pH、碱度、硬度、温度等因素有关;另一类是基于其他水质参数的指标,包括拉森指数LR、Riddick指数等,这类指数主要与水体的碱度、pH、腐蚀性阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等)等水质参数有关。然而,在实际供水管网中由于水体与管壁之间存在一系列物理、化学及生物反应,水体对管道的腐蚀现象也是各种因素共同作用的结果。因此,评价水质稳定性时,应综合多项指标进行分析,才能更加准确地反映水体的腐蚀或结垢情况。本研究采用饱和指数 I_L 、稳定指数 I_R 、碳酸钙沉淀势CCPP、侵蚀指数AI、拉森指数LR来判定水质的稳定性^[4],具体见表1。

表1 水质稳定性评价标准

Tab.1 Evaluation standard of water quality chemical stability

项目	评价标准
饱和指数 I_L	$I_L < 0$, 腐蚀倾向; $I_L = 0$, 既不沉积也不溶解; $I_L > 0$, 结垢倾向
稳定指数 I_R	I_R 为 4.0~5.0, 严重结垢; I_R 为 5.0~6.0, 轻度结垢; I_R 为 6.0~7.0, 基本稳定; I_R 为 7.0~7.5, 轻微腐蚀; I_R 为 7.5~9.0, 严重腐蚀; $I_R > 9.0$, 极严重腐蚀
碳酸钙沉淀势 CCPP	CCPP < -10 mg/L, 严重腐蚀; CCPP 为 -10~-5 mg/L, 中度腐蚀; CCPP 为 -5~0 mg/L, 轻微腐蚀; CCPP 为 0~4 mg/L, 基本稳定; CCPP 为 4~10 mg/L, 轻度结垢; CCPP 为 10~15 mg/L, 中度结垢; CCPP > 15 mg/L, 严重结垢
侵蚀指数 AI	AI ≤ 10, 高度腐蚀; 10 < AI < 12, 中度腐蚀; AI ≥ 12, 无腐蚀
拉森指数 LR	LR < 0.2, 水质稳定; 0.2 ≤ LR ≤ 0.6, 轻微腐蚀; LR > 0.6, 严重腐蚀

1.2 试验对象及检测方法

以条件相似的水库作为水源地的A、B两座净水厂为试验对象,A水厂供水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用混凝沉淀+超滤+消毒工艺;B水厂为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用混凝沉淀+砂滤+消毒工艺。两座水厂的混凝剂均为聚合氯化铝(PAC),投加量为4~6 mg/L;A水厂采用孔径为0.05 μm 的超滤膜过滤,B水厂采用石英砂V型滤池过滤;两座水厂均采用次氯酸钠消毒,投加量为1~3 mg/L,控制出水余氯不小于0.5 mg/L。

分别对原水、沉淀池出水、滤后水(膜过滤及砂

滤)和总出水进行检测,检测指标包括水温、pH、溶解性总固体(TDS)、硬度、碱度、硫酸盐、氯化物等,按照《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)与《水和废水监测分析方法》(第4版)检测。

1.3 原水水质情况

两座水厂的原水分别取自当地BX水库和JK水库。两座水库的水质相似,具体水质情况:pH为6.8~7.6,总碱度(以 CaCO_3 计)为15.6~21.8 mg/L,总硬度(以 CaCO_3 计)为26~37 mg/L,氯化物为3.8~7.2 mg/L,硫酸盐为3.4~11.4 mg/L,溶解性总固体

为 86~108 mg/L,溶解氧为 8.4~9.6 mg/L。

2 结果与讨论

2.1 水质化学稳定性的沿程变化

A、B 两座水厂水质化学稳定性的变化见表 2。可以看出,A 水厂和 B 水厂进水的饱和指数 I_L 分别为 -1.88 和 -1.78,表明原水具有一定的腐蚀倾向;经过混凝沉淀以后,饱和指数 I_L 均出现了明显下降,分别为 -2.08 和 -1.98,表明随着混凝药剂的投加,沉淀池出水的水质化学稳定性逐渐降低,这主要是由于混凝过程会降低原水的 pH,消耗了原水中的碱度,从而使水质化学稳定性下降;超滤和砂滤对水体的饱和指数 I_L 影响较小;经次氯酸钠消毒后,A、B 两座水厂的饱和指数 I_L 均上升,表明消毒后水体水质的化学稳定性增强。分析原因,主要是由于次氯酸钠分解后生成的 NaOH 使出水 pH 上升,从而在一定程度上提高了水质的化学稳定性。稳定指数 I_R 的变化趋势与饱和指数 I_L 基本吻合。

表 2 A、B 两座水厂水质化学稳定性的变化
Tab.2 Change of water quality chemical stability
in plant A and B

项目	处理单元	饱和指数	稳定指数	碳酸钙沉淀势/(mg·L ⁻¹)	侵蚀指数	拉森指数
A 水厂	进水	-1.88	10.95	-12.82	10.01	0.76
	沉淀池出水	-2.08	11.23	-15.23	9.78	0.90
	超滤出水	-2.06	11.18	-17.54	9.64	0.88
	总出水	-1.95	10.83	-19.85	9.73	0.78
B 水厂	进水	-1.78	10.25	-11.82	10.23	0.73
	沉淀池出水	-1.98	11.03	-13.23	10.08	0.82
	砂滤出水	-1.99	10.98	-13.54	10.09	0.80
	总出水	-1.95	10.63	-14.85	10.13	0.72

A、B 两座水厂的混凝沉淀、过滤(超滤及砂滤)和消毒过程均使水体的碳酸钙沉淀势下降,表明这 3 个过程均会降低水体的水质化学稳定性。

A、B 两座水厂进水的侵蚀指数 AI 分别为 10.01 和 10.23,表明原水对水泥管及水泥砂浆内衬具有中度腐蚀倾向。经过混凝沉淀后,两座水厂的侵蚀指数 AI 均明显下降,分别为 9.78 和 10.08,表明混凝沉淀过程降低了水体的水质化学稳定性,增加了水体对水泥管及水泥砂浆内衬的腐蚀风险。A 水厂超滤出水的侵蚀指数 AI 下降,B 水厂砂滤出水的侵

蚀指数 AI 略微上升,这主要是由于侵蚀指数 AI 与水体的 pH、钙离子及碱度密切相关,超滤对钙离子及碱度的去除导致侵蚀指数 AI 降低;另一方面,有研究表明^[5],运行初期石英砂滤料表面会有碱性物质析出,使得水体的 pH 上升,从而引起侵蚀指数 AI 上升。经次氯酸钠消毒后,A、B 两座水厂的侵蚀指数均升高,表明消毒后水质化学稳定性增强,水体对水泥管及水泥砂浆内衬的腐蚀风险降低。

A、B 两座水厂进水的拉森指数分别为 0.76 和 0.73,表明原水对管道具有严重的腐蚀倾向。混凝沉淀后,两座水厂的拉森指数均明显升高,分别为 0.90 和 0.82,表明混凝沉淀降低了水体的水质化学稳定性。超滤和砂滤对水体的拉森指数影响较小。消毒后两座水厂的拉森指数均下降,表明水质化学稳定性增强,对管道腐蚀层的腐蚀倾向降低。

综上所述,混凝沉淀对水质化学稳定性影响较大;超滤和砂滤产生的影响较小,但超滤会增加水体对水泥管及水泥砂浆内衬的侵蚀风险;采用次氯酸钠消毒在一定程度上能够提高出水水质的化学稳定性,降低出厂水对供水管网的腐蚀风险。

2.2 水质化学稳定性的调控措施

2.2.1 优化混凝剂投加量

为进一步优化混凝过程,降低其对水质化学稳定性的影响,以 A 水厂原水为试验对象,分析混凝剂 PAC 投加量(以 Al₂O₃ 计)对水质化学稳定性的影响,结果如图 1 所示。

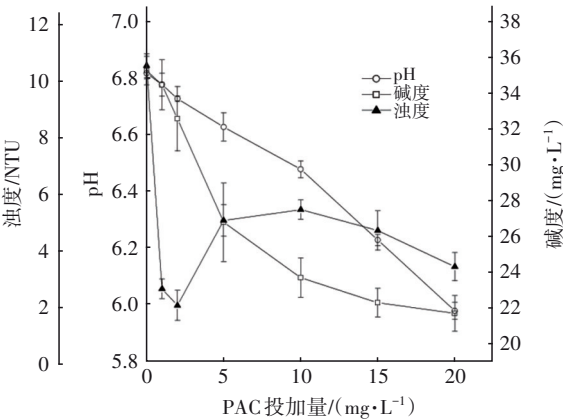


图 1 不同 PAC 投加量下 pH、碱度及浊度的变化

Fig.1 Change of pH, alkalinity and turbidity under different PAC dosages

由图 1 可知,随着 PAC 投加量的增加,原水 pH 和碱度均出现不同程度的下降,这也与其水质化学

稳定性降低现象相吻合。从出水浊度来看,当PAC投加量为1~2 mg/L时可实现较好的混凝效果。

进一步分析不同混凝剂投加量下水质的化学稳定性,结果见表3。可知,随着PAC投加量的增加,水体的水质化学稳定性不断下降。当投加量>2 mg/L时,水质化学稳定性下降明显。为了保证对浊度的去除效果并提高出水水质的化学稳定性,确定PAC投加量为2 mg/L。

表3 不同PAC投加量下水质化学稳定性的变化

Tab.3 Change of water quality chemical stability under different PAC dosages

PAC投加量/ (mg·L ⁻¹)	饱和 指数	稳定 指数	碳酸钙沉淀势 CCPP/(mg·L ⁻¹)	侵蚀 指数	拉森 指数
0	-1.93	10.45	-18.34	10.16	0.85
1	-2.02	10.56	-18.52	10.08	0.90
2	-2.11	10.70	-19.03	10.01	0.96
5	-2.34	11.07	-21.36	9.75	1.13
10	-2.53	11.32	-34.14	9.53	1.27
15	-2.82	11.73	-90.43	9.12	1.34
20	-3.18	12.23	-149.75	8.78	1.43

2.2.2 优化碱剂投加量

分析Ca(OH)₂、Na₂CO₃和NaHCO₃三种常用碱剂对水体pH的影响,结果见图2。

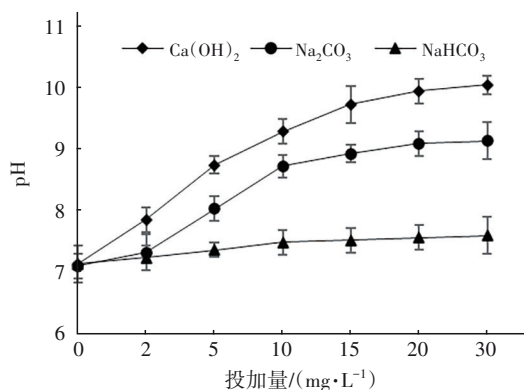


图2 不同碱剂下pH的变化

Fig.2 Change of pH under different alkali agents

由图2可知,随着3种碱剂投加量的增加,水体的pH逐渐升高。相同碱剂投加量下,水体pH提升由快到慢的排序为Ca(OH)₂>Na₂CO₃>NaHCO₃。实际运行过程中,投加碱剂的点位可选择在混凝沉淀前(前加碱)或混凝沉淀之后(后加碱),考虑到实际出厂水pH调控要求、药剂投加量和混凝沉淀对pH的要求,确定碱剂为Ca(OH)₂,投加方式为前加碱,投加量不超过10 mg/L。

碱剂Ca(OH)₂投加量对水质化学稳定性的影响见表4。可以看出,随着Ca(OH)₂投加量的增加,饱和指数I_L、碳酸钙沉淀势CCPP、侵蚀指数AI均上升,稳定指数I_R和拉森指数LR则下降。可见,投加碱剂后水体各项水质化学稳定性指标均得以优化,水体腐蚀倾向明显降低,水质化学稳定性升高。另外,Ca(OH)₂投加量越大,水质化学稳定性越好。综合考虑经济成本及pH调控要求,确定Ca(OH)₂的最佳投加量为4 mg/L,此时碳酸钙沉淀势CCPP为2.56 mg/L,侵蚀指数AI为11.43,拉森指数LR为0.59,水质基本趋于稳定。

表4 Ca(OH)₂投加量对水质化学稳定性的影响

Tab.4 Effect of Ca(OH)₂ dosages on water quality chemical stability

Ca(OH) ₂ 投加 量/(mg·L ⁻¹)	饱和 指数	稳定 指数	碳酸钙沉淀 势/(mg·L ⁻¹)	侵蚀 指数	拉森 指数
0	-1.90	10.98	-10.12	10.12	0.78
2	-0.83	9.92	-1.34	10.83	0.70
4	0.12	9.21	2.56	11.43	0.59
6	0.24	9.01	4.32	11.87	0.52
8	0.42	8.78	6.32	12.02	0.48
10	0.82	8.54	8.34	12.23	0.45

2.2.3 供水调度案例分析

由上述分析可知,A、B两座水厂出水水质的化学稳定性均较差,其中B水厂出水水质化学稳定性优于A水厂,两座水厂的出水对水泥砂浆内衬及管道内腐蚀层均具有一定的侵蚀风险。管网取样点及水质敏感区分布如图3所示。



图3 管网取样点及水质敏感区分布

Fig.3 Distribution of sampling points and water quality sensitive areas of pipe network

A、B两座水厂出水分别通过两根DN1 600的出

厂管进入供水环网,图3中M、N即为两处供水环网入口,不同的供水区域通过环网接口进行水量分配。

通过历史水源切换时期用户水质投诉案例汇总及对实际供水管网中20个取样点水质(主要指标为余氯、浊度和总铁)进行分析,初步确定供水区域内管网水质敏感区主要集中在管网末梢如9、10号取样点,老旧管网区域如7号取样点及供水分界点8、17、18、19号等区域。其中取样点8、17、18、19号常规为B水厂供水区域,7、9、10号常规为A水厂供水区域。2021年2月,因B水厂设备维修停产,原B水厂供水区域将切换成A水厂供水。根据历史调度经验,重点考虑上述水质敏感区域内的水质变化。针对不同区域特点,主要采取以下措施:

① 优化供水调度。由于A水厂出水水质化学稳定性较差,因此在本次水源切换过程中需要重点关注原B水厂供水区域水质的变化。水源切换过程中遵循“先少后多,逐步增量”的原则,B水厂在停产前每日降低20%~40%的供水量,经过3~5 d逐渐完成水源切换。同时,对于供水分界区域,通过阀门调度管理,尽量确保原供水区域内水流方向前后一致,从而降低水流冲刷对水质的影响。

② 加强管网放空冲洗。由于A、B两座水厂的出水水质化学稳定性较差,供水管网长期处于被侵蚀状态,管道内部腐蚀、结垢现象严重。因此,在进行水源切换前,对上述水质敏感区进行供水主干管网放空冲洗排放,尽可能清除管道内壁腐蚀结垢层、沉积物及生物膜等,保证管道内壁清洁。同时,在水源切换过程中对水质敏感区进行24 h水质、水压监控,确保管网水质稳定,对水质突变区域及时进行管网冲洗排放。

③ 水源切换过程中加强对A水厂出水水质化学稳定性的管理,必要时对A水厂采取应急加碱措施,以降低管网“黄水”风险。

④ 加大管网改造。根据用户水质反馈情况及管网监测点水质分析,在进行水源切换前优先针对水质异常、爆管频发、腐蚀结垢严重等区域进行老旧管网改造。

对供水区域内7个水质敏感区水源切换前后24 h内的混合水样进行分析,结果如图4所示。可知,水源切换后水质敏感区余氯的变化无明显规律,管网余氯基本维持稳定。浊度和总铁浓度虽出

现不同程度的上升,但各点位浊度基本稳定在0.5 NTU以下,总铁浓度<0.08 mg/L。同时,在水源切换过程中和切换后,无用户反映水质异常情况。由此可见,通过供水区域调度管理、管网冲洗排放、老旧管网改造等措施能够有效降低供水水源切换引起的管网水质风险,保障供水管网水质稳定。

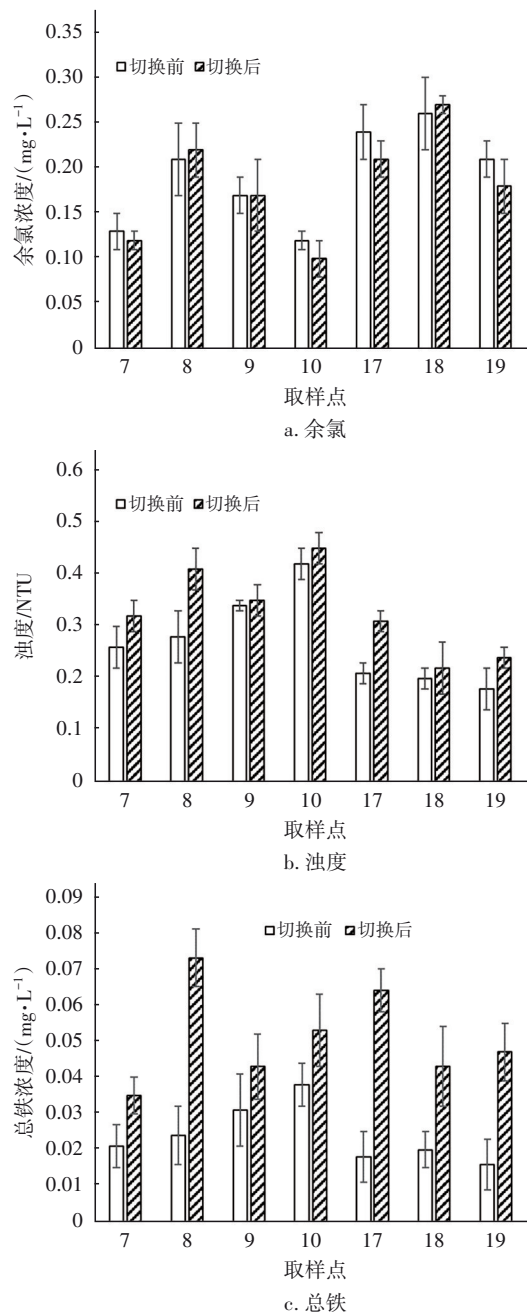


图4 水源切换前后水质的变化规律

Fig.4 Change of water quality before and after water source switching

3 结论

① 净水系统各工艺单元对水质化学稳定性

的影响中,混凝沉淀的影响较大,能够明显降低水体的水质化学稳定性,增强腐蚀倾向。超滤和砂滤对水质化学稳定性的影响较小,超滤会增加水体对水泥管及水泥砂浆内衬的侵蚀风险。使用次氯酸钠消毒能够略微提高水体的水质化学稳定性,降低出厂水的腐蚀风险。

② 出厂水腐蚀性调控方面,在保证浊度去除率的同时,降低混凝沉淀对水质化学稳定性的影响,确定混凝剂PAC的最佳投加量为2 mg/L。采用投加碱剂调节pH时,综合考虑经济成本及出厂水pH调控,确定碱剂为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,其最佳投加量为4 mg/L。

③ 供水管网调控方面,应充分结合供水调度优化、区域阀门管理、供水管网冲洗排放及老旧管网改造等方式,降低水源调度过程中引发的供水管网“黄水”风险。

参考文献:

- [1] 米子龙,张晓健,鄢慧婷,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] 傅强,徐彦,孙宇新,等. 多水源供水调度应急管理方法的研究[J]. 给水排水, 2011, 37(1):102-105.
FU Qiang, XU Yan, SUN Yuxin, *et al.* Research on multi-water-source water supply system emergency management [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(1): 102-105(in Chinese).
- [3] 舒青松. 给水管网与二次供水系统的水质研究及运行维护和改造[J]. 给水排水, 2010, 36(1):98-101.
SHU Qingsong. Water quality study, maintenance operation and reconstruction of the water distribution network and secondary water supply system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36 (1): 98-101 (in Chinese).
- [4] 张守凤. 城乡统筹区域供水管网的水质化学稳定性及影响因素研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
ZHANG Shoufeng. Research on Influence Factors of Chemical Stability of Water in Drinking Water Supply Pipe Networks on Urban and Rural Areas [D]. Nanjing: Southeast University, 2016(in Chinese).
- [5] 许仕荣,方伟,徐洪福. 城市供水系统的水质化学稳定性变化规律研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(11):5-7,12.
XU Shirong, FANG Wei, XU Hongfu. Research on change regularity of water chemical stability in urban water supply systems [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(11): 5-7,12(in Chinese).

作者简介:刘志刚(1986-),男,安徽安庆人,博士,高级工程师,主要从事饮用水安全保障工作。

E-mail:zcigmondliu@126.com

收稿日期:2021-02-19

修回日期:2021-05-21

(编辑:任莹莹)

环境就是民生,青山就是美丽,蓝天也是幸福