

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.006

中国南北两城市饮用水水质化学稳定性对比研究

代雪宁¹, 李伟英^{1,2}, 李悦¹, 梁莉¹, 张雅梅¹, 张伟³

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 3. 成都川力智能流体设备公司, 四川 成都 611530)

摘要: 水质化学稳定性是表征饮用水安全的重要指标之一。基于我国南北两座城市5年间(2013年—2017年)出厂水和管网水的水质监测数据,采用Langelier饱和指数(I_L)、Ryznar稳定指数(I_R)、侵蚀指数(AI)和拉森比率(LR)综合分析南北两市水质化学稳定性的异同。南北供水系统水质化学稳定性与水温、pH、总硬度等常规水质指标存在相关性。北方A市 I_L 为-0.47~0.97、 I_R 为6.26~8.33,春夏水质具有化学稳定或结垢特性,秋冬水质具有轻度腐蚀特性;南方B市 I_L 为-2.89~-1.99、 I_R 为10.96~12.34,全年呈严重腐蚀倾向;AI值和LR值进一步表明两市的水质对石棉水泥管和金属管均具有侵蚀和腐蚀特性。因此,控制供水系统水质的化学稳定可有效保障供水安全。

关键词: 供水系统; 化学稳定性; Langelier饱和指数; Ryznar稳定指数; 侵蚀指数; 拉森比率

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0039-06

Comparison of Drinking Water Quality Chemical Stability between a Northern City and a Southern City in China

DAI Xue-ning¹, LI Wei-ying^{1,2}, LI Yue¹, LIANG Li¹, ZHANG Ya-mei¹, ZHANG Wei³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Chengdu Chuanli Intelligence Fluid Equipment Co. Ltd., Chengdu 611530, China)

Abstract: The chemical stability of water quality is one of the most important indicators to characterize the safety of drinking water. Based on the water quality monitoring data of product water and pipe network water from two Chinese cities (city A in the north and city B in the south) during the past 5 years (2013–2017), the Langelier saturation index (I_L), Ryznar stability index (I_R), erosion index (AI) and Larson ratio (LR) were used to comprehensively analyze the differences and similarities of water quality chemical stability between the two cities. The water quality chemical stability of drinking water from the north and south water supply systems was correlated with conventional water quality indicators such as water temperature, pH and total hardness. In city A, the values of I_L and I_R were in the range of -0.47–0.97 and 6.26–8.33, respectively. The water quality in spring and summer was chemically stable or

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFC3201304); 国家自然科学基金资助项目(51979194); 成都川力高品质饮用水水质安全与保障技术研究(20182078)

通信作者: 李伟英 E-mail: 123lwyktz@tongji.edu.cn

showed a tendency of scaling, while the water quality in autumn and winter was mildly corrosive. In city B, the value of I_L was between -2.89 and -1.99, and that of I_R was between 10.96 and 12.34, suggesting that the water quality showed a tendency of serious corrosion throughout the year. The values of AI and LR further indicated that the water quality of the two cities was erosive and corrosive for both asbestos-cement pipe and metal pipe. Therefore, controlling the chemical stability of water quality in water supply systems can effectively guarantee the safety of water supply.

Key words: water supply system; chemical stability; Langelier saturation index; Ryznar stability index; erosion index; Larson ratio

城市供水是关乎经济发展和社会稳定的重大民生工程。随着我国经济的发展和人民生活水平的不断提高,人们对饮用水的要求不再仅满足于“能喝”,也开始追求“好喝”“喝得健康”等更高目标。根据《中国城镇水务行业发展报告(2019)》,截至2018年底,全国城市供水综合生产能力已经达到 $31\,221.84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。出厂水各项水质指标必须达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求,然而经过供水管网的长距离运输,管网水和末梢水可能会发生浊度、金属离子浓度、细菌总数等水质指标的恶化,出现“黄水”“红水”等现象。

水质化学稳定性是指管道输送中的水既不腐蚀也不结垢的化学状态。腐蚀和结垢现象与水处理工艺、温度、pH等有关。水质化学稳定与饮用水的感官性状指标及用户的用水安全密切相关,水质化学稳定性差会加剧管道腐蚀和结垢,显著降低管道的输送能力,并造成水污染。因此,保障水质化学稳定性既有利于保持供水系统中水质及水力条件的稳定,也有利于保障用户的生命健康。

水质化学稳定的判别指数主要分为两大类,一类是基于碳酸钙溶解平衡的指数,包括Langelier饱和指数(I_L)、Ryznar稳定指数(I_R)、侵蚀指数(AI)等;另一类则是基于其他水质指标的指数,如拉森比率(LR)等^[1-2]。目前国内外对水质化学稳定性的研究多局限于小试和中试水平,并且选取的判别指数单一,综合考虑多个指数的研究还较少^[3-4]。鉴于此,笔者基于我国北方A市和南方B市连续5年(2013年—2017年)的出厂水及管网水水质监测数据,选用Langelier饱和指数、Ryznar稳定指数、侵蚀指数和拉森比率综合评价南北两市水质的化学稳定性,分析两市水质化学稳定性随季节的变化规律,并探究影响因素,旨在探讨南北方不同区域供水系统水质

化学稳定性的共性和特性问题,以期城市供水安全提供可靠的理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 取样点的设置

A、B两市主要地区的自来水为各自辖区内的2座自来水厂混合供水,其水处理工艺类似,分别为预处理—絮凝—平流沉淀—快滤池—消毒工艺和预处理—折板反应池—平流沉淀—V型滤池—消毒工艺,因此后续水质分析中可排除水处理工艺产生的影响。同时,以A市2个管网点和B市4个管网点的水质数据,分别反映两市管网水的水质。

计算两市自来水厂和管网水12月—次年2月、3月—5月、6月—8月、9月—11月的化学稳定性指数平均值,分别代表冬、春、夏、秋4个季节的化学稳定性水平,分析水质化学稳定性随季节的变化规律,并探究影响因素。

1.2 检测项目及方法

浊度采用浊度仪测定;pH采用pH计测定;总硬度采用EDTA滴定法测定;总碱度采用酸碱指示剂滴定法测定;硫酸盐浓度采用离子色谱法测定;氟化物浓度采用硝酸银滴定法测定。

1.3 统计学分析方法

运用SPSS(version 28)软件进行统计学分析,采用Mann-Whitney U检验比较数据差异。当 $p < 0.05$ 时,两组数据之间的差异具有显著性意义; $p < 0.01$ 时,两组数据之间的差异具有极显著性意义。

1.4 水质化学稳定性的评价方法和标准

Langelier饱和指数可判断水质呈结垢或腐蚀特征($I_L < 0$, 腐蚀; $I_L = 0$, 稳定; $I_L > 0$, 结垢),Ryznar稳定指数对Langelier饱和指数评价等级进行了补充($I_R = 4.5 \sim 5.0$, 严重结垢; $I_R = 5.0 \sim 6.0$, 轻度结垢; $I_R = 6.0 \sim 7.0$, 稳定; $I_R = 7.0 \sim 7.5$, 轻度腐蚀; $I_R = 7.5 \sim 9.0$, 严重

腐蚀; $I_L > 9.0$,极严重腐蚀),侵蚀指数主要考虑水对石棉水泥管及采用水泥砂浆衬里的金属管的侵蚀程度($AI < 10$,严重侵蚀; $10 \leq AI < 12$,中等侵蚀; $AI > 12$,不侵蚀),拉森比率则考虑到金属管材中水质化学稳定性受胶体和电化学的影响($LR > 1$,腐蚀; $LR \leq 1$,不腐蚀)。通过以上4个指标来评价水质的化学稳定性,即是否具有结垢、稳定、腐蚀、侵蚀等特征。

2 水质化学稳定性分析

2.1 常规水质指标

A市水质浊度呈现春夏低、秋冬高的季节变化特性,管网水浊度平均值较出厂水增加126.7%(见表1),这主要是由于该市管道内壁腐蚀结垢沉积,

大量金属离子和各种细菌及藻类随着水流不断聚集所致^[5]。出厂水和管网水pH分别为7.36~8.46和7.18~8.10,为弱碱性,均呈现夏高秋低的变化特性;总硬度(以 CaCO_3 计)分别为140.9~335.3和184.6~328.0 mg/L,钙盐镁盐含量较高,水质偏硬;总碱度分别为65~159和68~158 mg/L;氯化物浓度分别为62.5~115.7和72.8~115.3 mg/L,呈现出秋低夏高的特性,这是由于水厂在夏季增加了消毒剂投量导致的。对于硫酸盐浓度,2016年和2017年夏季出厂水和管网水均出现超标现象,最大值分别达到280.4和282.4 mg/L,可能是因为2015年后切换水源所致,需要在后续水处理过程中重点关注。

表1 2013年—2017年常规水质指标

Tab.1 Indexes of water quality from 2013 to 2017

取样点	浊度/NTU	pH	总硬度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总碱度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硫酸盐/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氯化物/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
A市水厂	0.15 ± 0.04	7.81 ± 0.17	261.3 ± 36.2	115.39 ± 23.14	146.3 ± 37.8	92.2 ± 12.7
A市管网	0.34 ± 0.14	7.84 ± 0.17	261.7 ± 30.4	120.06 ± 19.41	150.1 ± 35.0	93.2 ± 10.5
B市水厂	0.17 ± 0.05	6.81 ± 0.18	32.2 ± 11.9	15.05 ± 2.47	14.4 ± 7.9	17.8 ± 28.0
B市管网	0.28 ± 0.43	6.80 ± 0.17	27.3 ± 7.5	15.09 ± 2.47	10.14 ± 5.6	8.7 ± 4.4

B市出厂水浊度较为稳定,基本为0.09~0.34 NTU,管网水浊度平均值较出厂水增加64.7%,除2015年7月和2016年全年偏高外,其他时间较为稳定。B市出厂水pH基本小于7,呈弱酸性,管网水在2014年3月pH出现异常(8.0),除此之外pH均较为稳定。出厂水与管网水总硬度分别为15.0~92.0和13.0~57.0 mg/L,硬度较低,水质较软。出厂水与管网水总碱度相近,且数值较低。硫酸盐浓度整体较低,呈现出夏季低、冬季高的变化特性。氯化物呈现夏季低、冬季高的变化特性,出厂水中位数为8.83 mg/L,管网水中位数为7.65 mg/L。

总体来说,A、B两市出厂水与管网水的常规指标基本达到《生活饮用水卫生标准》要求,偶有异常值出现。同一地区管网水浊度较出厂水明显增加,这可能是由于管材腐蚀及结垢产生的影响。

2.2 化学稳定性指标

2.2.1 Langelier饱和指数

A市出厂水和管网水 I_L 值分别为-0.47~0.97和-0.21~0.94,呈现结垢特性,如图1所示。2013年—2016年的年平均值呈上升趋势,2017年的年平均值有所下降。Langelier饱和指数春夏高、秋冬低,呈现春季、夏季、秋季结垢,冬季腐蚀的特性。

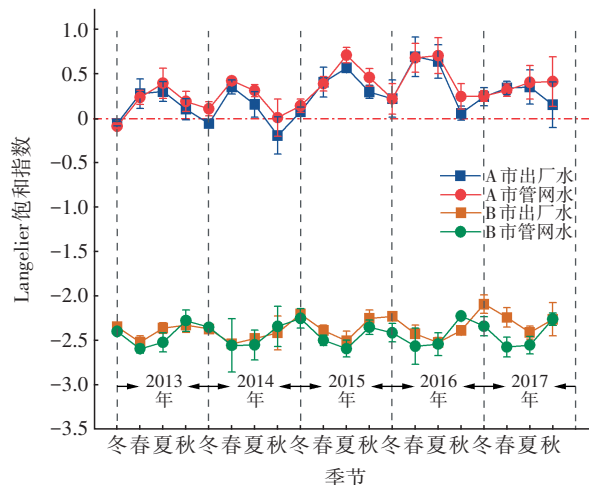


图1 2013年—2017年A市与B市Langelier饱和指数的变化
Fig.1 Variation of Langelier saturation index of city A and city B from 2013 to 2017

从图1还可以看出,B市出厂水和管网水 I_L 值分别为-2.68~-1.99和-2.89~-2.11,呈现腐蚀特性。5年间的Langelier饱和指数均较为稳定,秋冬高、春夏低,四季波动较小,全年均呈腐蚀特性。

根据Langelier饱和指数,A市主要呈结垢特性,B市主要呈腐蚀特性($p < 0.01$,差异极显著)。相较于A市,B市Langelier饱和指数较低,且随季节波动较小,这是由于B市处于南方地区,水温整体偏高,

季节温差较小。由于钙镁化合物溶度积和溶解度均随水温升高而降低^[1],故A市管道呈现结垢倾向。刘杨^[6]的研究表明,钙离子浓度升高有助于水体达到稳定状态,而B市影响Langelier饱和指数的pH、总硬度、总碱度均较低,最终导致Langelier饱和指数偏低,呈现腐蚀特性。总体而言,A、B两市出厂水与管网水Langelier饱和指数的年变化规律与季节变化规律基本一致,波动范围较大,并且管网水的Langelier饱和指数略高于出厂水。

2.2.2 Ryznar稳定指数

A市出厂水和管网水 I_R 值分别为6.26~8.33和6.38~8.00,如图2所示。2013年—2017年的年平均指数较为稳定。出厂水和管网水的Ryznar稳定指数均呈现冬季较高、夏季较低的变化趋势,即呈现夏季稳定、冬季轻度腐蚀的特性。

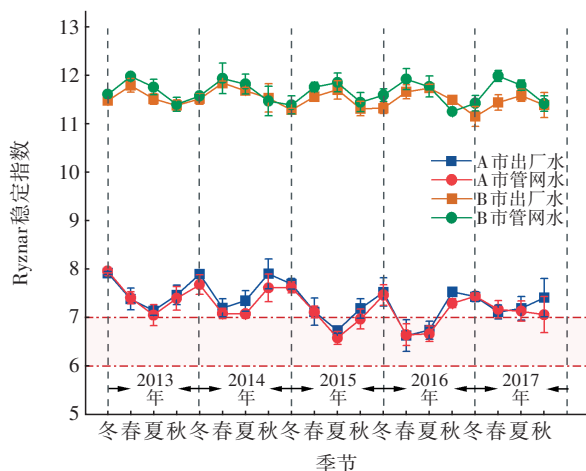


图2 2013年—2017年A市与B市Ryznar稳定指数的变化
Fig.2 Variation of Ryznar stability index of city A and city B from 2013 to 2017

从图2还可以看出,B市出厂水和管网水Ryznar稳定指数分别为10.96~11.99和11.17~12.34,属于极严重腐蚀。5年间Ryznar稳定指数的年平均指数较为稳定。出厂水和管网水的Ryznar稳定指数在春、夏季较高,秋、冬季较低,根据年份不同分别在春、夏两季达到年度最大值。

A、B两市出厂水与管网水Ryznar稳定指数的年变化规律基本相同,季节变化规律也基本一致,管网水的Ryznar稳定指数略低于出厂水。两市的 I_R 值有较大差异,且呈现不同的季节特性,这是受pH、总硬度、总碱度和水温变化的影响。B市腐蚀较A市严重($p<0.01$,差异极显著),这与2.2.1节所得结果相符。

2.2.3 侵蚀指数

A市出厂水和管网水AI值分别为11.74~12.86和11.87~12.84,如图3所示,且5年间AI值整体趋于稳定。出厂水秋季的AI值较低,其他三季较为相近,呈现秋季中等程度侵蚀,春、夏、冬季无侵蚀的特性。管网水AI值基本大于12,呈现稳定状态。

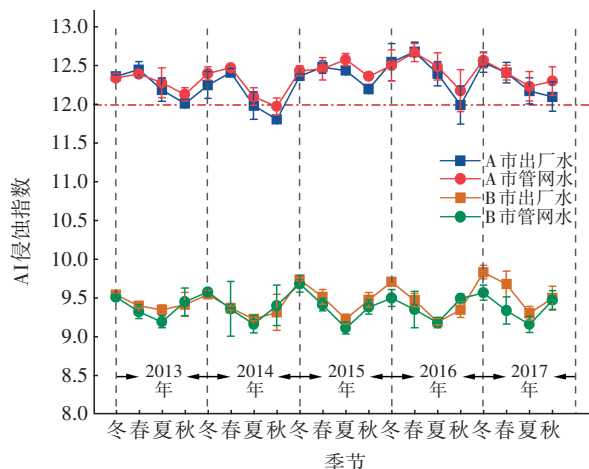


图3 2013年—2017年A市与B市AI值的变化

Fig.3 Variation of AI values of city A and city B from 2013 to 2017

从图3还可以看出,B市出厂水和管网水的AI值分别为9.00~9.91和8.99~9.84,属于严重侵蚀。5年间AI年平均指数较为稳定。出厂水和管网水AI值呈现冬高夏低的变化规律。

A市AI值高于B市($p<0.01$,差异极显著),具有不易侵蚀、较稳定的特征,这是由于A市影响AI值的pH、总硬度和总碱度较高,证明上述指标对水质的侵蚀性有较大影响^[7]。两市出厂水与管网水AI值的年和季节变化规律基本相同。

2.2.4 拉森比率

A市出厂水与管网水LR值分别为1.38~5.53和1.36~5.82,两者的年、季节变化规律基本一致(见图4)。2013年—2014年两者的LR年度平均值较稳定,随后逐年上升。2013年—2015年两者的拉森比率位于1.47~2.60,随季节波动较小。2016年和2017年的夏季分别出现次极大值和极大值。2016年和2017年波动较大,且夏季拉森比率较高,呈现腐蚀的特征。

从图4还可以看出,B市出厂水LR值为0.81~7.76,2015年春季出现异常值6.61,随季节波动较为明显;管网水拉森比率为0.70~2.14,2013年—

2017年期间较为稳定,呈腐蚀特征。5年来,出厂水和管网水的拉森比率均未呈现有规律的季节变化。有研究表明^[8],氯离子和硫酸根离子含量越高,铁释放速率越快,并且硫酸根和氯离子调节LR至相同时,氯离子对铁释放的促进作用更大^[9]。B市出厂水与管网水中硫酸根离子浓度较为相近,而出厂水中氯离子浓度较高,故出厂水LR值较高。

A市LR值高于B市($p<0.01$,差异极显著),LR值受硫酸盐、氯化物和碳酸氢盐的影响,根据拉森比率的计算公式并结合具体数据进行分析,主要是由于A市硫酸盐浓度与氯离子浓度均高于B市。

根据以上4个化学稳定性评判指标,得出两市水质综合评价结果,见表2。北方A市 I_L 值为 $-0.47\sim-0.97$, I_R 值为 $6.26\sim8.33$;春夏 I_L 值 >0 , I_R 值在7左右,水质呈化学稳定或结垢特性;秋冬 I_L 值有小于0的情况, I_R 值 >7.2 ,呈现轻度腐蚀的特性。AI值为 $11.74\sim12.86$,表明水质对石棉水泥管具有中等侵蚀特性,LR值为 $1.36\sim5.82$,对金属管具有腐蚀性。南方B市 I_L 值为 $-2.89\sim-1.99$, I_R 值为 $10.96\sim$

12.34,全年均以严重腐蚀为主,同时,与春夏季相比,秋冬季 I_L 值较小, I_R 值较大,说明水质腐蚀在秋冬季更为严重,AI值为 $8.99\sim9.91$,表明水质对石棉水泥管具有重度侵蚀特性,LR值为 $0.70\sim8.02$,对金属管具有腐蚀特性,无明显季节变化的规律。

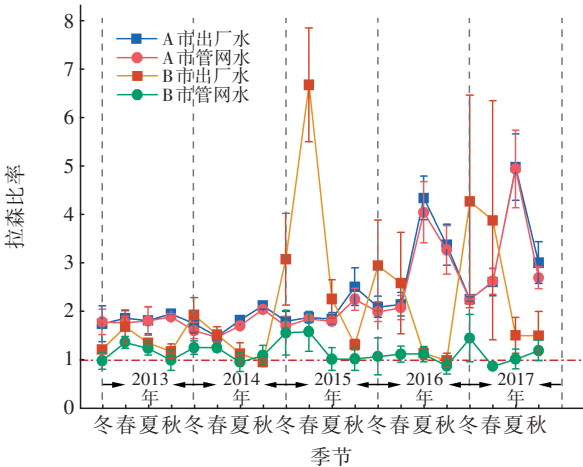


图4 2013年—2017年A市与B市拉森比率的变化
Fig.4 Variation of Larson ratio of city A and city B from 2013 to 2017

表2 两市水质化学稳定性指标综合评价结果

Tab.2 Comprehensive evaluation results of water quality of city A and city B from 2013 to 2017					
取样点	I_L	I_R	AI	LR	综合评价结果
A市水厂	$-0.47\sim-0.97$	$6.26\sim8.33$	$11.74\sim12.86$	$1.38\sim5.53$	春夏基本稳定
	春夏高,秋冬低	冬高夏低	秋季高	腐蚀	秋冬轻度腐蚀
A市管网	$-0.21\sim-0.94$	$6.38\sim8.00$	$11.87\sim12.84$	$1.36\sim5.82$	春夏基本稳定
	春夏高,秋冬低	冬高夏低	稳定	腐蚀	秋冬轻度腐蚀
B市水厂	$-2.68\sim-1.99$	$10.96\sim11.09$	$9.00\sim9.91$	$0.81\sim7.76$	腐蚀为主
	秋冬高,春夏低	春夏高,秋冬低	冬高夏低	腐蚀	秋冬腐蚀严重
B市管网	$-2.89\sim-2.11$	$11.17\sim12.34$	$8.99\sim9.84$	$0.70\sim2.14$	腐蚀为主
	秋冬高,春夏低	春夏高,秋冬低	冬高夏低	腐蚀	秋冬腐蚀严重

A、B两市水质指标和化学稳定性指标有明显差异,同一地区出厂水和管网水的水质指标和化学稳定性指标数值相近,也基本呈相同的年、季节变化趋势。这是由于我国不同地区水源水质差异较大,而出水厂和管网水的水质指标主要受其影响。A市2015年由于供水资源紧缺,水源水发生改变,多项水质指标较往年有所升高,造成供水管网水质稳定性指标也相应发生变化,但经过数月后进入稳定期,呈现与之前不同的季节变化规律,这与郑少博^[10]、鲁智礼等^[11]的研究结果相符。管网输配过程中水质化学稳定性变化不大,因此可通过控制pH与总碱度等关键因素保障出厂水的化学稳定性。

3 结论

① 水温、pH、总硬度、总碱度、硫酸盐、氯化物等常规水质指标是影响水质化学稳定性的重要因素。北方地区A市呈现春夏基本稳定、秋冬轻度腐蚀的特征,这是由水体中硫酸盐和氯化物含量较高导致的;南方地区B市全年呈现腐蚀为主的特征,尤其秋冬腐蚀严重,这归因于水体总硬度较低,总体而言A市的出厂水与管网水化学稳定性较好。

② 相较于出厂水,管网水的水质稳定性没有明显变化,因此改善管网水质化学稳定性的关键是控制出厂水的化学稳定性。水源切换会导致水质化学稳定性指数的突然变化,运行一定时间后会趋

于稳定。不同地区水质特性对化学稳定性有着不同的影响,水厂应根据当地水质情况调整工艺参数以保障水质化学稳定性。

参考文献:

- [1] KIM Y K. Implications of the corrosion index for the quality of flowing tap water and the effects of added alkalinity on corrosion control [J]. *Water and Environment Journal*, 2017, 31(3): 56-61.
- [2] 陈德俊,刘婷婷,宋媛. 大港油田供水管网系统水质化学稳定性与变化规律[J]. *供水技术*, 2020, 14(6): 5-8.
- CHEN Dejun, LIU Tingting, SONG Yuan. Variation rule of chemical stability of water in the Dagang oilfield water supply network system [J]. *Water Technology*, 2020, 14(6): 5-8 (in Chinese).
- [3] 赖乃聪,游浩荣,钟福宏,等. 典型南方地区城市供水管网水质状况分析[J]. *净水技术*, 2015, 34(S1): 57-61.
- LAI Naicong, YOU Haorong, ZHONG Fuhong, *et al.* Analysis of water quality status of water supply network in typical areas in southern China [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(S1): 57-61 (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: 11-59.
- 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: 11-59 (in Chinese).
- [5] 郭浩,田一梅,张海亚,等. 铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(12): 70-75.
- GUO Hao, TIAN Yimei, ZHANG Haiya, *et al.* Research progress on internal corrosion of iron-metal pipes of water distribution systems [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(12): 70-75 (in Chinese).
- [6] 刘杨. 再矿化淡化水进入既有市政管网水质稳定性控制研究[D]. 天津:天津大学,2012: 26-56.
- LIU Yang. Control of Chemical Stability of Remineralized Desalinated Water in the Existing Municipal Pipeline Network [D]. Tianjing: Tianjing University, 2012: 26-56 (in Chinese).
- [7] 郑丹丹. 石灰-二氧化碳联用改善S市供水管网水质化学稳定性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020: 35-39.
- ZHENG Dandan. Research on Improvement of Water Chemical-stability of Drinking Water Distribution System by Lime and Carbon Dioxide Process in S City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 35-39 (in Chinese).
- [8] 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: 30-41.
- SHANG Xiuzhu. The Impact of Water Quality Variation on Water Supply Pipeline Corrosion [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013: 30-41 (in Chinese).
- [9] 宛云杰,鲁智礼,石宝友,等. 调节拉森指数和碳酸钙沉淀势对管网铁释放的影响[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(19): 1-7.
- WAN Yunjie, LU Zhili, SHI Baoyou, *et al.* Effects of Larson ratio and calcium carbonate precipitation potential adjustment with different chemicals on iron release in distribution system [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(19): 1-7 (in Chinese).
- [10] 郑少博. 南水北调原水水源对北京供水管网水质的影响及控制技术[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015: 48-55.
- ZHENG Shaobo. The South to North Water Diversion Project Water Source of Raw Water Impact on Beijing Water Supply Network and Control Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 48-55 (in Chinese).
- [11] 鲁智礼,徐硕,石宝友,等. 水源切换对管网铁释放影响的中试模拟研究[J]. *给水排水*, 2013, 39(5): 146-150.
- LU Zhili, XU Shuo, SHI Baoyou, *et al.* Simulation pilot study on the switch between multiple water sources on iron corrosion products release in water supply network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 39(5): 146-150 (in Chinese).

作者简介:代雪宁(1998-),女,四川安岳人,硕士,研究方向为供水系统水质生物安全评价与控制技术。

E-mail:shirley_daixuening@163.com

收稿日期:2021-10-08

修回日期:2022-02-25

(编辑:任莹莹)