

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0086

沙懿,张弦,王宇晖.氯离子浓度和碱度对给水管网管垢重金属锰释放的影响[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):183-188.  
SHA Y,ZHANG X,WANG Y H.The influence of chloride and alkalinity on the release of heavy metal manganese in the drinking water network[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(3):183-188.(in Chinese)

## 氯离子浓度和碱度对给水管网管垢 重金属锰释放的影响

沙懿,张弦,王宇晖

(东华大学 环境科学与工程学院,上海 201620)

**摘要:**通过静态释放实验,研究了水源切换造成原水中不同浓度的氯离子和碱度对管网管垢中重金属锰释放的影响。选取郑州市给水管网管段,设计模拟释放反应装置,配制不同浓度氯离子(5 mg/L、23.1 mg/L、60 mg/L、90 mg/L)和碱度(52.5 mg/L、125 mg/L、200 mg/L)的实验用水,比较分析氯离子浓度和碱度变化对管垢重金属锰释放的影响。根据实验结果初步推断:氯离子浓度和碱度与管垢中金属锰的释放浓度有较高相关性,且实验中氯离子浓度是影响管网管垢锰释放的首要因素。当氯离子浓度为30 mg/L,停留时间60 h,锰的释放量达到最大为108 mg/L,之后释放浓度趋于平稳。在氯离子浓度促进锰释放的条件下,碱度与管垢中锰的释放量表现出明显相关性。实验结果可为水源切换引起的水质差异对给水管网管垢锰释放问题提供一定参考。

**关键词:**氯离子;碱度;给水管网;锰释放;管垢

**中图分类号:**TU 991 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1683(2018)03-0183-06

### The influence of chloride and alkalinity on the release of heavy metal manganese in the drinking water network

SHA Yi,ZHANG Xian,WANG Yuhui

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Static release experiments were designed to investigate the effect of different chloride concentrations and alkalinity of source water on manganese release in drinking water distribution systems. We sampled pipe scale from the drinking water network of Zhengzhou and prepared experiment water with different concentrations of chloride (5 mg/L, 23.1 mg/L, 60 mg/L, 90 mg/L) and alkalinity (52.5 mg/L, 125 mg/L, 200 mg/L). A reactor was designed for simulating manganese release. We analyzed the effect of chloride and alkalinity concentration changes on the manganese release of water pipe scale. The results indicated that the chloride concentration and alkalinity were highly correlated with the manganese release in drinking water network. Chloride was the primary factor affecting the manganese release of water pipe scale. In this experiment, when the concentration of chloride was 30 mg/L, with a residence time of 60 hours, the manganese release reached the maximum of 108 mg/L, and then the release became steady. Under the condition that the concentration of chloride promoted manganese release, the alkalinity and the manganese release of pipe scale showed an obvious correlation. The results of the experiment can provide a reference for studying manganese release in drinking water distribution systems after water source switching.

**Key words:** chloride; alkalinity; drinking water network; manganese release; pipe scale

收稿日期:2017-09-18 修回日期:2018-03-02 网络出版时间:2018-03-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180328.1101.002.html>

基金项目:国家科技支撑计划项目“南水北调中线水质差异应对关键技术研究与应用”(2015BAB07B09)

Fund: Research and Application of Key Technologies for Water Quality Difference in the Middle Route of South to North Water Transfer (2015BAB07B09)

作者简介:沙懿(1993-),女,上海崇明人,主要从事不同特征水源对给水管网管垢金属释放影响方面研究。E-mail:YINUOYM@163.com

通讯作者:王宇晖(1984-),男,上海浦东人,副教授,博士,主要从事环境数值模拟、污废水生态处理及土壤地下水环境修复技术等研究。E-mail:yhwang@dhu.edu.cn

饮用水水质的保障一直受到供水行业的普遍关注。国内外的很多水厂在实际运行中发现,即使水厂出水各项水质指标都达标,但是经过水管输送,用户出水仍然可能出现一些指标超标的现象<sup>[1-2]</sup>。原因是自来水在水管中长距离长时间的输送、多水源供水以及季节性水源切换,水源和给水管网管垢发生了一系列的物理、化学和生物反应,从而产生了管网水质不稳定,甚至是恶化现象<sup>[3-4]</sup>。如南水北调中线工程<sup>[5-6]</sup>,自 2014 年中线工程竣工,北方部分城市启动了外调丹江口水库水源和本地水源水切换的供水模式。相关研究表明<sup>[7]</sup>低碱度高氯离子浓度对铸铁管道有较强的腐蚀性,容易引起破坏水源水质稳定性,造成金属离子的溶解释放,可能引起给水管网“黄水”问题。又如在淡化海水工程中,资料显示<sup>[8]</sup>含有高浓度氯离子的海水在进入输水管道以后,严重腐蚀了铸铁管道,从而引起了金属的过量释放。

不同水源的水质差异主要包括 pH、电导率、碱度、氯离子和硫酸根等。不同特征的水源可能造成给水管网管垢的溶解,造成了各种金属离子不同的释放现象<sup>[9-10]</sup>。Larson 和 Skold<sup>[11]</sup>研究表明,氯离子、硫酸根和重碳酸根是影响金属腐蚀的重要因素,并且定义了 Larson 指数(LR),见式(1)。

$$LR = \frac{2[SO_4^{2-}] + [Cl^-]}{[HCO_3^-]} \quad (1)$$

大量研究表明<sup>[12-14]</sup>,控制拉森指数可降低水源切换时引起的水质恶化风险。部分研究者表示<sup>[15]</sup>,强腐蚀性水源进入地下水管网时,金属释放与水的拉森指数具有显著相关性;但是强腐蚀性水源进入地表水管网时,金属释放与拉森指数无显著相关性。其他研究者<sup>[16]</sup>认为对于旧铸铁管,拉森指数与金属释放速率具有相关性,随着拉森指数的增加,金属释放速率升高,相关关系为非线性。

1985 年, Montgomery<sup>[11, 17]</sup>关于水质的化学稳定性首次提出碳酸钙沉淀势(CCPP),针对结垢性或者腐蚀性的给水管网,定量计算出碳酸钙沉淀或溶解量的数值。CCPP 有两种定义方式,分别是以钙离子浓度和碱度定义,见式(2)、式(3)。

$$CCPP = 100([Ca^{2+}]_i - [Ca^{2+}]_q) \quad (2)$$

$$CCPP = 50000(Alk_i - Alk_q) \quad (3)$$

式中: $[Ca^{2+}]_i$ 和 $[Ca^{2+}]_q$ 分别表示水中原来的和碳酸钙平衡后的 $Ca^{2+}$ 的浓度; $Alk_i$ 和 $Alk_q$ 表示水中原来的和碳酸钙平衡后的碱度。温柔和王刚亮<sup>[18-19]</sup>等研究者表示可以通过提高水源的 pH、碱度和钙离子浓度来增大 CCPP,或者通过增加碱

度、降低氯离子浓度减小拉森指数,从而抑制管网金属释放。

国内有研究者<sup>[20]</sup>提出水质腐蚀性判断指数 WQCR,参考了拉森指数的同时考虑到了硝酸盐、溶解氧和余氯对管网管垢金属释放的影响,见式(4)。

$$WQCR = \frac{[\text{氯离子}] + [\text{硫酸盐}] + [\text{硝酸盐}]}{[\text{碱度}][\text{溶解氧} + \text{余氯}]} \quad (4)$$

氯离子浓度和碱度对严重影响了水质稳定性。目前关于差异性水源对给水管网管垢铁释放的影响已有大量研究探讨了其规律性,而相对于锰的释放鲜有报道。因此,本文采集南水北调中线受水区管道管垢样本为实验对象,结合各受水区水质监测资料,建立静态试验装置,定量分析研究了不同浓度氯离子和碱度对管网锰释放的影响作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料与方法

于 2016 年 3 月赴中线沿线城市河南郑州市政管网施工现场进行现场取样。获取管段材质为无衬 DN100 铸铁管,水管管龄约 30 a。管垢表面形态为表面薄层垢。管垢使用刮刀小心取下,使用自封袋排出空气后密封保存。管垢带回实验室后,在无氧环境下使用玛瑙研钵进行研磨,在 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下冷冻干燥后,对管垢进行 ICP 金属元素精确定量测试。利用美国水中矿物离子平衡计算软件 Visual MINTEQ 3.1 计算各离子浓度平衡以确定模拟供水的实验用水配水方案。在实验室中,根据不同配水方案,利用去离子水分别配制含不同浓度氯离子和碱度的实验用水,其它离子浓度依据北方某市给水管网原通水水质配置<sup>[21-22]</sup>。选用黑色不透光的聚乙烯水桶进行静态模拟管垢重金属锰的释放实验。分析比较不同配水方案对锰离子释放浓度的影响。实验装置见图 1。

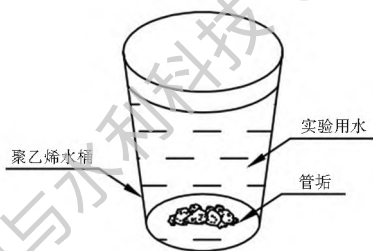


图 1 管垢模拟反应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulated scale reaction

### 1.2 实验方法

实验通过考察各受水区水质监测资料,归纳总结中线受水区水质特征,并在实验室中根据各水质

特征调配接近各受水区水质特征的模拟实验用水,以揭示管垢重金属离子释放的规律。根据相关文献<sup>[23-24]</sup>,丹江口地表水硫酸根、氯离子、碱度分别平均维持在 30 mg/L、45 mg/L 和 105 mg/L 左右。而受水区不同类型的各水厂硫酸根、氯离子、碱度变化范围分别在 23~82 mg/L、15~40 mg/L 和 130~220 mg/L。

根据以上对受水区水质特征的分析,研究调配的模拟实验用水的氯离子、硫酸根和碱度应覆盖上述水质的变化范围,水中其他主要离子取值参考北方某市长期通地下水区域<sup>[21]</sup>。在模拟水调配时,考虑如下内容。

(1)除了硫酸根、氯离子、碳酸氢根(碱度)浓度外,其他基本离子,如钙离子、镁离子、硝酸根离子等的浓度与各水源水长期平均浓度保持基本一致;

(2)调配时,维持室温 25℃,调配后的模拟水用避光储水桶存储待用。实验用水使用时,再次检测水中各类离子的初始浓度;

(3)若调配实验用水时,pH 值与水源水有差异或阴阳离子不平衡,在不改变硫酸根、氯离子、碳酸氢根浓度情况下,通过添加硝酸盐和有机酸调节离子平衡和 pH 值。因此,研究不考虑微生物对管垢的影响作用。

配制的实验用水中氯离子初始浓度为 5 mg/L、23.1 mg/L、60 mg/L、90 mg/L,硫酸根初始浓度为 20 mg/L、24.7 mg/L、60 mg/L、100 mg/L,碱度(以 CaCO<sub>3</sub> 计)为 52.5 mg/L、125 mg/L、200 mg/L。其他水质参数均保持一致:硬度(以 CaCO<sub>3</sub> 计)73.1 mg/L, Ca<sup>2+</sup>(以 CaCO<sub>3</sub> 计)57.3 mg/L, Mg<sup>2+</sup>(以 CaCO<sub>3</sub> 计)15.8 mg/L, pH 值 7.1~7.5。以上浓度范围基本涵盖了受水区水质指标中氯离子、硫酸根、碱度的变化范围。

取样时间一共 6 d,第一天每隔两小时取样,共 7 个样本,第二天至第六天每天取一个样本。检测的水质指标包括 pH、DO、电导率、碱度以及锰的质量浓度,具体的检测方法见表 1。将实验所得数据通过 IBM SPSS Statistics 软件进行统计分析。

表 1 水质检测指标所用检测方法和仪器<sup>[25]</sup>

Tab. 1 Test methods and instruments for water quality indexes<sup>[25]</sup>

检测指标	检测方法
pH	HACH 40d
DO/(mg·L <sup>-1</sup> )	HACH 40d
电导率/(μS·cm <sup>-1</sup> )	雷磁 DDS 307 电导率仪
碱度/(mg·L <sup>-1</sup> ),(以 CaCO <sub>3</sub> 计)	酸碱指示剂滴定法
锰/(μg·L <sup>-1</sup> )	ICP-MS(赛默飞世尔 iCAP Q)

## 2 结果与讨论

### 2.1 管垢物理化学特征分析

通过对管垢进行 ICP<sup>[26]</sup>(ICP 原子发射光谱 Agilent 720)全元素精确定量测试,分析样品的元素含量,测试结果见表 2。

表 2 ICP 元素含量分析

元素	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
Fe	365 681.22	381 810.59	359 796.23	316 512.87
Ca	33 792.33	20 925.64	8 462.93	24 557.45
Al	3 397.53	3 349.58	3 547.72	4 143.59
Mg	2 223.34	1 810.42	1 783.62	2 320.62
Mn	1 217.23	985.79	2 523.66	1 449.51
Zn	61.85	54.12	60.03	54.74
Cu	35.65	35.42	23.9	29.2
Sn	22.69	23.15	19.49	23.68
Ni	14.53	13.22	13.75	13.15

测试得出,管垢中铁是最主要的化学成分,基本由铁及其化合物组成。其次,管垢中含量较多的化学元素为钙、铝、镁、锰。其中,锰的平均含量为 1 544.05 mg/kg,铁的平均含量为 355 950 mg/kg。因此,在管垢和水源接触的条件下,金属元素发生反应溶解到水中。在水源水质特征发生变化时,包括氯离子、硫酸根离子和碱度的改变,直接影响了管垢中各种金属的释放速率。

### 2.2 氯离子浓度对管网锰释放的影响

实验中对水样连续定时检测,以 pH、DO、电导率、碱度为参考对象,研究了氯离子浓度变化对水质的影响,定量评价氯离子浓度变化对管垢锰释放的影响规律。如图 2 显示的是在硫酸根为 24.7 mg/L,碱度为 125 mg/L 的情况下,锰元素的释放过程。

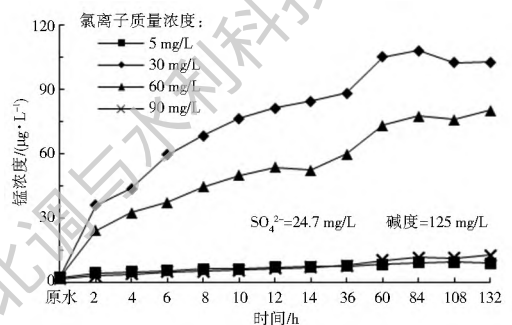


图 2 氯离子浓度变化对管垢锰释放的影响

Fig. 2 The influence of chloride concentration on the release of scale manganese

由图 2 可知, 锰在 36 h 之前为主要溶解阶段, 在 36 h 之后基本保持平稳, 即达到了最大释放量。水中氯离子的浓度不同, 相应的锰的浓度也有所不同。表现为: 当 Cl<sup>-</sup> 为 30 mg/L 时, 锰的总释放量最大, 其次是 Cl<sup>-</sup> 为 60 mg/L 时; 当 Cl<sup>-</sup> 为 5 mg/L、90 mg/L 时, 锰的释放量接近并且较小。不同的氯离子水平下, 实验得出的锰释放量的统计平均值和氯离子质量浓度的关系见图 3。

数据通过 IBM SPSS Statistics 分析可得出相同结论, 如表 3 所示。推测其中原因可能是适量的氯离子促进了锰氧化物的溶解, 但是过度的氯离子导致了锰的再次沉淀堆积在管垢表面, 从而抑制了锰的溶解释放, 化学反应式如下:

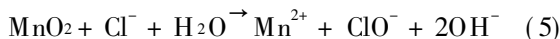


表 3 氯离子浓度与总锰释放量的相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between chloride concentration and total manganese release

alpha= 0.05 的子集				
	Cl	N	1	2
Duncan <sup>a, b</sup>	90.000	6	12.53282	
	5.000	12	20.36674	
	60.000	12	36.41831	
	23.100	27	36.56016	
	30.000	12		90.23041
显著性			0.171	1.000

注: 显示同质子集中群组的平均值。a. 使用调和平均值样本大小=11.020。b. 群组大小不相等。将使用群组大小的调和平均值。不保证类型 1 错误层级。

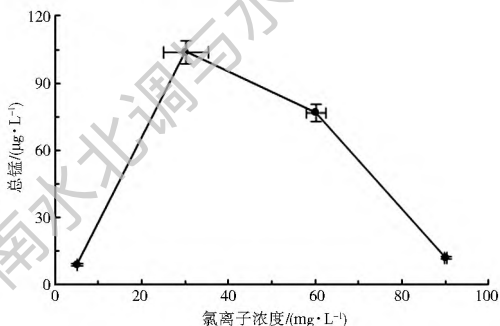


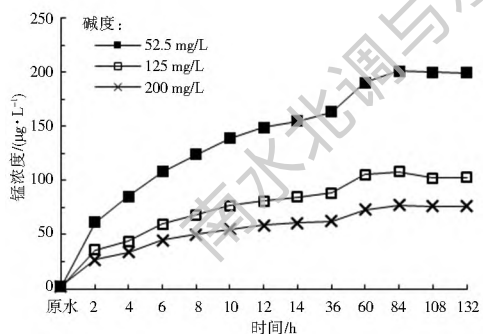
图 3 氯离子浓度与总锰释放量的关系

Fig. 3 Relationship between chloride concentration and total manganese release

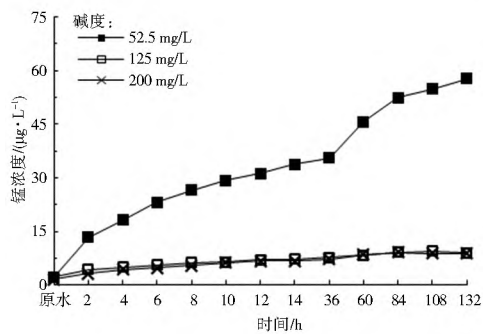
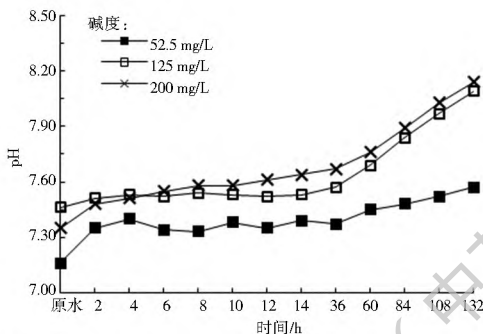
根据图 3 得出, 氯离子浓度和管垢的锰释放有一定的相关性, 氯离子偏大和偏小时, 都不会促使锰元素的释放, 氯离子在中间某一浓度下, 最有利于锰的释放。本实验中, 当 Cl<sup>-</sup> 浓度为 5 mg/L、90 mg/L 时, 锰微量释放, 管垢基本表现为稳定。实验所得

### 2.3 碱度对管网锰释放的影响

如图 4 所示的是在 Cl<sup>-</sup> 浓度为 5 mg/L 和 30 mg/L 时, 不同碱度对锰释放以及 pH 值的影响。实验中碱度梯度设置为 52.5 mg/L、125 mg/L、200 mg/L。



(a) Cl<sup>-</sup>浓度为30 mg/L



(b) Cl<sup>-</sup>浓度为5 mg/L

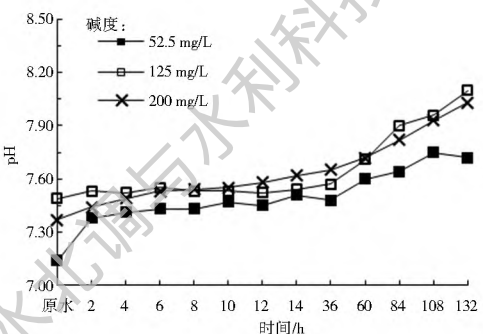


图 4 碱度与锰释放关系

Fig. 4 Relationship between alkalinity and manganese release

实验表明, 碱度增加能抑制锰元素的释放。可以看到, 当  $\text{Cl}^-$  分别为  $5 \text{ mg/L}$  和  $30 \text{ mg/L}$  时, 低碱度 ( $52.5 \text{ mg/L}$ ) 都能有效抑制锰的释放, 尤其是当  $\text{Cl}^-$  浓度很低, 碱度为  $200 \text{ mg/L}$ , 锰的平衡释放浓度约为  $10 \text{ mg/L}$ 。然而在相同高浓度碱度时,  $\text{Cl}^-$  浓度的升高能显著提高锰的释放。因此可以推断, 氯离子浓度相对于碱度而言, 对锰的释放影响更大, 但是氯离子浓度和碱度对锰的释放没有明显交互作用 ( $P > 0.05$ )。

由图 4 可知, 原水 pH 值呈现明显上升趋势, 并且原水碱度越高, 平衡浓度 pH 越高。当  $\text{Cl}^-$  浓度为  $5 \text{ mg/L}$  时, 碱度为  $52.5 \text{ mg/L}$  时, 相应的 pH 值相对较低, 水中锰的释放最大; 碱度较高 ( $125 \text{ mg/L}$ 、 $200 \text{ mg/L}$ ) 时, pH 值较接近, 此时锰的释放浓度都较低, 即碱度对管垢的锰释放无明显影响。当  $\text{Cl}^-$  浓度为  $30 \text{ mg/L}$  时, 随着碱度的升高, pH 值降低, 管垢中锰的释放量明显减少。碱度从  $52.5 \text{ mg/L}$  升高至  $200 \text{ mg/L}$  时, 总的锰释放最大相差  $124 \text{ mg/L}$ 。由于管垢中的沉积物主要是金属的碳酸盐, 因此, 可以推测碱度对锰释放的影响原理是随着碱度的升高, 促进了平衡反应向碳酸锰沉淀方向进行, 直接导致了锰浓度的降低。

不同水质特征条件下, 总锰释放量的平均值与氯离子浓度和碱度的关系见图 5。

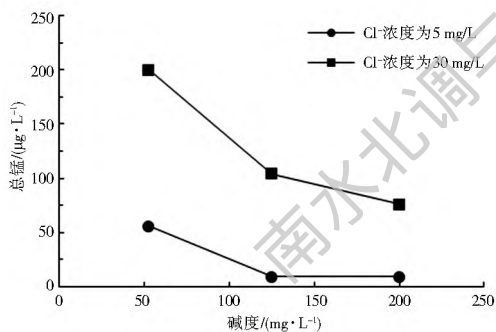


图 5 碱度与总锰释放量的关系

Fig. 5 Relationship between alkalinity and total manganese release

图 5 表明, 影响管垢锰释放的重要因素是氯离子浓度, 其次是碱度。在氯离子浓度较低时, 锰的释放总量总体较低, 碱度对锰的释放基本不明显; 在氯离子浓度较高时, 随着碱度的降低, 水中锰的释放总量明显升高。实验过程中溶解氧均表现为下降, 下降范围为 ( $0.41 \sim 0.59$ )  $\text{mg/L}$ , 推测可能是受微生物影响。而电导率表现为基本维持稳定 ( $\pm 20 \mu\text{S/cm}$ )。

### 3 结论

(1) 氯离子浓度和管垢的锰释放有一定的相关性, 氯离子偏大和偏小时, 都不利于锰元素的释放,

本实验中, 当  $\text{Cl}^-$  为  $30 \text{ mg/L}$  时, 锰的释放最大。

(2) 相比氯离子和碱度, 氯离子是影响给水管网水源锰释放总量的首要因素。

(3) 氯离子浓度较低时, 对管垢锰释放影响不大, 此时碱度变化对锰释放也基本无影响; 在氯离子浓度达到  $30 \text{ mg/L}$  左右时, 管垢锰释放总量到达最大, 此时碱度与管垢中锰释放有明显相关性, 锰的释放随着碱度的降低而升高。

(4) 氯离子和碱度对管垢锰释放无明显交互作用。

### 参考文献 (References):

- [1] 翁立达, 叶闽, 娄保锋, 等. 南水北调中线工程水源地的水质保护[J]. 人民长江, 2005, 36(12): 24-25. (WENG L D, YE M, LOU B F, et al. Water quality protection of the water source in the middle route of the south to North Water Diversion Project [J]. Yangtze River, 2005, 36(12): 24-25. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2005.12.012.
- [2] 林明利, 张全, 李宗来, 等. 南水北调中线输水水质水量变化特征及城市供水应对措施建议[J]. 给水排水, 2016; 42(4): 9-13. (LIN M L, ZHANG Q, LI Z L, et al. Characteristics of the variance of the water quality and quantity in the middle route of South to North Diversion Project and corresponding measures for urban water supply[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016; 42(4): 9-13. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2016.0108.
- [3] 牛璋彬, 王洋, 张晓健, 等. 给水管网中铁释放现象的影响因素研究[J]. 环境科学, 2007; 28(10): 2270-2274. (NIU Z B, WANG Yang, ZHANG X J, et al. Effect on iron release in drinking water distribution systems [J]. Environmental Science, 2007; 28(10): 2270-2274. (in Chinese))
- [4] 米子龙, 张晓健, 陆品品, 等. 硫酸根浓度突变对给水管网铁释放的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013(5): 660-664. (MI Z L, ZHANG X J, LU P P, et al. Effect of sulphate concentration change on iron release in drinking water distribution systems [J]. J. T singhua Univ (Sci & Tech), 2013(5): 660-664. (in Chinese))
- [5] 徐硕. 水源切换对管网铁释放影响的模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2013. (XU S. Simulation pilot study on the effect of water source switch on iron release in drinking water distribution system [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2013. (in Chinese))
- [6] 王振华, 黄苗, 吴敏. 南水北调中线水源地水质保护立法及建议[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(6): 59-64. (WANG Z H, HUANG Z, WU M. Status quo and suggestions of laws and regulations protecting water source in the middle route of the South to North water transfer project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(6): 59-64. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2015.06.011.
- [7] 米子龙, 郭慧婷, 张晓健, 等. 低 pH 低碱度水源地引起供水管网黄水的控制措施[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 23-27. (MI Z L, WU H T, ZHANG X J, et al. Control measures for

- red water problem caused by low pH and low alkalinity source water in drinking water distribution systems[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(18): 23-27. (in Chinese)
- [8] 米子龙. 水源切换对给水管网水质铁稳定的影响及控制特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. (MI Z L. Characteristics of iron stability caused by water source switch and iron release control in drinking water distribution systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))
- [9] 黄廷林, 戴雪峰, 王旭冕, 等. 多水源供水管网中铁释放规律[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(3): 834-838. (HUANG T L, DAI X F, WANG X M, et al. Law of iron release in water supply network with multiple water resources[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(3): 834-838. (in Chinese))
- [10] 孙慧芳, 石宝友, 吴永丽, 等. 硫酸根、溶解氧和余氯对管垢铁释放的影响[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(22): 58-63. (SUN H F, SHI B Y, WU Y L, et al. Effects of sulphate, dissolved oxygen and residual chlorine on iron release from cast iron pipes with different scale characteristics [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(22): 58-63. (in Chinese))
- [11] 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(19): 1-7. (WAN Y J, LU Z L, SHI B Y, 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(19): 1-7. (in Chinese))
- [12] 李玉仙, 顾军农, 王敏, 等. 地下水供水区域水源切换腐蚀产物释放控制技术[J]. *中国给水排水*, 2014(20): 28-31. (LI Y X, GU J N, WANG M, et al. A novel method of controlling iron release in groundwater supply area pipes after water source switch[J]. *China Water & Wastewater*, 2014(20): 28-31. (in Chinese))
- [13] 张雅君, 姚凌峰, 孙丽华, 等. 水质变化时垢层对铸铁腐蚀的影响作用[J]. *水处理技术*, 2016(4): 75-79. (ZHANG Y J, YAO L F, SUN L H, et al. Influence of corrosion scale on cast iron under the change of water qualities[J]. *Technology of water treatment*, 2016(4): 75-79. (in Chinese)) DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2016.04.017.
- [14] 张雅君, 杜婷婷, 孙丽华, 等. 拉森指数对再生水管网腐蚀状况的影响研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2016, 28(5): 449-454. (ZHANG Y J, DU T T, SUN L H, et al. Influence of Larson index on corrosion of reclaimed water pipeline[J]. *Corrosion science and protection technology*, 2016, 28(5): 449-454. (in Chinese)) DOI: 10.11903/1002.6495.2015.352.
- [15] 白迪祺, 李玉仙, 王敏, 等. 水源切换条件下管网发生“黄水”的预测与控制措施[C]. 环境水质学国家重点实验室, 2012. (BAI D Q, LI Y X, WANG M, et al. Forecast and control of red water in distribution system during the source water switch[C]. State key laboratory of environmental aquatic chemistry. 2012. (in Chinese))
- [16] 王洋, 张晓健, 陈超, 等. 水源切换引起给水管网黄水问题原因分析[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3555-3561. (WANG Y, ZHANG X J, CHEN C, et al. Case study of red water phenomenon in drinking water distribution systems caused by water source switch[J]. *Environmental Science*. 2009, 30(12): 3555-3561. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjcx.2009.12.044.
- [17] 刘扬. 水质变化对腐蚀管段中铁释放的影响[D]. 天津: 天津大学, 2010. (LIU Y. The effect of water quality variations on iron release in corroded pipe[D]. Tianjing: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [18] 温柔, 刘文君. 淡化海水水质调节技术对管网铁释放的影响[J]. *给水排水*, 2016(9): 110-115. (WEN R, LIU W J. Control effect of regulating desalinated seawater quality parameters on iron release in drinking water distribution system[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016(9): 110-115. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2016.0436.
- [19] 王刚亮. 水源切换条件下给水管网铁释放控制的中试研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2014. (WANG G L. Pilot study on iron release control in drinking water distribution system under source water switch[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2014. (in Chinese))
- [20] 李玉仙, 王敏, 李礼, 等. 水源切换条件下管网管垢稳定性和水质腐蚀性判定指标探讨[J]. *给水排水*, 2015(2): 110-114. (LI Y X, WANG M, LI L, et al. Discussion of index for pipe scale stability in water distribution system under water source switching [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015(2): 110-114. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2015.0065.
- [21] 杨帆, 石宝友, 王东升, 等. 水质化学组分变化对管道铁释放及管垢特征的影响[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(23): 59-64. (YANG F, SHI B Y, WANG D S, et al. Effect of water chemistry changes on iron release and corrosion scale properties of old cast iron pipes[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(23): 59-64. (in Chinese))
- [22] 石宝友, 鲁智礼, 徐硕, 等. 丹江口水源对北方某市管网铁释放影响的研究[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(11): 33-39. (SHI B Y, LU Z L, XU S, et al. Effect of Danjiangkou reservoir water source on iron release in water distribution system of a northern Chinese city[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(11): 33-39. (in Chinese))
- [23] 王璐. 南水北调水源切换对北京供水管网的影响及应对[D]. 北京: 清华大学, 2015. (WANG L. Effects of water source switching by South to North Water Diversion Project on distribution systems in Beijing[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))
- [24] 唐敏, 王海波, 黄显怀, 等. 水源切换条件下模拟管网铁离子释放控制[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(1): 13-16. (TANG M, WANG H B, HUANG X H, et al. Control iron release in model drinking water distribution system under water source switch. [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(1): 13-16. (in Chinese))
- [25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. (Ministry of Environmental Protection of China. Methods to monitor and analysis water and wastewater[M]. 4 version. Beijing: China environmental science press, 2002. (in Chinese))
- [26] 罗立东, 范爱萍, 王洋, 等. ICP-MS法测定水源水和出厂水中的14种金属元素[J]. *城镇供水*, 2008(3): 55-56. (LU O L D, FAN A P, WANG Y, et al. Determination of 14 metal elements in source water and drinking water by ICP-MS[J]. *City and town water supply*, 2008(3): 55-56. (in Chinese)) DOI: 10.14143/j.cnki.czgs.2008.03.027.