

# 水源切换引起给水管网黄水问题原因分析

王洋<sup>1</sup>, 张晓健<sup>1\*</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 潘安君<sup>2</sup>, 徐扬<sup>3</sup>, 廖平安<sup>2</sup>, 张素霞<sup>3</sup>, 顾军农<sup>3</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京市水务局, 北京 100038; 3. 北京市自来水集团, 北京 100031)

**摘要:** 针对水源切换造成黄水问题的原因开展试验研究. 对水源切换前后原水水质进行分析, 连续 3 个月跟踪监测出现黄水问题用户出水水质变化, 利用 XRD、SEM 和 EDS 对出现黄水问题管段的管垢进行分析. 利用试验室模拟反应器, 比较不同水质下管材腐蚀速率及管垢铁释放速率. 结果表明, 水源切换后新水源水化学组分的较大变化, 特别是硫酸盐浓度的大幅度增加是引发黄水问题的主要原因. 拉森指数从原来的 0.4 左右增加到 1.7~1.9, 水源切换后数天内部分管网用户出水出现黄水问题. 发生黄水问题地区的管垢致密壳层较为脆弱, 在高浓度硫酸盐水质条件下, 容易发生溶解破坏. 通过反应器模拟试验, 对于旧铸铁管, 高浓度硫酸盐对管垢铁释放的影响要大于对管材基质腐蚀的影响. 拉森指数与铁释放速率具有相关关系, 随着拉森指数的增加, 铁释放速率升高; 对于旧铸铁管, 其相关关系为非线性. 由于出现黄水问题的管段管垢稳定保护层被破坏, 即使随后管网水拉森指数降低到 0.6 左右, 黄水问题仍持续较长时间.

**关键词:** 水源切换; 黄水问题; 给水管网; 铁释放; 硫酸盐; 拉森指数

中图分类号: X131.2; TU993.6 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3555-07

## Case Study of Red Water Phenomenon in Drinking Water Distribution Systems Caused by Water Source Switch

WANG Yang<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-jian<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, PAN An-jun<sup>2</sup>, XU Yang<sup>3</sup>, LIAO Ping-an<sup>2</sup>, ZHANG Su-xia<sup>3</sup>, GU Jun-nong<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Water Authority, Beijing 100038, China; 3. Beijing Water Works Group, Beijing 100031, China)

**Abstract:** Red water phenomenon occurred in some communities of a city in China after water source switch in recent days. The origin of this red water problem and mechanism of iron release were investigated in the study. Water quality of local and new water sources was tested and tap water quality in suffered area had been monitored for 3 months since red water occurred. Interior corrosion scales on the pipe which was obtained from the suffered area were analyzed by XRD, SEM, and EDS. Corrosion rates of cast iron under the conditions of two source water were obtained by Annular Reactor. The influence of different source water on iron release was studied by pipe section reactor to simulate the distribution systems. The results indicated that large increase of sulfate concentration by water source shift was regarded as the cause of red water problem. The Larson ratio increased from about 0.4 to 1.7-1.9 and the red water problem happened in the taps of some urban communities just several days after the new water source was applied. The mechanism of iron release was concluded that the stable shell of scales in the pipes had been corrupted by this kind of high-sulfate-concentration source water and it was hard to recover soon spontaneously. The effect of sulfate on iron release of the old cast iron was more significant than its effect on enhancing iron corrosion. The rate of iron release increased with increasing Larson ratio, and the correlation of them was nonlinear on the old cast-iron. The problem remained quite a long time even if the water source re-shifted into the blended one with only small ratio of the new source and the Larson ratio reduced to about 0.6.

**Key words:** water source switch; red water; distribution system; iron release; sulfate; Larson ratio

随着社会和经济的发展, 人们对于水资源特别是饮用水资源的需求日益增加. 原水经水厂处理后达标进入输配水系统, 对于大型管网, 水在管网中停留时间较长, 并与管道内壁发生一系列化学、生物反应. 如果输水管道稳定性较差, 则管网水会因二次污染而水质恶化, 造成用户龙头出水细菌、浊度、总铁等超标, 甚至出现“黄水”(red water)现象, 严重影响人们正常生活.

北方地区缺水城市采用多水源供水, 季节性的水源切换和长距离调水工程, 使得城市供水系统面临因原水水质变化产生的供水管网化学稳定问题. 调来的水源水质与当地水源水质可能具有较大差

异, 集中表现在腐蚀性离子(硫酸盐、氯离子等)、pH、碱度、硬度等指标. 特别是在水源周期性切换后, 短时期内水中离子组分发生较大变化, 极有可能引起管网内管垢表面原有的稳定保护层发生破坏, 加速管道腐蚀, 促进铁等金属元素释放, 引发“黄水”等问题. 本试验主要针对水源切换引起的 A 市部分地区用户出水发生黄水现象展开研究, 分析水源切

收稿日期: 2009-01-06; 修订日期: 2009-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578081); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z301)

作者简介: 王洋(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为给水管网水质稳定性, E-mail: wangyang00@mails.tsinghua.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: zhangxj@tsinghua.edu.cn

换对管网水质稳定性的影响, 确定此次黄水问题产生的原因.

## 1 材料与方法

### 1.1 水质监测

对新水源和原有水源水质指标进行检测, 水质指标包括 pH、硫酸盐、氯离子、电导率、碱度、总硬度、钙离子等.

对发生黄水问题的用户龙头隔夜初始水水质进行近 3 个月的连续跟踪监测, 水质指标包括 pH、温度、余氯、溶解氧 (DO)、电导率、浊度、色度、总铁、溶解性铁、硫酸盐、氯离子、碱度、总硬度、钙离子等, 具体指标和监测方法<sup>[1,2]</sup>见表 1.

表 1 水质指标监测方法

Table 1 Water parameters and methods in the measuring

指标	方法
pH	Thermo Orion model 410 pH 计
温度/℃	温度计
余氯/mg·L <sup>-1</sup>	HACH Pocket Colorimeter II Chlorine 便携式余氯测定仪
DO/mg·L <sup>-1</sup>	雷磁 JPB-608 型 便携式溶解氧分析仪
电导率/μS·cm <sup>-1</sup>	雷磁 DDS-307 电导率仪
浊度/NTU	HACH 2100P Turbidimeter 便携式浊度仪
色度	铂-钴标准比色法
总铁/mg·L <sup>-1</sup>	二氮杂菲分光光度法
溶解性铁/mg·L <sup>-1</sup>	水样经 0.45 μm 膜过滤后 用二氮杂菲分光光度法测定
硫酸盐/mg·L <sup>-1</sup>	硫酸钡比浊法
氯离子/mg·L <sup>-1</sup>	硝酸银容量法
碱度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>	酸碱滴定法
总硬度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>	乙二胺四乙酸二钠滴定法
钙离子(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>	乙二胺四乙酸二钠滴定法

### 1.2 管垢分析

从发生黄水问题地区的 DN 100 铸铁管段内取得管垢样品, 放入充满氮气的瓶中干燥后, 分别进行 XRD (X Ray Diffraction, BRU KER2P4 型 X 射线单晶衍射仪)、SEM (Scanning Electron Microscope, JSM-6460LV 型扫描电镜) 和 EDS (Energy Disperse Spectroscopy, JSM-6460LV 型, 分析元素 Be~ U) 分析, 测定管垢表现形态、元素组成、晶体结构等<sup>[3]</sup>.

### 1.3 腐蚀试验

利用 Annular Reactor 反应器比较研究 2 种水源水质对铸铁挂片腐蚀速率的影响. 试验用水分别取 2 种水源水, 经过混凝、沉淀、过滤处理后使用. 挂片材料为铸铁 (HT200), 密度 7.2 g/cm<sup>3</sup>, 试验运行时间为 117 h, 采用失重法<sup>[4]</sup>测定挂片的腐蚀速率.

## 1.4 管段试验

取得发生黄水问题地区的管段进行管段模拟试验, 比较不同水源水质条件对铁释放速率的影响. 管段为 DN100 铸铁管, 使用时间为 15a. 每节管段长 10 cm, 外壁及切口处用环氧树脂包埋避免与水接触<sup>[5]</sup>, 试验装置如图 1 所示. 试验运行周期为 8 h, 分别取反应器运行前后水样测定. 其余时间管段仍浸泡在相应水质条件的水中, 每天换水 1 次.

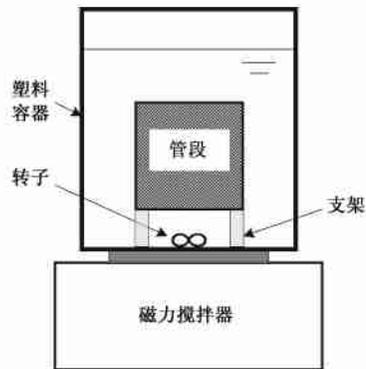


图 1 管段试验反应器示意

Fig. 1 Schematic of pipe section reactor

## 2 结果与分析

### 2.1 原水水质

原水部分水质指标检测结果见表 2, 出现黄水问题区域以往季节性切换使用地表水源 A 和地下水源 B. 新水源硫酸盐、氯离子、电导率、总硬度、钙离子高于原水源, 碱度低于原水源, 其中硫酸盐浓度是原水源的 5~6 倍.

表 2 水源水水质部分指标比较

Table 2 Water quality of water sources

指标	原水源 A	原水源 B	新水源
pH	7.8	7.8	7.9
硫酸盐/mg·L <sup>-1</sup>	47	26	180~220
氯离子/mg·L <sup>-1</sup>	27	22	50
电导率/μS·cm <sup>-1</sup>	350	400	750
碱度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>	150	190	120
总硬度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>	170	200	280
钙离子(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>	120	140	190

水源切换后新水源的使用比例情况见图 2. 水源由原水源 A 切换为新水源, 切换后第 5 d 新水源使用比例增加到 50%, 个别用户出现黄水问题; 第 10~14 d 使用 100% 新水源, 黄水问题加剧, 随后降低新水源的使用比例, 第 19 d 开始维持在 20% 新水源和 80% 原水源 A 混合使用; 第 39 d 开始, 原 80% 的原水源 A 更换为原水源 B; 第 57~67 d 之间, 因施

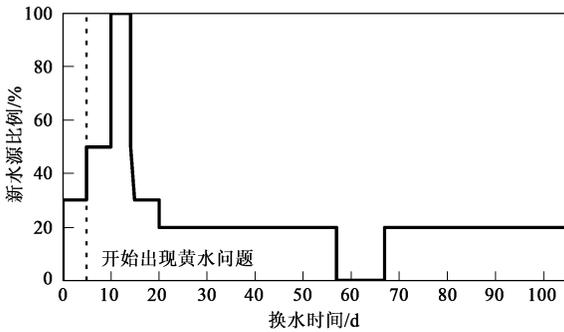


图2 新水源使用比例随时间变化

Fig. 2 Ratio of new water source

工原因停止使用新水源 10 d.

## 2.2 用户出水水质

对出现黄水问题的用户家中龙头隔夜初始水进行连续跟踪监测. 监测从换水后第 15 d 开始, 此时新水源比例已经降低到 20% 左右. 隔夜初始水中总铁、浊度、色度变化见图 3(其中虚线标出的为相应水质指标标准值). 监测结果表明, 在水源切换后, 用户水龙头隔夜初始水水质明显恶化, 总铁、浊度、色度严重超标; 水源切换 40 d 后, 用户隔夜初始水水质逐渐好转, 但水质波动较大超标现象仍较严重; 水源切换 55 d 后, 用户隔夜初始水水质进一步好转,

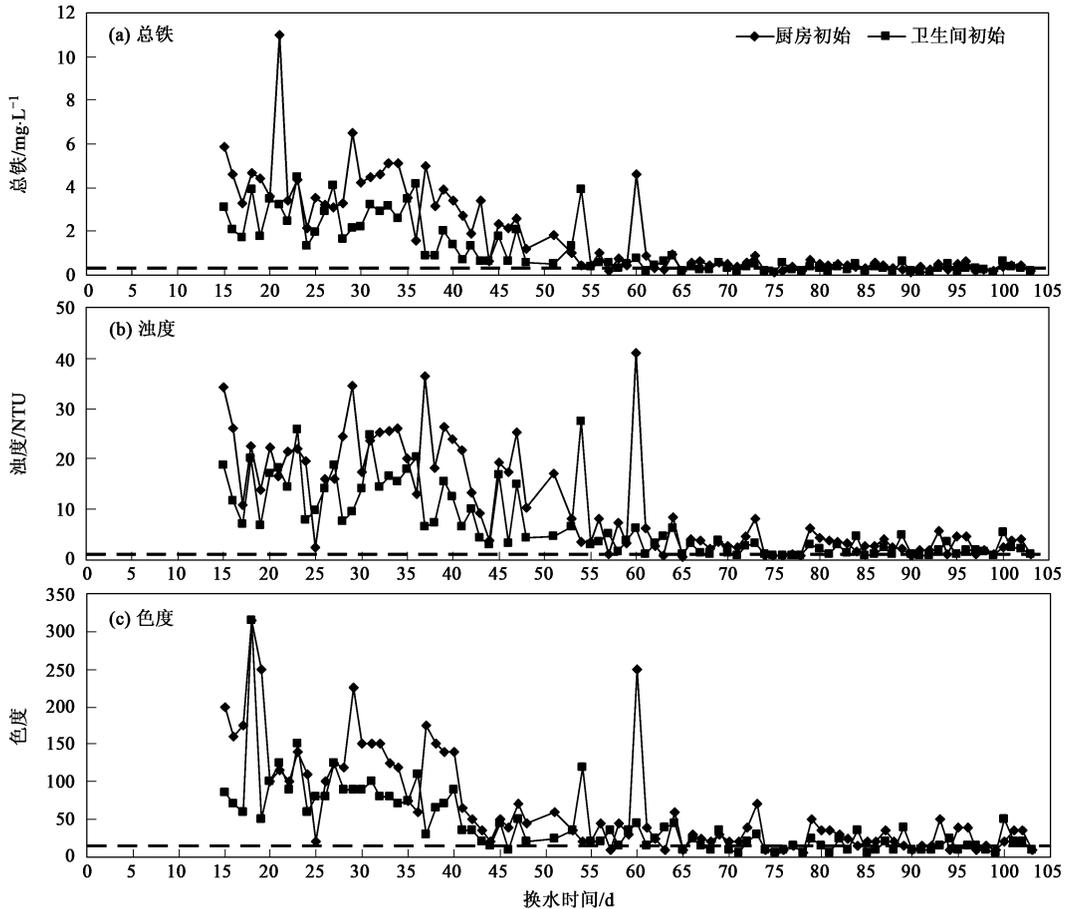


图3 用户隔夜初始水水质变化

Fig. 3 Water quality of tap water

并逐渐稳定.

## 2.3 管垢分析结果

分别对出现黄水问题管段的管垢外观特征、微观形态、元素组成、晶体结构等进行了分析测试. 该管垢呈片状, 其外观形态如图 4 所示. 管垢与管壁接触的一面(内层)和与水相接触的一面(外层)相比, 更加疏松多孔.

为了进一步了解管垢特征, 对其微观形态进行分析, 利用扫描电镜分别观察管垢内外层的形态, 如图 5 所示. 内层呈疏松多孔; 外层相对致密, 并且表面覆盖的晶体物质为 goethite<sup>[6]</sup>.

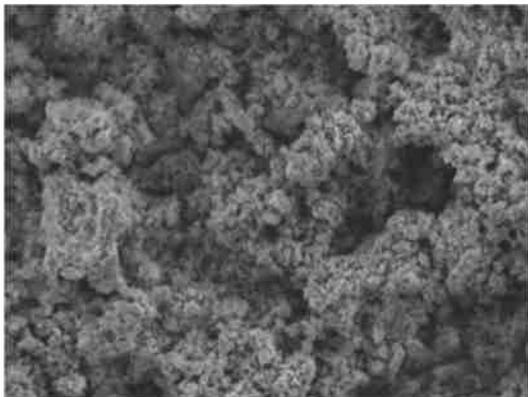
利用与 SEM 配套的能谱仪 EDS 对管垢内外层化学元素进行分析, 管垢内层除铁(54.14%)、氧(30.35%)元素外, 还包括钙(2.74%)、硅(5.19%)、



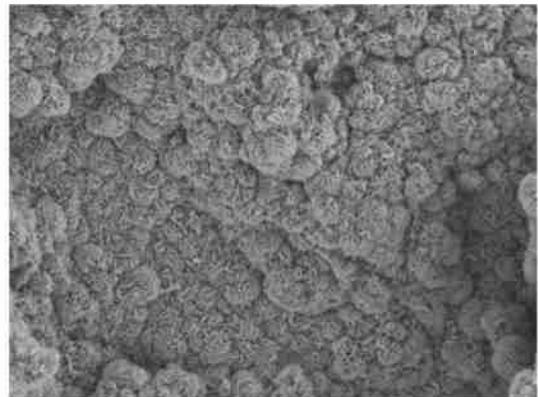
图4 DN100 铸铁管段管垢外观特征

Fig. 4 Appearance characteristics of corrosion scale in corroded cast iron pipe (DN 100)

碳(7.58%)等元素,管垢外层主要是铁(76.22%)元素和氧(23.78%)元素。



(a) 管垢内层SEM图



(b) 管垢外层SEM图

图5 扫描电镜下管垢内外层特征

Fig. 5 Micrograph of corrosion scale of cast iron pipe using SEM

表3 管段试验配水水质指标

Table 3 Water quality in the pipe section reactor

水源	100% 原水源 A	20% 新水源+ 80% 原水源 A	40% 新水源+ 60% 原水源 A	100% 新水源
浊度/NTU	0.38	0.21	0.42	0.28
总铁/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.05	0.08	0.08	0.10
溶解性铁/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.04	0.08	0.07	0.10
硫酸盐/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	48	85	107	210
氯化物/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	21	25	38	63
总硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	172	192	221	298
钙离子(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	113.6	121.6	138	188.0
碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	140	136	129	111
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	408	477	555	773

对管垢内外层进行 XRD 试验,测定管垢内外层的晶体结构组成.管垢内层的晶体组成主要是 $\gamma\text{-FeOOH}$ (Lepidocrocite).管垢外层晶体组成主要是 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ (magnetite)和 $\alpha\text{-FeOOH}$ (goethite).

#### 2.4 腐蚀试验结果

利用 AR 反应器,比较研究铸铁挂片在 2 种水源水质条件下的腐蚀速率.运行 117 h 后,原水源 A 条件下挂片平均腐蚀速率为 0.49 mm/a,新水源条件下挂片平均腐蚀速率为 0.60 mm/a.

#### 2.5 管段试验结果

利用管段反应器,研究不同水质配比条件对铁释放速率的影响.配水水质指标如表 3 所示.

稳定运行后,不同水质条件下管段铁释放速率如图 6 所示.对于发生黄水问题的管段,新水源使其铁释放速率发生明显升高,该水质条件下的铁释放速率约是原水源 A 条件下铁释放速率的 12 倍.换水后期采用的 20% 新水源和 80% 原水源 A 混合配水

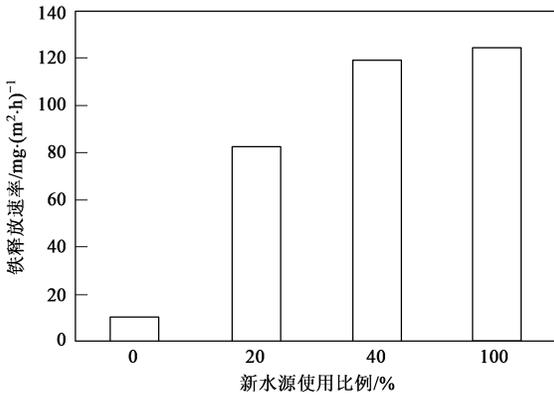


图 6 不同水质条件下管段铁释放速率比较

Fig. 6 Rates of iron release under different new water source ratios

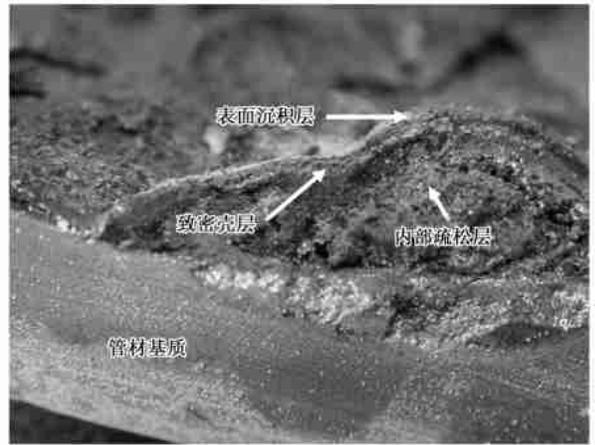


图 7 管垢内部分层结构示意图(DN100 铸铁管)

Fig. 7 Schematic of scale structure showing characteristic features of corrosion scales found in cast-iron (DN 100)

水质, 其铁释放速率仍是单独使用原水源 A 条件下铁释放速率的 8 倍, 对管网水质产生严重负面影响。

### 3 讨论

#### 3.1 管垢组成与铁释放现象

管段腐蚀后, 腐蚀产物在管道内壁形成管垢, 管垢具有分层的结构特征<sup>[7]</sup>, 对出现黄水问题管段的管垢特性分析结果表明, 管垢内外层组成成分和特性存在较大差异(图 7)。

(1) 管垢表面是一层较薄的由三价铁氧化物例如  $\alpha\text{-FeOOH}$  等组成的表面沉积层。

(2) 表面沉积层下面是一层坚硬、致密的壳层, 主要成分是  $\alpha\text{-FeOOH}$  (goethite, 针铁矿) 和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetite, 磁铁矿)。

(3) 壳层与管材基质之间的管垢内层是以二价铁为主的疏松多孔的半固体物质, 但是在管段样品制备和检测过程中, 二价铁很容易被空气中的氧化成三价铁, 因此利用 XRD 等技术对管垢内部物质进行检测, 一般情况下较难直接测定出二价铁的化合物<sup>[8]</sup>。测定管垢内层主要成分为:  $\gamma\text{-FeOOH}$  (lepidocrocite, 纤铁矿)、 $\alpha\text{-FeOOH}$  (goethite)、 $\text{FeCO}_3$  (siderite, 菱铁矿) 等。

出现“黄水”问题的地区主要是在水源切换前长期使用硫酸盐、氯离子浓度较低的地下水的地区, 并位于管网末梢, 管网水中余氯、溶解氧浓度较低, 使得该地区管垢致密壳层较薄并且脆弱, 当水质条件发生变化时易被破坏。

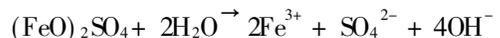
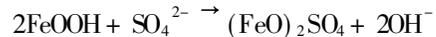
铁释放现象是腐蚀产物(管垢)或金属以溶解的或者颗粒的形式向水中输送铁, 它是腐蚀、水力冲刷以及管垢的溶解三者累积作用效果<sup>[9]</sup>。

当管网水中溶解氧或余氯浓度较高时, 能够促进管垢致密壳层的形成, 降低管垢外层的通透性, 形成钝化保护层, 阻止管材的过快腐蚀和二价铁的过量溶出<sup>[10]</sup>。因此正常条件下, 管垢相对稳定, 铁腐蚀和铁释放速度很小, 水中铁浓度不会超标。如果管垢表面钝化层被破坏, 管垢内层松散结构的二价铁和三价铁就会大量进入水流主体。其中的二价铁在主体水流中被余氯和溶解氢氧化成三价铁, 形成不溶于水的氢氧化铁胶体颗粒, 再凝聚长大为铁锈悬浮颗粒, 增加了水的浊度与色度, 即产生黄水问题<sup>[11]</sup>。

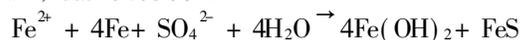
使管垢壳层破坏的影响因素主要包括: 低溶解氧、低余氯条件下, 发生还原反应使三价铁化合物被还原<sup>[12]</sup>; 高氯离子、高硫酸根离子条件下, 促进溶解和电子、离子迁移速率<sup>[13]</sup>; 低碱度、低 pH 值条件下, 促进溶解并阻碍致密壳层的形成<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 硫酸盐对管网铁稳定性的影响

硫酸根离子和氯离子能够与管垢表面的  $\text{FeOOH}$  发生反应, 生成  $(\text{FeO})_2\text{SO}_4$  和  $\text{FeOCl}$  增加溶解性<sup>[15]</sup>, 同时较高的电导率加快反应速率, 从而增加铁释放速率。有研究表明, 硫酸盐和氯离子促进管垢溶解, 破坏管网铁稳定性<sup>[16]</sup>。

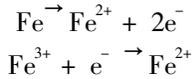


水中较高浓度的硫酸盐、低余氯和低溶解氧条件还可以促进硫酸盐还原菌的过量生长, 通过微生物反应, 增加管材腐蚀<sup>[17]</sup>。



硫酸盐浓度的增加使得管网水电导率增加, 离子和电子的迁移速率都明显提高, 加快了电化学腐蚀速

率在管垢内部生成大量的二价铁,管垢内部压力增加导致壳层破裂,大量的铁释放到水中.另一方面,根据 Kuch<sup>[18]</sup> 的理论,低余氯和低溶解氧条件下,管垢外层的三价铁作为电子受体发生还原反应,电导率的增加加速了表面三价铁变成二价铁释放到水中.



水源切换后,管网水中硫酸盐浓度大幅度增加,破坏了原有管垢的平衡,管网用户水质很快发生恶化,出现黄水现象.随着新水源比例的下降硫酸盐浓度降低,但对于管垢钝化层已经破坏的管段,建立新的平衡需要较长时间,因此黄水问题仍会持续数周.

挂片试验结果表明,与原水源相比,新水源对于新的金属腐蚀速率增加了 22%.管段试验结果表明,新水源条件下铁释放速率是原有水源条件下的 12 倍.因此对于旧管,高浓度硫酸盐对铁释放的影响要大于对管材基质腐蚀的影响.水源切换后,管网水中高浓度的硫酸盐促进了管垢表面三价铁氧化物溶解,使得管垢致密壳层破坏,造成管垢内部大量的二价铁化合物进入水中,从而引起“黄水”问题.

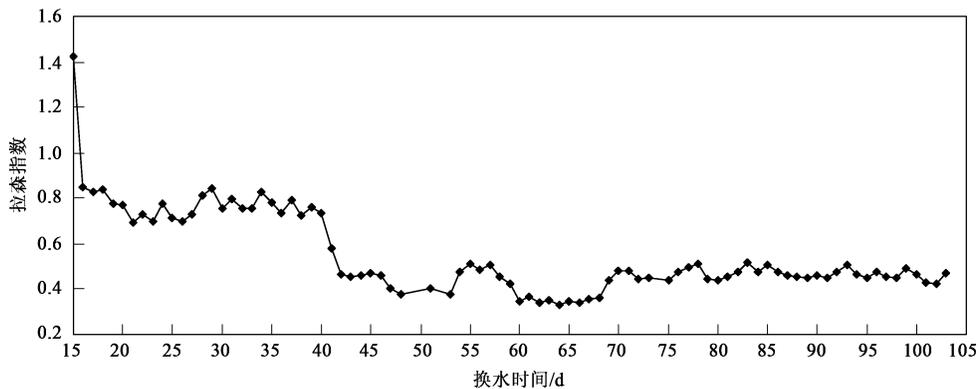


图 8 管网水拉森指数变化

Fig. 8 Larson ratio of the tap water

对于相同管垢,随着拉森指数的增加,管垢铁释放速率升高,如图 9 所示.从图 9 中不同管段试验结果还可看出,即使在相同拉森指数水质条件下,未发生黄水问题的管段铁释放速率仅是发生黄水问题的管段的 1/3.这是由于未发生黄水问题地区的管段管垢致密壳层更厚、更加坚硬,对于硫酸盐等腐蚀离子的耐受能力更强,当水源切换后拉森指数增加到 1.9 时,管垢铁释放速率增加,但是管垢没有立即发生明显破坏,没有出现严重的黄水问题.拉森指数只是从水质角度判断硫酸根和氯离子对铁释放的影响,铁释放速率同时还受管垢自身特性的影响,但目

### 3.3 拉森指数与铁释放关系

对于硫酸根、氯离子等中性离子的侵蚀主要利用拉森指数(Larson ratio)来判别<sup>[9]</sup>.拉森指数是在对新管进行腐蚀试验的基础上提出的,使用离子活度进行计算.当拉森指数 > 1 时,水具有严重腐蚀性.拉森指数(LR)的计算公式如下:

$$\text{LR} = \frac{2\{\text{SO}_4^{2-}\} + \{\text{Cl}^-\}}{\{\text{HCO}_3^-\}}$$

水源切换后,管网水拉森指数由原来的 0.4 左右增加到 1.7~1.9 之间,说明新水源具有严重腐蚀性,因此当水源突然切换为新水源后,管网出现了黄水问题.图 8 是管网水拉森指数变化情况,结合图 3 管网水质变化情况分析比较可以看出,随着新水源比例的调整,管网水拉森指数降低到 0.7~0.8 之间,用户水质略有好转,但仍超标严重并存在较大波动.换水 39 d 后使用原有水源 B,进一步降低硫酸盐浓度,提高管网水碱度,拉森指数进一步降低到 0.4~0.5 之间,管网水质开始逐渐好转.因此对于旧管,拉森指数也可以作为硫酸盐、氯离子影响下铁释放判别指标,随着拉森指数的增加,管垢铁释放速率升高.

前对此影响尚无定量关系进行描述.

### 3.4 水源切换出现黄水问题的成因分析

由实际管网监测数据、试验室模拟试验以及上述分析,可以确定这次水源切换造成管网部分地区用户龙头出现黄水问题的原因是:水源切换后水源水化学组分发生了很大的改变,特别是硫酸盐浓度大幅度增加,打破了供水管网中管道内的管垢与原有水质之间的平衡,高浓度硫酸盐会使管垢铁锈发生溶解,破坏表面钝化层,造成管垢过量铁释放,从而在管垢表面钝化层较为薄弱的地区产生了黄水问题,自来水管和入户管中管壁上原有的铁锈部分

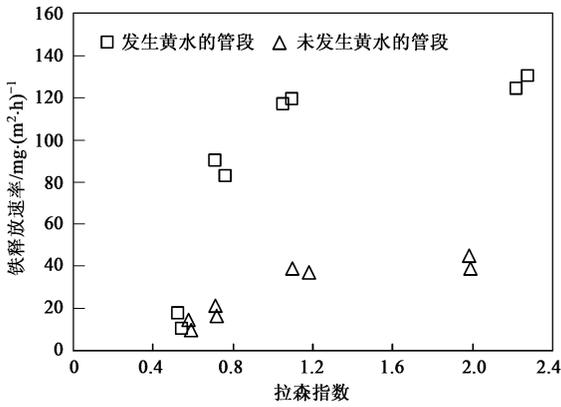


图9 拉森指数与铁释放速率的关系

Fig. 9 Correlation between Larson ratio and rate of iron release

溶出,有的用户家中出现了自来水发黄发浑的现象。由于隔夜滞留时间较长,并且在停滞水的低溶解氧和低余氯条件下铁释放现象更为严重,因此早晨初期龙头水水质超标现象严重。

为了解决黄水问题,水厂通过降低新水源使用比例降低硫酸盐浓度,并且使用碱度较高的地下水进一步降低拉森指数。但是由于管垢钝化层被破坏后,即使水质恢复到原有情况,建立新的平衡仍需要较长时间,因此用户水质超标现象仍持续了2~3个月。

#### 4 结论

(1) 本次水源切换后管网部分用户出现黄水问题的原因是由于水源水水质化学组分发生了很大的改变,特别是硫酸盐浓度大幅度增加,破坏了管垢原有钝化层,使得管垢发生过量铁释放。拉森指数从原来的0.4左右增加到1.7~1.9,水源切换后数天内部分管网用户出水出现黄水问题。

(2) 发生黄水问题地区的管垢致密壳层较为脆弱,在高浓度硫酸盐水质条件下,容易造成钝化层脱稳和溶解。对于旧管,高浓度硫酸盐对管垢铁释放的影响要大于对管材基质腐蚀的影响。

(3) 拉森指数与铁释放速率具有相关关系,当拉森指数增加时,铁释放速率也相应升高。对于旧管,它们之间的关系呈非线性。

(4) 当管垢原平衡被破坏后,即使水质恢复到换水前水质情况下,黄水问题仍会持续一段时间,建立新的平衡需要较长时间(数周甚至数月)。

(5) 水源切换后由于原水化学组分差别较大,容易造成管网化学稳定性问题,严重时出现黄水现象。

因此对潜在问题,必须预作准备,开展风险分析与对策研究。

#### 参考文献:

- [1] GB/T 5750-2006, 生活饮用水标准检验方法[S].
- [2] 国家环保总局. 水与废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 221-237.
- [3] 牛璋彬, 王洋, 张晓健, 等. 给水管网中管内壁腐蚀管垢特征分析[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1150-1154.
- [4] GB/T 18175-2000, 水处理剂缓蚀性能的测定——旋转挂片法[S].
- [5] 牛璋彬. 给水管网铁稳定的化学控制特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [6] Antunes R A, Costa I, Faria D L A. Characterization of corrosion products formed on steels in the first months of atmospheric exposure [J]. *Mat ria*, 2003, 8(1): 27-34.
- [7] Sarin P, Snoyink V L, Lytle D A, et al. Iron corrosion scales: model for scale growth, iron release, and colored water formation[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, 4: 364-373.
- [8] Snoyink V L, Ferguson J F, Ryder R, et al. Internal corrosion of water distribution systems[R]. USA: AWWA Research Foundation, 1985. 79-87.
- [9] Sarin P. Iron release from corrosion scales in old iron/steel drinking water distribution pipes[D]. USA: University of Illinois, 2001. 122-134.
- [10] 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.
- [11] Lytle D A, Magnuson M L, Snoyink V L. Effect of oxidants on the properties of Fe(III) particles and suspensions formed from the oxidation of Fe(II) [J]. *Journal of AWWA*, 2004, 96(8): 112-126.
- [12] Sarin P, Snoyink V L, Bebee J, et al. Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen [J]. *Water Research*, 2004, 38: 1259-1269.
- [13] Lytle D A, Sarin P, Snoyink V L. The effect of chloride and orthophosphate on the release of iron from a cast iron pipe section[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 2005, 54(5): 267-281.
- [14] Sander A, Berghult B, Broo A E, et al. Iron corrosion in drinking water distribution systems: the effect of pH, calcium and hydrogen carbonate[J]. *Corrosion Science*, 1996, 38(3): 443-455.
- [15] Stumm W, Sulzberger B. The cycling of iron in natural environments: consideration based on laboratory studies of heterogeneous redox processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 3233-3257.
- [16] Miyata Y, Asakura S. Oxygen reduction reaction at rust free iron surface in neutral unbuffered chloride solutions [J]. *Corrosion Science*, 2002, 44: 589-602.
- [17] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [18] Kuch A. Investigations of the reduction and re-oxidation kinetics of iron(III) oxide scales formed in waters [J]. *Corrosion Science*, 1988, 30(3): 221-231.
- [19] Larson T E. Report on loss in carrying capacity of water mains[J]. *Journal of American Water Works Association*, 1955, 45: 1061-1071.