

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.009

# 水源水质对地下水管网铁释放的影响和控制技术研究

赵 蓓<sup>1</sup>, 李林彬<sup>2,3</sup>, 赵云鹏<sup>1</sup>, 李 礼<sup>1</sup>

(1. 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100031; 2. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010)

**摘 要:** 针对水源水质变化时,地下水供水区域管网可能出现“黄水”的问题,选取北方某市长期输送地下水的管道,通入两种水质差异较大的实际地表水厂出水进行模拟中试。研究发现,输送地下水的管道的管垢层薄,晶体铁氧化物以针铁矿为主,磁铁矿与针铁矿的质量比为0.09,管垢稳定性差。实验结果还表明,通入拉森指数(LR)为1.72的地表水后,管道出水浊度和总铁增加量高于通入拉森指数为0.37的地表水,氯化物和硫酸盐浓度高、拉森指数大的地表水对该类地下水管道的管垢影响较大。通过预先提高通水游离余氯浓度对管道进行氧化稳定处理,可有效减少铁释放,降低发生“黄水”的风险。

**关键词:** 地表水; 地下水; 管垢; 铁释放; 拉森指数

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0052-07

## Influence of Source Water Quality on Iron Release in Groundwater Distribution Networks and Its Control Technology

ZHAO Bei<sup>1</sup>, LI Lin-bin<sup>2,3</sup>, ZHAO Yun-peng<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>

(1. Beijing Waterworks Group Co. Ltd., Beijing 100031, China; 2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment < Ministry of Education >, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. CCCC Highway Consultants Co. Ltd., Beijing 100010, China)

**Abstract:** To prevent the “red water” problem caused by source water quality variation in groundwater distribution networks, a pilot-scale test was carried out by conveying effluent from two actual surface water plants with different water quality in a long-term groundwater pipeline in a northern city. Scale layer of the pipe conveying groundwater was thin, which composed of goethite as the main crystal iron oxide with magnetite/goethite mass ratio of 0.09 and low stability. After conveying surface water with Larson ratio (LR) of 1.72, the increase of effluent turbidity and the total iron in the pipeline were higher than those of surface water with LR of 0.37. The surface water with high chloride and sulfate concentration and larger LR had great influence on the scale of the groundwater pipeline. By increasing the influent free residual chlorine concentration for oxidation and stabilization treatment of the pipeline in advance could effectively reduce the release of iron and the risk of “red water”.

**Key words:** surface water; groundwater; pipe scale; iron release; Larson ratio

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108002); 北京市优秀人才基金资助项目(2016754154700G153)

2014 年南水北调中线一期工程通水后,北京市政供水能力提高,不仅实现利用“南水”替代部分地下水,对多个大型地下水水源地实施减采<sup>[1]</sup>,而且计划到 2020 年底,将城六区自备井全部置换为市政供水<sup>[2]</sup>。虽然,外调地表水可缓解北京市水资源短缺局面,但外调地表水与本地地下水相比,碱度、硬度、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  等水质指标差别较大<sup>[3-4]</sup>。前期研究表明,上述水质指标对铸铁管等铁质管道的腐蚀及其内壁腐蚀层(即管垢)中铁释放有直接影响,其中, $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量升高会促进管道腐蚀和铁释放,碱度和硬度升高则抑制腐蚀和铁释放,并提出了基于  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的拉森指数(LR)<sup>[5-6]</sup>。牛铁柱<sup>[7]</sup>、王洋<sup>[8]</sup>等人进一步通过管段静态实验得出 LR 是影响铸铁管铁释放的重要因素,LR 与铁释放速率呈正相关。另一方面,与输送地表水的管道相比,长期输送地下水的管道内壁管垢层薄,只有少量瘤状垢分布,基本无覆盖致密硬壳层的瘤状垢,改输送地表水后,管垢内铁易释放而影响供水水质,发生“黄水”的风险高<sup>[3,9-10]</sup>。

研究水源水质变化对长期输送地下水管道的铁释放的影响,对保障采用外调地表水源城市的供水安全有重要意义。因此,笔者选取北方某市长期输送地下水区域管道,采用两种水质参数差异较大的实际地表水进行实验,研究不同水质的地表水源对长期输送地下水管道的铁释放的影响,并提出控制措施。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验管道和实验用水

在北方某市以地下水为水源的 A 水厂供水区域挖取管龄在 20 年以上的 DN100 铸铁管,采集分析管壁内管垢,并运送至中试基地等分为多段,分别通入两种不同水质特点的实际地表水进行模拟实验。在管道挖取、安装过程应尽量防止管道内部管垢脱落,以免影响实验结果。实验用水为以地表水为水源的 B 和 C 两个水厂(采用常规工艺)的出厂水(以下简称地表水 B、C)。

### 1.2 实验装置与运行

实验装置如图 1 所示。实验管道两端装有流量计和阀门,运行阶段通过流量计控制流速;实验阶段关闭管道两端阀门停滞 24 h,从位于出水端的取样口处取停滞时间分别为 0、2、4、6 和 24 h 的出水,检测出水水质。

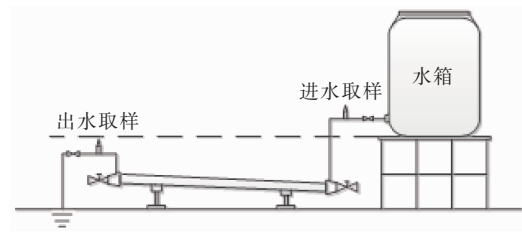


图 1 模拟实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of simulated experimental setup

### 1.3 水质检测与管垢分析

pH 值:便携式 pH 计;浊度:便携式浊度计;总碱度:酸碱指示剂滴定法;总硬度:EDTA 滴定法;总铁:邻菲罗啉分光光度法;游离氯:N,N-二乙基-1,4-苯二胺光度法;硫酸盐、氯化物、硝酸盐:离子色谱法。

截取实验用管时立即采集管垢样品,置于厌氧箱内充分研磨,真空冷冻干燥后采用 X 射线衍射仪对管垢中晶态物质组成进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水源水质比较

原地下水厂 A 出厂水(以下简称地下水 A)和实验用地表水 B、C 的水质检测结果如表 1 所示。

表 1 水源水质比较

Tab. 1 Comparison of water quality among different water sources

| 项 目  | 地下水 A | 地表水 B | 地表水 C |
|--|-------|-------|-------|
| pH 值   | 7.66  | 8.13  | 8.15  |
| 浊度/NTU   | 0.17  | 0.57  | 0.35  |
| 总碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 200   | 116   | 200   |
| 总硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 226   | 152   | 307   |
| 氯化物/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )                          | 14.6  | 9.00  | 114   |
| 硫酸盐/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )                          | 22.0  | 29.5  | 180   |
| 硝酸盐(以 N 计)/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )                   | 5.17  | 1.60  | 3.32  |
| LR   | 0.21  | 0.37  | 1.72  |

地表水 B、C 的 pH 值呈弱碱性,且均高于地下水 A;地表水 B 中促进腐蚀的氯化物和硫酸盐浓度与地下水 A 相近,但抑制腐蚀的总碱度和总硬度仅为地下水 A 的 58% 和 67%。地表水 C 中氯化物和硫酸盐浓度为地下水 A 的 7~8 倍,抑制腐蚀的总碱度与地下水 A 相当,总硬度为地下水 A 的 1.4 倍。因此,从单一水质指标变化对管道内原有管垢的影响,不能直接判断切换新水源后水质变化情况,

需对 A 水厂输配水管道实际通入上述两种地表水后的铁释放情况进行对比研究。

## 2.2 管垢形貌与组成分析

该地下水厂供水区域管道内部腐蚀层形貌特征如图 2 所示。与输送地表水的管道相比<sup>[3]</sup>,管垢层表面平滑且较薄,厚度不足 1 mm,只有少量零星瘤状垢分布,无大量不连续、有分层的瘤状垢,管道腐蚀程度低,属于典型地下水供水管道管垢。

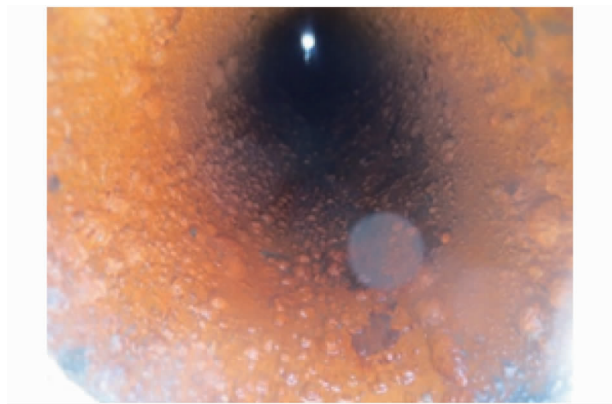


图2 实验管道管垢形貌

Fig. 2 Scale morphology of experimental pipeline

为进一步分析该管垢的稳定性,采用 XRD 对其晶态物质组成进行分析。结果表明,该管垢中主要晶体铁氧化物为针铁矿(66%),而磁铁矿、纤铁矿和菱铁矿含量均较低,三者总含量仅为 18%。Carlson 等研究发现<sup>[11]</sup>,高  $\text{HCO}_3^-$  浓度和低氧化速率会促进针铁矿的生成,反之则有利于纤铁矿的生成。因此,该管垢中晶体铁氧化物以针铁矿为主,与该管道长期输送高硬度、低溶解氧浓度的地下水有关。同时,有研究表明<sup>[12]</sup>,在高硝酸盐浓度的地下水模拟系统中铸铁管内形成薄且疏松的针铁矿腐蚀层,而低硝酸盐浓度的地表水模拟系统中形成厚且有坚硬壳层、由磁铁矿和针铁矿组成的瘤状腐蚀层。该实验管道长期输送硝酸盐浓度较高的地下水,其内壁形成管垢中针铁矿含量高、磁铁矿含量低,且管垢层较薄,与前期研究结果一致。对于管垢稳定性,有研究提出<sup>[13]</sup>可通过磁铁矿与针铁矿质量比( $M/G$  值)判定,该管垢的  $M/G$  值为 0.09,小于 1.0,管垢稳定性较差,水源水质变化时管垢结构容易被破坏,铁释放风险较高。

## 2.3 水源水质对铁释放的影响

### 2.3.1 出水水质变化规律

实验管道分别通入地表水 B、C,不同停滞时间

下水浊度、总铁含量较进水的增加量如图 3 所示。对于地表水 B、C,实验管道出水浊度和总铁增加量的 Pearson 相关系数分别为 0.889 和 0.912 ( $p < 0.01$ ),浊度和总铁之间均存在显著正相关,与文献报道的结果相一致<sup>[3]</sup>,管网铁释放是造成浊度增加的主要原因。

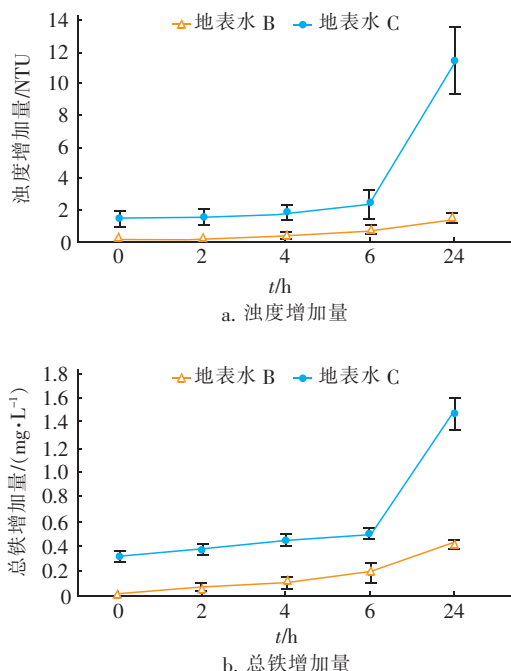


图3 不同停滞时间下实验管道出水浊度和总铁的增加量

Fig. 3 Increase of turbidity and total iron of effluent from experimental pipeline at different stagnant times

当停滞时间为 0 h 时,通入 B、C 两种地表水后实验管道出水浊度的增加量分别为 0.17、1.48 NTU,总铁的增加量分别为 0.02、0.32 mg/L。在连续输水条件下,该地下水管道通入地表水 B 没有明显铁释放现象,浊度增加量也较低;而通入地表水 C 后,不仅有明显铁释放现象,且浊度和总铁的增加量大于管网可承受的最大量(1 NTU 和 0.3 mg/L)。随着停滞时间的延长,两个实验管道出水浊度和总铁均持续增大,通入地表水 B 的实验管道在停滞时间 > 6 h 后,浊度和总铁的增加量才大于管网可承受的最大量。

管网临界铁释放速率是指对于固定直径的管道,管网水在一定停滞时间内,铁浓度从 0 mg/L 达到可承受的最大铁释放量(0.3 mg/L)过程中的管网铁释放速率<sup>[14]</sup>。该参数能直观地比较不同条件下管网中铁释放的情况。对于 DN100 实验管道,停



滞 6 h 的临界铁释放速率为  $1.25 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 通入 B、C 两种地表水后铁释放速率分别为  $0.79 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $2.12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 通入地表水 C 的铁释放速率大于临界铁释放速率。

不同停滞时间下实验管道出水的游离氯衰减率如图 4 所示。当停滞时间为 0 h 时, 通入地表水 C 的管道出水游离氯衰减率为 22.8%, 高于地表水 B 的 3.33%, 二者游离氯衰减率均随着停滞时间的延长而增加, 但前者均一直高于后者。除去游离氯自身分解的原因, 释放到水中的  $\text{Fe}(\text{II})$  的氧化过程也消耗游离氯<sup>[7]</sup>。通入地表水 C 的管道铁释放量高, 其游离氯的衰减率高于地表水 B, 尤其是停滞时间为 0 h 时, 说明管垢中释放的铁对游离氯的消耗是导致该管道出水游离氯衰减快的重要原因。

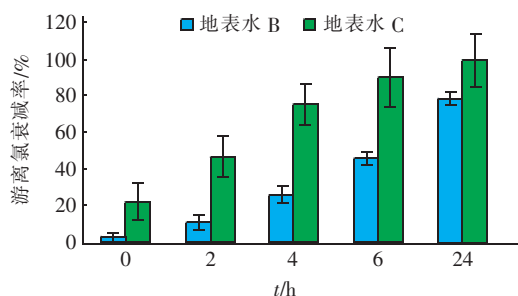


图 4 不同停滞时间下实验管道出水的游离氯衰减率

Fig.4 Decrease rate of free chlorine of effluent from experimental pipeline at different stagnant times

综合不同停滞时间下水浊度和总铁的增加量以及游离氯的衰减率, 对于地表水 B, 该地下水管道在白天连续用水(即停滞 0 h)和停滞时间 < 6 h 的情况下发生“黄水”的风险较低, 而停滞时间 > 6 h 时有发生“黄水”的风险; 对于地表水 C, 在白天连续用水的情况下即存在发生“黄水”的风险, 且管网铁释放量随停滞时间的增加而持续增加, 发生“黄水”的风险也相应增大, 同时管垢内释放出的二价铁加速游离氯的消耗, 降低了消毒效果。

### 2.3.2 铁释放的影响因素分析

水源变化后导致铁释放的主要原因是水源水质差异, 包括碱度、硬度、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等。其中, 碱度和硬度对铁腐蚀化学中的很多反应有影响<sup>[15-16]</sup>, 例如碳酸盐保护膜的形成、 $\text{FeCO}_3$  沉淀-溶解平衡和钙镁-碳酸盐平衡等。碱度和硬度增大有利于抑制管垢中铁释放。与地下水 A 的总碱度和总硬度相比, 地表水 B 的总碱度和总硬度均降低近一半, 地表水

C 的总碱度与地下水 A 相当, 总硬度则为地下水 A 的 1.4 倍, 但通入地表水 B 的实验管道出水总铁浓度的增加量远低于通入地表水 C 的实验管道, 这可能是由于该地下水管道管垢中  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{FeCO}_3$  含量较低, 仅分别为 5% 和 8%, 上述总碱度和总硬度的变化对管垢中碳酸盐保护膜和  $\text{FeCO}_3$  沉淀-溶解平衡等的影响有限。因此, 对于地下水 A 与地表水 B、C, 总碱度和总硬度的差异不是导致管垢中铁释放的主要因素。

$\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  是对铁制管材腐蚀及管垢铁释放有显著影响的腐蚀性离子<sup>[17]</sup>。二者半径小, 容易穿透、破坏金属表面的钝化层<sup>[18]</sup>, 加速铁质管道腐蚀。同时, 二者浓度升高使水体电导率增加, 加快腐蚀反应速率, 促进铁释放<sup>[19]</sup>。此外, 有研究表明<sup>[20]</sup>, 高浓度的  $\text{SO}_4^{2-}$  还可促进硫酸盐还原菌生长, 通过微生物参与腐蚀反应, 增大铁释放量。地表水 B 的氯化物和硫酸盐浓度与原地下水 A 接近, 水源变化后对管垢钝化层影响较弱; 但地表水 C 的氯化物和硫酸盐浓度为原地下水 A 的 7~8 倍, 氯化物和硫酸盐浓度显著升高是造成水源变化后管垢中铁大量释放的主要原因。

$\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  对管道腐蚀起促进作用, 碱度、硬度则抑制腐蚀, 但腐蚀反应受上述多因素综合影响, 有研究提出水对铁质金属管道的腐蚀性可用 LR 表示: 当  $\text{LR} > 0.8$  时, 氯化物和硫酸盐可能会干扰金属管道内壁天然膜形成, 尤其是当  $\text{LR} > 1.2$  后, 随着 LR 的增大, 腐蚀速率将会增大<sup>[6,21]</sup>。地表水 B 的 LR 值为 0.37, 大于 0.21 (地下水 A), 地表水 B 与原地下水 A 相比腐蚀性增大, 但由于  $0.37 < 0.8$ , 对管道内壁已形成的腐蚀层影响则较小; 地表水 C 的 LR 值为 1.72, 大于 1.2, 属于高腐蚀性水质, 对该地下水管道腐蚀性较强。实验结果表明, 在相同停滞时间内, 通入地表水 C 的管道出水总铁平均增加量均高于地表水 B, 且停滞 4 h 后已达到  $0.47 \text{ mg/L}$ , 高于后者停滞 24 h 后的  $0.43 \text{ mg/L}$ , 这和 LR 与铸铁管的铁释放具有相关性的前期研究结果一致。

综上所述, 氯化物和硫酸盐浓度的显著升高是导致通入地表水 C 的管道出水铁浓度高于通入地表水 B 的主要原因, 基于抑制腐蚀的  $\text{HCO}_3^-$ 、促进腐蚀的  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的 LR 值, 可以判断该类地下水管道水源水质变化后管垢中铁释放情况, 并预测出水水质。

## 2.4 管网铁释放控制方法

前期研究提出<sup>[22]</sup>,在高氧化还原电位(ORP)条件下,管垢表面壳层会被进一步氧化为三价铁化合物,降低孔隙度,提高密实度和稳定性,从而减少管垢内层疏松状含铁化合物的释放。因此,为降低高LR地表水C供水初期对管垢稳定性差的地下水管道的影 响,基于氯消毒剂的氧化作用,提高通水游离氯浓度1倍至1.0 mg/L。提高进水游离氯浓度初期,在连续通水条件下,与进水相比,出水游离氯降低25%,浊度升高30%;随运行时间延长,出水游离氯稳定至进水的90%,出水浊度与进水相比无明显升高。这是由于氯具有强氧化性,提高进水游离氯浓度初期,促进了铁质管道的电化学腐蚀,但随着腐蚀的进行,其产物形成保护层,抑制管道进一步腐蚀和铁释放。将氧化稳定后的该地下水管道与未进行氧化稳定的管道均通入地表水C,15 d内不同停滞时间下出水浊度、总铁浓度如图5所示。

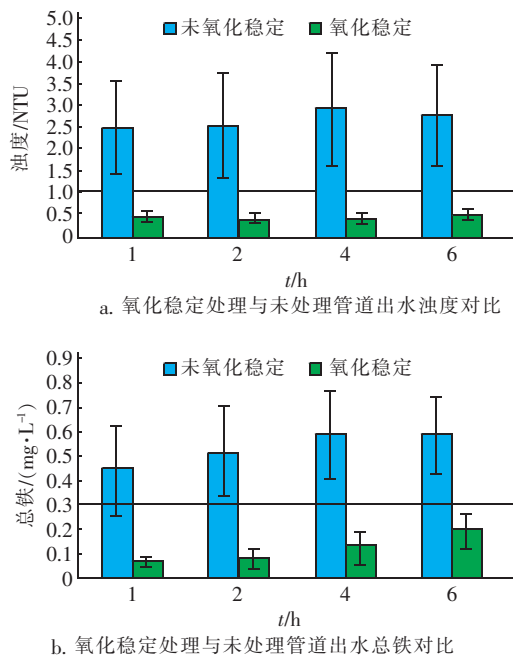


图5 氧化稳定处理与未处理管道出水浊度和总铁对比

Fig.5 Comparison of turbidity and total iron of effluent from pipeline treated and untreated by oxidizing

未氧化处理的管道停滞1 h时,出水平均浊度为2.51 NTU、平均总铁浓度为0.44 mg/L;停滞6 h后,出水平均浊度升至2.80 NTU、平均总铁浓度升至0.59 mg/L,这是由于管垢不稳定,其内的铁在通入新水源1 h内即大量释放,其后随停滞时间延长铁持续缓慢释放。对于氧化处理后的管道,停滞1 h

时出水平均浊度为0.49 NTU、平均总铁浓度为0.07 mg/L,均远低于未氧化处理管道;停滞6 h后,平均浊度仅为0.52 NTU、平均总铁浓度仅为0.19 mg/L,6 h内随停滞时间延长出水水质相对稳定,出水浊度和总铁浓度不仅低于未氧化处理管道,而且二者的增加量也均低于管网可承受的最大量(1 NTU和0.3 mg/L)。因此,通过预先提高通水游离氯浓度对管道进行氧化稳定处理,可有效减少水源水质变化导致管垢稳定性差的地下水管道的铁释放量。

## 3 结论

① 与原地下水A相比,地表水B抑制腐蚀的总碱度和总硬度降低,地表水C抑制腐蚀的总硬度、促进腐蚀的 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 均有所升高,不能从单一水质指标对原有管垢的影响,直接判断切换新水源后水质变化情况。

② 实验选取的地下水管垢层较薄,晶体铁氧化物以针铁矿(66%)为主, $M/G$ 值为0.09,小于1.0,管垢稳定性较差,水源水质变化时铁释放风险较高。

③ 通入地表水B后,该地下水管道在连续用水和停滞时间<6 h的情况下发生“黄水”的风险较低;而通入地表水C后,在连续用水的情况下即存在发生“黄水”的风险,主要原因是与地下水A相比,地表水C的氯化物和硫酸盐浓度显著升高。LR可用于判断该类地下水管源水质变化后管垢中铁释放情况。

④ 通过预先提高通水游离氯浓度对管道进行氧化稳定处理,可有效减少水源改变后管垢稳定性差的地下水管道的铁释放,降低发生“黄水”风险。

## 参考文献:

- [1] 王树芳,李捷,刘元章,等. 南水北调对北京地下水涵养的影响[J]. 中国水利,2019(7):26-30.  
Wang Shufang, Li Jie, Liu Yuanzhang, et al. Impact of South-to-North Water Diversion on groundwater recovery in Beijing[J]. China Water Resources, 2019(7):26-30(in Chinese).
- [2] 张海祥,李嘉铭. 北京市自备井置换存在的问题及应对建议[J]. 给水排水,2017,43(11):24-27.  
Zhang Haixiang, Li Jiaming. Problems and suggestions on the replacement of self-supply wells in Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(11):24-27(in Chinese).

- [3] 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 Baoyou, Lu Zhili, Xu Shuo, *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).
- [4] 张艳亭. 自备井置换中存在的问题分析及措施[J]. 给水排水,2016,42(8):33-35.
- Zhang Yanting. Problem analysis and measures of the replacement of self-supply wells [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(8):33-35 (in Chinese).
- [5] Hu J, Dong H, Xu Q, *et al.* Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy[J]. Water Res, 2018,129:428-435.
- [6] Larson T E, Skold R V. Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron [J]. Corrosion,1958,14(6):285-288.
- [7] 牛铁柱,徐强,陈求稳,等. Larson 指数、溶解氧和余氯浓度变化对管网铁释放的影响[J]. 给水排水,2015,41(3):148-153.
- Niu Tiezhu, Xu Qiang, Chen Qiwen, *et al.* Influence of Larson index, dissolved oxygen and residual chlorine on ferric iron releasing in pipe network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(3):148-153 (in Chinese).
- [8] 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 Yang, Zhang Xiaojian, Chen Chao, *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).
- [9] 于琳可,石宝友,宛云杰,等. 给水管网铸铁管道的管垢组成与通水水质特征的关系[J]. 中国给水排水,2014,30(20):32-37.
- Yu Linke, Shi Baoyou, Wan Yunjie, *et al.* Relationship between water quality characteristics and iron corrosion scale composition in drinking water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(20):32-37 (in Chinese).
- [10] 李礼,李玉仙,王敏,等. 管垢差异对水源切换后铁释放程度的影响及其黄水风险判断[J]. 给水排水,2016,42(S1):273-277.
- Li Li, Li Yuxian, Wang Min, *et al.* The iron release rules of the pipes with different scale when water source switch and red water risk prediction[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(S1):273-277 (in Chinese).
- [11] Carlson L, Schwertmann U. The effect of CO<sub>2</sub> and oxidation rate on the formation of goethite versus lepidocrocite from an Fe(II) system at pH 6 and 7[J]. Clay Minerals, 1990, 25(1):65-71.
- [12] Li X, Wang H, Hu C, *et al.* Characteristics of biofilms and iron corrosion scales with ground and surface waters in drinking water distribution systems [J]. Corrosion Science, 2015, 90:331-339.
- [13] Yang F, Shi B Y, Gu J N, *et al.* Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a drinking water distribution system [J]. Water Res, 2012, 46(16):5423-5433.
- [14] 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 Zhangbin, Wang Yang, Zhang Xiaojian, *et al.* Effect on iron release in drinking water distribution systems [J]. Environmental Science, 2007, 28(10):2270-2274 (in Chinese).
- [15] Sarin P, Snoeyink 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, 130(4):364-373.
- [16] 米子龙,张晓健,陈超,等. 硫酸根和碱度变化对管网铁释放的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(1):31-34.
- Mi Zilong, Zhang Xiaojian, Chen Chao, *et al.* Influence of sulphate and alkalinity change on iron release in drinking water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(1):31-34 (in Chinese).
- [17] 黄廷林,戴雪峰,王旭晔,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 Tinglin, Dai Xuefeng, Wang Xumian, *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).
- [18] 张金松,尤作亮. 安全饮用水保障技术[M]. 北京:
- (下转第63页)