

水源更换对给水管网水质的影响研究

王洋¹, 牛璋彬¹, 张晓健^{1*}, 陈超¹, 何文杰², 韩宏大²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040)

摘要: 为了研究水源更换对给水管网水质的影响, 对北方 A 市水源更换过程中管网水质理化指标进行了监测分析. 通过 33 h 的监测发现, 由于水源水质不同造成管网水质化学不稳定, 管网水质部分指标发生了明显的下降, pH 从 7.54 降到 7.18, 碱度从 188 mg·L⁻¹ 降到 117 mg·L⁻¹, 氯化物从 310 mg·L⁻¹ 降到 132 mg·L⁻¹ (以 Cl⁻ 计), 电导率从 0.176 S·m⁻¹ 降到 0.087 S·m⁻¹, 钙离子和镁离子略有下降分别为 15 mg·L⁻¹ 和 11 mg·L⁻¹, 这些都是由于滦河水质与黄河水质不同造成的; 余氯在换水过程中发生了较复杂的变化, 主要是由于水源更换造成耗氯量增加以及夜间用水量少造成管网水输配时间长引起的; pH、碱度、余氯的变化使得管网水中铁的含量增加, 最高达到 0.4 mg·L⁻¹, 超出饮用水标准规定的 0.3 mg·L⁻¹. 通过分析水源更换过程中水质的变化, 提出了控制管网水质稳定的方法主要有提高 pH、增加碱度、投加缓蚀剂和严格保证出厂水及管网水水质指标特别是余氯等.

关键词: 给水管网; 水源更换; 化学稳定性; 铁释放

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)10-2275-05

Influence of Water Source Switching on Water Quality in Drinking Water Distribution System

WANG Yang¹, NIU Zhang-bin¹, ZHANG Xiao-jian¹, CHEN Chao¹, HE Wen-jie², HAN Hong-da²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tianjin Water Works Limited Company, Tianjin 300040, China)

Abstract: This study investigates the regularity of the change on the physical and chemical water qualities in the distribution system during the process of water source switching in A city. Due to the water source switching, the water quality is chemical-astable. Because of the differences between the two water sources, pH reduced from 7.54 to 7.18, alkalinity reduced from 188 mg·L⁻¹ to 117 mg·L⁻¹, chloride (Cl⁻) reduced from 310 mg·L⁻¹ to 132 mg·L⁻¹, conductance reduced from 0.176 S·m⁻¹ to 0.087 S·m⁻¹ and the ions of calcium and magnesium reduced to 15 mg·L⁻¹ and 11 mg·L⁻¹ respectively. Residual chlorine changed while the increase of the chlorine demand and the water quantity decreasing at night, and the changes of pH, alkalinity and residual chlorine brought the iron increased to 0.4 mg·L⁻¹ at the tiptop, which was over the standard. The influence of the change of the water parameters on the water chemical-stability in the drinking water distribution system is analyzed, and the controlling countermeasure is advanced: increasing pH, using phosphate and enhancing the quality of the water in distribution system especially the residual chlorine.

Key words: drinking water distribution system; water source switching; chemical-stability; iron release

水资源特别是饮用水资源短缺已经成为制约我国很多地区经济发展、人民生活水平提高的瓶颈因素之一. 饮用水水质的保障一直是国内外水工业普遍关注的热点, 仅仅采用先进的饮用水处理技术和工艺保证出厂水水质, 还远远不能保障用户水质安全, 如果不能有效地控制输配过程中管网系统的二次污染, 用户水质就可能发生恶化, 导致消费者投诉.

近年来, 由于水资源的紧缺和供水水源受到污染, 特别是针对水源地出现的突发性污染事件, 我国很多城市的供水水源都已经或准备设置 2 个或多个水源. 水源的原水水质差别较大, 经过水厂相同的处理工艺后出厂水的很多水质理化指标有很大的差异. 国外曾经报道过由于饮用水水源更换而导致的

供水区内大范围水质恶化现象. 例如, 美国南加利福尼亚地区在 20 世纪 40 年代, 将地下水改为地表水后发生严重的“红水”现象. 研究表明^[1], 由于水源的变化会直接影响管网水质, 造成管道表面的腐蚀锈层脱落, 从而引发用户处发生“红水”现象, 同时管壁上生物膜进入水中, 导致产生了异臭和异味. 国内目前对于水源更换引起的水质变化关注较少, 北方 A 市在进行水源更换过程中有消费者投诉出现“红水”现象, 为了研究水源更换对管网水水质的影响情况, 在北方 A 市更换水源的时候在管网设点监测并进

收稿日期: 2006-11-10; 修订日期: 2007-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578081); 国家高新技术研究发展计划(863)项目(2002AA601140, 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

行试验分析.

1 材料与方法

1.1 取样点设置

北方 A 市的水源有 2 个:黄河水和滦河水.在水源更换过程中,黄河水水源闸门关闭,开启滦河水水源,使得滦河水首先进入西河预沉池与原有的黄河水混合,然后再进入水厂进行处理.管网采样点设置在距离水厂 3 km 处的公共汽车站内,监测间隔时间为 1 h.清水池的水力停留时间为 24 h 左右,水厂整个构筑物的停留时间为 4 h 左右,根据经验在管网中水的停留时间为 1 h 左右.因此完成整个水源更换过程需要 30 h 以上.监测从换水当日的09:00开始进行,到第 2 d 晚上18:00结束,整个过程共 33 h.

1.2 测试指标及方法

确定试验中需要测试的指标和测试方法如表 1 所示^[2].

表 1 测试指标及测试方法
Table 1 Indexes and methods in the measuring

测试指标	测试方法
pH	HORIBA(W-22XD)水质检测仪
电导率(COND)	HORIBA(W-22XD)水质检测仪
水温(T)	HORIBA(W-22XD)水质检测仪
浊度(TUB)	HORIBA(W-22XD)水质检测仪
总溶解性固体(TDS)	HORIBA(W-22XD)水质检测仪
氧化还原电位(ORP)	HORIBA(W-22XD)水质检测仪
碱度	酸碱指示剂滴定法
钙离子	EDTA 滴定法
镁离子	EDTA 滴定法
余氯	邻甲苯胺比色法
氯化物	硝酸银滴定法
总铁	邻菲罗啉分光光度法

2 结果与分析

2.1 滦河水和黄河水的水质分析

滦河水和黄河水的部分理化指标如表 2 所示.2 种原水的水质有很大的不同,尤其是水中氯化物的含量变化最明显,所以研究中将氯化物的变化作为换水过程进度的 1 个指示指标.其中滦河水的 pH、硬度、浊度以及氯化物都低于黄河水的相应指标,2 种原水的铁含量基本相同.

2.2 水源更换水质指标变化

在水源更换过程中监测点管网水温基本稳定在 21.2~22.0℃之间;浊度全部超过国家饮用水的标准,在 1~3 NTU 之间.换水过程中管网水中氯化物、电导率、碱度、pH、钙离子、镁离子、余氯、氧化还原电位和总铁的变化如图 1 所示.

表 2 滦河水与黄河水的水质
Table 2 Water qualities of the Yellow River and the Luan River

指标	黄河水	滦河水
浊度/NTU	6.3	5.5
pH	7.63	7.05
总硬度(以 CaCO ₃ 计)/mg·L ⁻¹	340	280
铁/mg·L ⁻¹	0.22	0.21
氯化物/mg·L ⁻¹	265	89

pH、碱度、氯化物和电导率随换水发生明显的下降,pH 从 7.54 降到 7.18,碱度从 188 mg·L⁻¹降到 117 mg·L⁻¹,氯化物从 310 mg·L⁻¹降到 132 mg·L⁻¹(以 Cl⁻ 计),电导率从 0.176 S·m⁻¹降到 0.087 S·m⁻¹.在下降开始阶段,下降速率较慢,之后速率加快,到监测结束时各项指标又再次趋于稳定.

钙、镁离子在换水过程中略有下降,分别下降了 15 mg·L⁻¹和 11 mg·L⁻¹,变化过程较短,很快趋于稳定.

余氯在换水过程中变化比较复杂,开始阶段余氯随时间不断的下降,在 16~18 h 的时候下降到最低(这段时间是 0:00~02:00),之后开始上升,到第 2 d 15:00~16:00 时达到最高值.

随着管网水中余氯的变化,管网水的氧化还原电位(ORP)也发生类似的变化,但由于管网水比较纯净,氧化还原电位的波动比较大,在换水后 20 h 左右的时候出现最低值.

管网水中铁随换水时间的变化是这次换水研究关注的重点,在整个过程的开始阶段,总铁随时间不断上升,在 20 h 的时候总铁出现 1 个峰值,持续一段时间后总铁开始下降.其中峰值处的 6 个点的总铁是处于超标(>0.3 mg·L⁻¹)的情况,其他的时间总铁基本上都在 0.3 mg·L⁻¹以下,符合我国饮用水国家标准.

2.3 水源更换对管网水质影响分析

由于水厂各个处理单元对水中的钙离子、镁离子以及氯化物含量影响不大,所以给水管网水中这些离子的含量与原水中的基本相同.通过比较表 2 中相应的指标可知,在换水过程中管网水相应指标发生变化主要是由于水源水质的差别造成的.

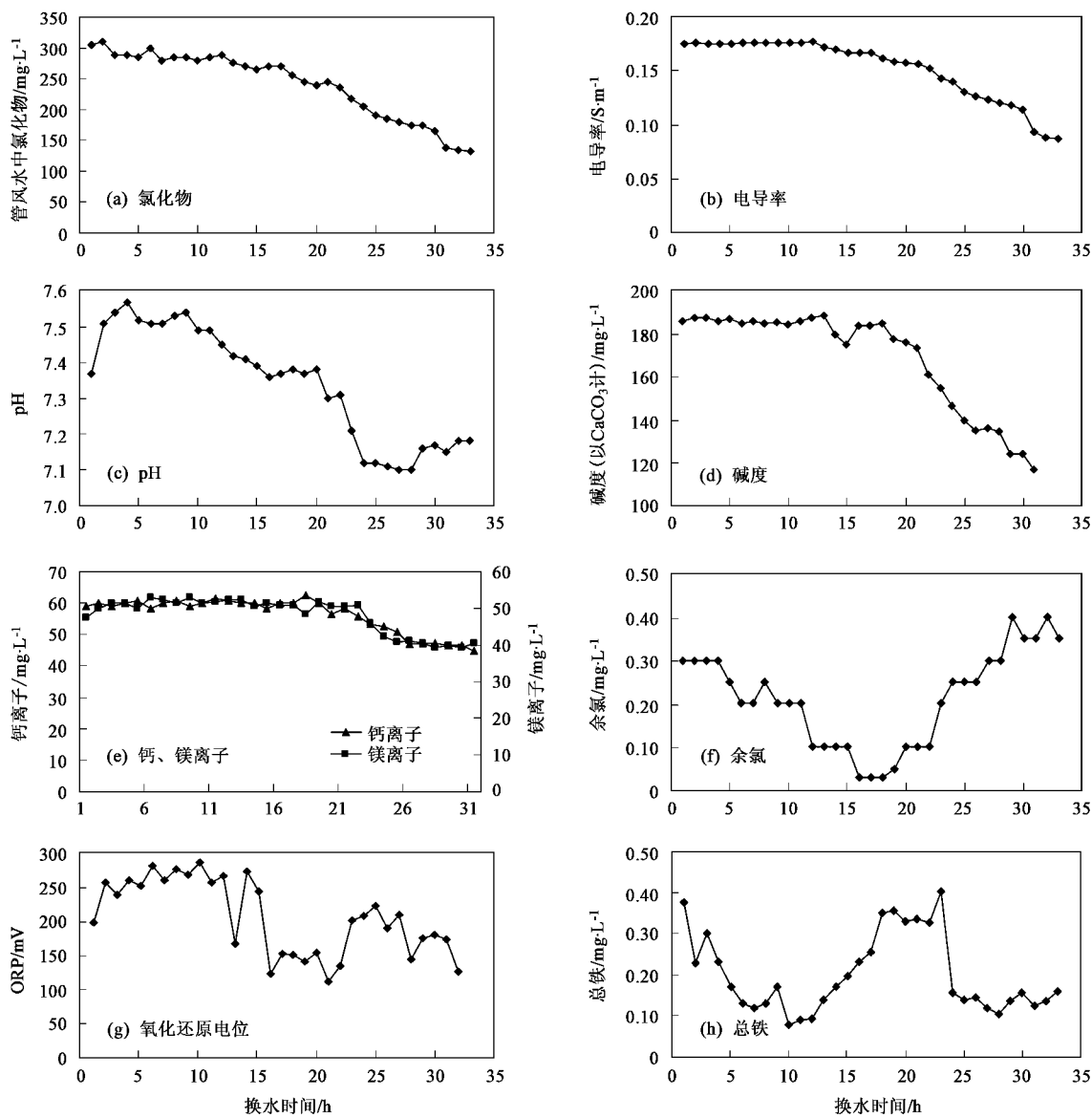


图 1 换水过程中管网水部分水质指标随时间变化

Fig.1 Water qualities changed with the time during the process of the water source switching

2 个水源水中铁的含量基本相同,水厂出水中铁的含量 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 达到国家标准,但是在换水过程中管网水中铁的含量超标.这主要是由于管网水质的改变影响了水与管壁管垢的化学平衡,破坏了原有管壁沉积层的稳定性,使得管壁附着物质脱落、溶解以及释放,管网水中铁含量急剧增加,在用户处出现“红水”现象.

参考其他研究者提出的铁释放和红水产生的机理,确定在本试验过程中影响管网中铁的释放的因素主要有:余氯、pH 和碱度,下面分别对这些因素进行讨论分析.

2.3.1 余氯

余氯对于管网铁释放影响比较明显,对于已经使用一定年限的旧管,如果余氯减少,水中铁的含量将升高^[3]. Sarin 等^[4,5]根据前人的研究成果针对铁释放现象提出了溶解氧影响模型.管内壁的管垢可以分为 2 层,外层是由含三价铁化合物组成的致密层,内层则是由含二价铁化合物组成的疏松层.外层可以作为保护层,防止内部铁管腐蚀和铁释放,当管网水中氧化剂(溶解氧和余氯等)浓度高时,由于其高的氧化性,能够保持外层结构不被破坏,内部的二价铁不会释放出来.而由于氧化剂浓度衰减而浓度降低时,根据 Kuch 机理^[6]致密层将会发生反应而出现裂缝,内层的二价铁就会释放到水中.

将换水过程中的总铁和余氯随时间变化进行比较如图 2 所示,可以看出余氯相对较高时总铁的含量比较低,在余氯相对较低的时候总铁的含量较高.同时可以看出,余氯出现最低值的时间大约在换水后 16 h,总铁含量出现峰值是在换水后 18 h,余氯对于铁的影响是有一定的延迟.这主要是因为余氯下降,管垢表层的三价铁沉积物不断被还原成二价铁,使得致密层开始出现空隙,之后致密层与管壁之间的可溶性亚铁离子释放到管网水中造成了总铁含量的上升.由此可知从三价铁开始发生还原反应到亚铁离子大量释放,这个过程大概需要 2 h 左右.

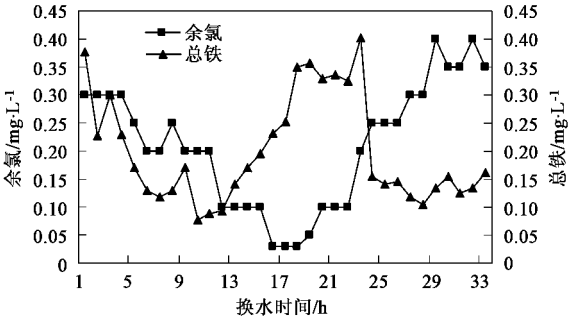


图 2 换水过程余氯和总铁的相关关系

Fig.2 Correlativity between residual chlorine and total iron during the process of the water source switching

经分析造成余氯下降的原因可能有 2 个:①水源更换造成水的耗氯量增加,原有投氯量不能保证足够的余氯.从图 1 中可以看出换水当天和第 2 d 的余氯在相同时间段里(09:00~17:00)的变化是不同的,换水当天在 09:00~17:00 之间余氯是在一直下降,而到了第 2 d 同样在 9:00~17:00 之间余氯是在一直上升.由于这个时间段是用水的高峰时期,所以管网水在管网中的停留时间比较短,理论上余氯消耗量相对较少,不应该出现换水当天下降的情况,开始的 4 h 应该还是水厂和管网中存留的黄河水,之后是西河水库中的黄河水与滦河水的混合水,此时余氯开始下降.这就说明是由于水源水的更换使得水的耗氯量增加,造成了管网水中余氯的下降.②夜晚用水量较少,管网水停留时间增加使得余氯消耗量增加.

2.3.2 pH 值

根据 Sontheimer 等提出的管壁管垢的形成模型^[7],在一定水力条件和溶解氧的条件下,增加 pH 有利于 FeOOH 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 的生成,同时氢氧化亚铁和碳酸亚铁的溶解度随 pH 的增加而下降,所以增

加 pH 有利于控制二价铁化合物的溶解从而减少铁的释放.通过比较换水过程中 pH 随时间的变化以及总铁随时间的变化如图 3 所示,水源水 pH 的不同,引起换水过程中 pH 下降,从而引起管网水中铁的含量增加.同时,随着铁的不断释放,与管网水中 OH^- 反应,造成管网水 pH 进一步下降.

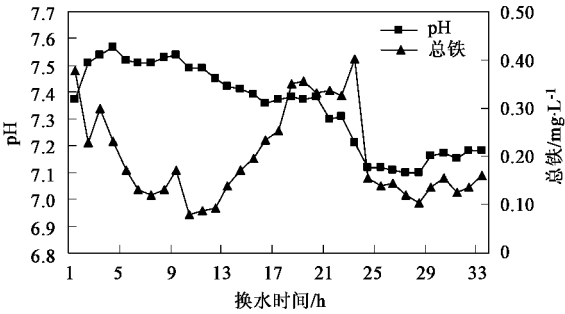


图 3 换水过程 pH 和总铁的相关关系

Fig.3 Correlativity between pH and total iron during the process of the water source switching

2.3.3 碱度

在高碱度的条件下,管壁中碳酸亚铁的含量较多,铁释放主要是受碳酸亚铁溶解性的控制^[8].碱度的降低增加了碳酸亚铁的溶解度,同时促进了铁的释放.

换水监测过程中碱度的下降使得管网水的缓冲能力降低,从而使得含铁化合物的溶解度增加.如图 4 所示,由于原水水质不同,换水引起管网水碱度下降,铁含量上升,二者变化几乎同时发生;在 23 h 左右的时候碱度开始稳定,新的酸碱平衡逐渐形成,铁的含量也开始趋于稳定.

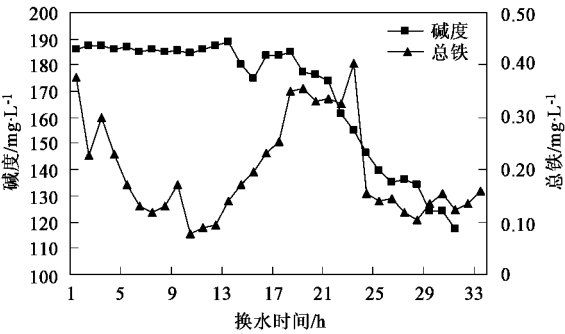


图 4 换水过程碱度和总铁的相关关系

Fig.4 Correlativity between alkalinity and total iron during the process of the water source switching

除此之外,氯离子等离子浓度的改变造成离子强度的改变,这些都使得原本稳定的水源,在混合之

后变成稳定性较差的水,从而导致用户端水质恶化.

3 水源更换中水质恶化控制技术

根据上面的分析以及目前的一些研究和工程实践结果,针对水源更换产生的水质恶化现象提出如下控制技术和对策.

(1) 调节 pH 和碱度 如上分析,提高 pH 可以抑制铁释放等,所以在水厂处理过程中增加调节出厂水 pH 的处理单元,同时调整出水碱度,增加出厂水的稳定性.

(2) 投加缓蚀剂 国外的研究和工程实践认为,在水源更换过程中,投加磷酸盐等缓蚀剂,可以降低和控制水源更换对腐蚀产物释放以及水质的恶化.

(3) 严格保证水质 在水源更换过程中,通过调整水厂处理单元,严格保证出厂水的稳定性,加大管网水的监测力度.保证管网水中余氯含量,对于有机物含量高,管网系统庞大的,考虑多级加氯措施.

4 结论

(1) 管网水中的 pH、碱度、氯化物、电导率等发生了明显地下降,钙离子和镁离子略有下降,这些都是由于滦河水质与黄河水质不同造成的.

(2) 管网水中余氯在换水过程中发生了较复杂的变化.其中余氯的变化主要是由于水源更换造成水的耗氯量增加以及夜晚用水量较少引起的.

(3) 管网水中总铁在换水过程中发生超标($> 0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),使得用户处出现“红水”现象.通过对管网铁释放机理的分析表明,pH 和碱度的下降以及

余氯的变化是引起管网水中铁含量增加的主要原因.

(4) 根据以上结果提出针对换水过程管网水质恶化的一些控制对策和建议,提高 pH、投加缓蚀剂和严格保证出厂水及管网水水质指标特别是保证管网中余氯.

参考文献:

[1] Berg R L, Jensen T ϕ , Bennedsen L, *et al.* Investigation of introducing water from an artificial recharge plant to an existing groundwater distribution system [J]. *Water Supply*, 2005, **5**(1): 25 ~ 32.

[2] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第三版).北京:中国环境科学出版社,2002.177 ~ 285.

[3] 牛璋彬,王洋,张晓健,等.某市给水管网中铁释放现象影响因素与控制对策分析[J].*环境科学*,2006,**27**(2):310 ~ 314.

[4] Sarin P, Snoeyink V L, Bebeel J, *et al.* Physical-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes [J]. *Water Research*, 2001, (12):2961 ~ 2969.

[5] Sarin P, Jonathan A Clement, Vernon L Snoeyink, *et al.* Iron release from corroded, unlined cast-iron pipe [J]. *American Water Works Association*, 2003, (11):85 ~ 96.

[6] Kuch A. Investigations of the Reduction and Re-oxidation Kinetics of Iron(III) Oxide Scale Formed in Waters [J]. *Corrosion Science*, 1988, **28**(3):221 ~ 31.

[7] Sontheimer H, Kolle W, Snoeyink V L. The Siderite Model of the Formation of Corrosion-resistant Scales [J]. *AWWA*, 1981, **73** (11):572 ~ 579.

[8] Syedabdul Vakebl Imran. Effect of Water Quality on Red Water Release in Iron Drinking Water Distribution System [D]. Florida: the Department of Civil and Environmental Engineering in the College of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida, 2003.