

• 管网设计与运行 •

淡化海水水质调节技术对管网铁释放的影响

温 柔 刘文君

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要 利用管段模拟反应器,定量研究了调节淡化海水 pH、碱度及与自来水混合比例对管网铁释放的控制作用。研究发现:提高 pH、碱度与混合自来水都对管网铁释放有显著的控制效果。调节 pH 从 6.6 到 8.2,浊度减少 58.4%,铁释放减少了 41.6%;增加碱度到 130 mg/L(以 CaCO_3 计),浊度降低 83.3%,铁释放减少了 74.3%;淡化海水的混合比例为 60%时,碳酸钙沉淀势(CCPP)大于 -1.2 mg/L ,铁释放减少了 89.2%。同时还研究了铁释放浓度与水质判别指数的关系,当 CCPP 小于 -1.2 mg/L 时,铁释放浓度与 CCPP 呈良好的线性关系($R^2=0.9937$);铁释放浓度与拉森指数(LRI)也具有良好的线性关系($R^2=0.9867$)。可以根据此线性关系定量表征淡化海水的腐蚀性强弱。

关键词 淡化海水 铁释放 pH 碱度 混合比例

DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2016.0436

Control effect of regulating desalinated seawater quality parameters on iron release in drinking water distribution system

Wen Rou, Liu Wenjun

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The control effect of regulating desalinated seawater quality parameters on iron release in the drinking water distribution system was investigated. Experiments using the pipe section simulation reactors found that the iron release rate decreased significantly with increasing pH, alkalinity and the mixing ratio with regular tap water. Specifically, after increasing pH from 6.6 to 8.2, the turbidity decreased by 58.4%, the iron release rate decreased by 41.6%. Besides, increasing alkalinity to 130 mg/L (calculated as CaCO_3) made the turbidity decreased by 83.3% and the iron release rate decreased by 74.3%. Meanwhile, the iron release rate decreased by 89.2% when the mixing ratio of desalinated seawater reached 60% and the CCPP was above -1.2 mg/L . The relationship of the iron release and water quality determination index was also discussed. A linear relationship exists between the iron release and calcium carbonate precipitation potential (CCPP) when CCPP less than -1.2 mg/L , also a linear relationship existed between the iron release and Larsen Index (LRI). Corrosion could be predicted quantitatively according to this linear relationship.

Keywords: Desalinated seawater; Iron release; pH; Alkalinity; Mixing ratio

0 引言

近年来,饮用水资源短缺已成为我国城市发展面临的重大问题,各大中城市积极开发多种水源和相关技术,其中海水淡化是目前技术比较成熟,应用较广泛的一种解决水资源问题的途径。市政管网在输配

水的过程中,管道内壁因被腐蚀而形成管垢,管垢长期在稳定的水力和水质条件下形成相对稳定的外貌特征和理化性质,而稳定的管垢能避免管道被进一步腐蚀。淡化海水由于硬度低、碱度低、含盐量高、稳定性差等特点,会破坏市政管网中管垢的稳定结构,造

成不同程度的“黄水”或“红水”现象。因此,研究给水管网的铁稳定性技术,尤其是淡化海水进入市政管网后的铁释放控制技术已经成为推动淡化海水的市政应用,解决淡化海水输送水质安全保障的迫切需求。

长期以来,国内有关管网铁稳定性技术的研究多是侧重于管网的维护和改造,通过调节出厂水质来控制管网铁释放方面的研究较少。影响管网铁释放的因素除了管道本身的属性,水质因素如 pH、碱度、硬度、温度、各无机离子浓度、阻垢剂以及微生物等都会影响管网的铁稳定性,调节水质参数对控制管网的铁释放有明显作用^[1]。因此,本研究根据淡化海水的水质特性,通过调节 pH、碱度以及和常规自来水的混合比例对淡化海水进入市政管网后铁释放的控制效果进行研究,以期对淡化海水的长距离输送及水质保障提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与方法

截取北方某市供水管网中使用年限为 20~30 年的铸铁管段作为试验管,制作成“管段模拟反应器”,如图 1 所示^[2]。试验管段为 DN100,每段长 10 cm,共 6 段,组成 6 组反应器。有机玻璃法兰与聚四氟乙烯垫片可以减少溶出对试验结果的影响,搅拌桨的转速为 110 r/min,保证反应器内水体混合均匀的同时保持管段内壁一定的剪切力。

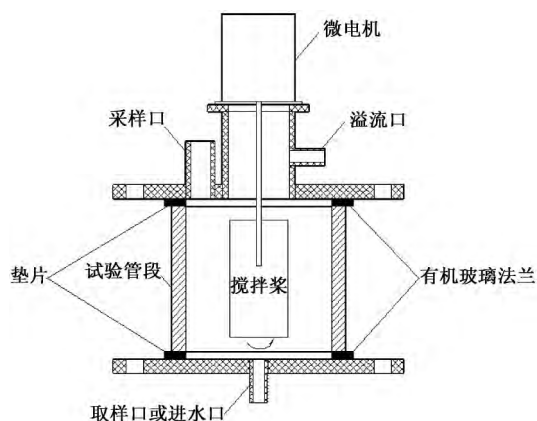


图 1 管段模拟反应器示意^[2]

模拟反应器正式试验之前以含 0.50 mg/L (以 Cl_2 计) 自由氯的自来水浸泡管段,每 24 h 取样检测反应器内自来水的浊度、色度以及总铁浓度,确定管段到达稳定期。正式试验时,分别于初始、0.5 d、

1 d、2 d、4 d、6 d、8 d、10 d、12 d 检测总铁浓度,考察各水质参数对管网铁释放的影响。

主要的水质检测指标及测试方法有:pH (Hach HQ40d 便携分析仪)、TDS (Hach HQ40d 便携分析仪)、浊度 (Hach 2100P 光散射浊度仪)、总碱度^[3] (酸碱滴定法)、硫酸根 (ICS 3000 离子色谱仪)、氯离子 (ICS 3000 离子色谱仪)、钙离子 (ICS 3000 离子色谱仪)、镁离子 (ICS 3000 离子色谱仪)、总铁^[3] (二氮杂菲分光光度法)。

1.2 试验水质

试验用水采用我国北方某市某自来水厂的出厂水和北方某省某海水淡化水厂的反渗透工艺出水,两种水的主要水质指标见表 1。

表 1 水厂出厂水和淡化海水的主要水质指标

测试指标	水厂出厂水	淡化海水
pH	8.31	6.63
硫酸根/mg/L	50.2	8.1
氯离子/mg/L	20.5	159
总碱度(以 CaCO_3 计)/mg/L	98	4
总硬度(以 CaCO_3 计)/mg/L	160	1.75
钙离子/mg/L	41.0	0.2
总溶解性固体/mg/L	176	237.5
碳酸钙沉淀势 CCPP/mg/L	7.8	-10.6
拉森指数 LRI	0.85	53.9

为研究 pH 与碱度单独对管网铁释放的影响,采用控制变量法。滴加 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液调节淡化海水的 pH,分别为 6.6、7.1、7.4、7.8、8.2、8.5;以淡化海水溶解定量的 NaHCO_3 固体来调节碱度(以 CaCO_3 计,下文同),分别为 5 mg/L、40 mg/L、70 mg/L、100 mg/L、130 mg/L、150 mg/L。采用混合淡化海水与自来水厂出厂水的方式调节碳酸钙沉淀势(CCPP)与拉森指数(LRI),淡化海水的含量分别为 100%、80%、60%、40%、20%、0%。根据试验水质参数计算 CCPP^[4] 与 LRI,考察 CCPP 与 LRI 对管网铁释放的影响。

2 结果与讨论

2.1 调节淡化海水 pH 对管网铁释放的影响

不同 pH 条件下的淡化海水在模拟反应器中运行 12 d 内,反应器内浊度与总铁浓度变化如图 2、图 3 所示。

由图 2 可以看出,6 组试验组浊度开始都呈上升趋势,后趋于稳定,稳定时的浊度随 pH 的增大而

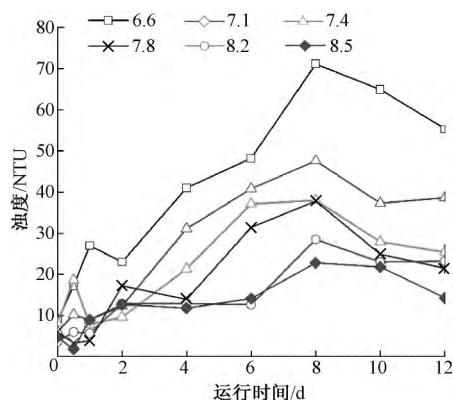


图2 调节淡化海水 pH 对管网浊度的影响

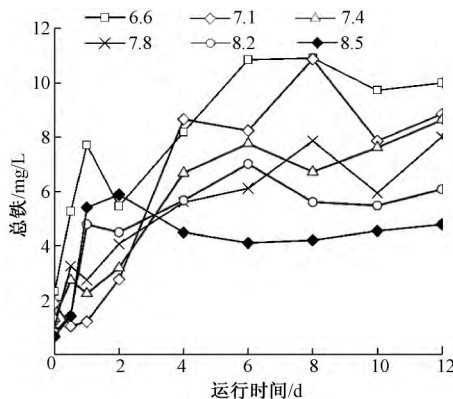


图3 调节淡化海水 pH 对管网铁浓度的影响

减小。相对于未调 pH 时($\text{pH}=6.6$), pH 由小到大浊度分别降低 31.4%、46.4%、51.8%、58.4%、67.2%。由图 3 可以看出,在反应器运行的前 4 d,总铁浓度不断上升,说明管垢中的含铁物质在不断地溶解,之后逐渐与试验水体达到平衡,在 8~12 d 内达到相对平衡。未调 pH 时($\text{pH}=6.6$),达到平衡所需时间相对较长,相对平衡浓度为 10.37 mg/L。pH 越大,平衡时间越短,平衡浓度越低,pH 为 8.2 时减小到 6.05 mg/L,减少了 41.6%,已有显著变化;pH 为 8.5 时,平衡浓度为 4.41 mg/L,减少了 57.5%。这说明在一定的水力与水质条件下,升高 pH 对抑制管网管垢的铁释放有积极作用。米子龙等^[5]研究表明,pH 在一定范围内(7.6~8.2)升高对铁释放速率降低效果影响显著,说明增加 pH 有利于提高给水管网的铁稳定性,这与本文研究结果一致。

提高 pH 可以抑制成熟的管垢发生铁释放的主要原因是:pH 升高后,氢离子浓度降低,以氧离子和氢离子作为腐蚀原电池的阴极的还原反应受到抑制,

腐蚀反应速率降低,铁释放变慢;同时,pH 升高,还会降低各种亚铁盐的溶解度,降低铁的平衡浓度,抑制铁释放。另外,Sarin P 等^[6]认为高 pH 可以促进二价铁转换为三价铁,促使管垢表面的钝化层恢复稳定,从而抑制铁释放,同时也以试验证明 pH 在 7.5~9.5 范围内升高时,水体中铁的浓度有下降的趋势。

2.2 调节淡化海水碱度对管网铁释放的影响

投加 NaHCO_3 增加淡化海水碱度部分的试验结果如图 4、图 5 所示。

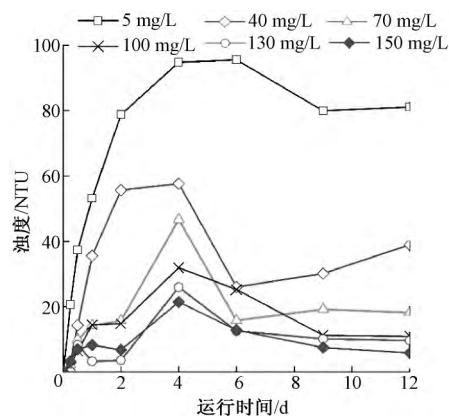


图4 调节淡化海水碱度对管网浊度的影响

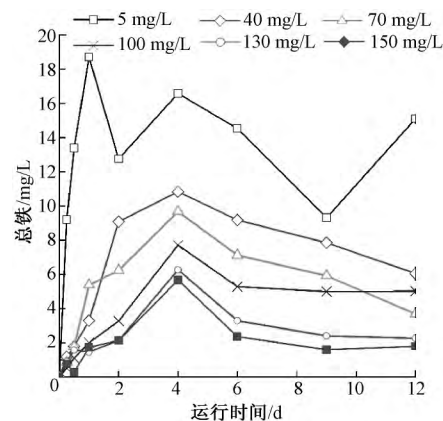


图5 调节淡化海水碱度对管网铁释放的影响

碱度为 5 mg/L 水样为未调节碱度的淡化海水。由图 4 可以看出,调节碱度后,稳定时浊度明显低于不调节的情况。在试验运行的 0~4 d,浊度呈上升趋势,后逐渐趋于平稳,相对于未调节淡化海水(碱度 5 mg/L),碱度为 40 mg/L、70 mg/L、100 mg/L、130 mg/L、150 mg/L 时,浊度分别降低 56.5%、71.5%、77.3%、83.3%、86.4%。由图 5 可以看出,运行试验的 0~4 d,反应器内总铁浓度逐渐增加,4 d 后碱度为 5 mg/L 试验组,总铁浓度波动较大,其他浓度

均逐渐达到稳定,且碱度越大,反应器内总铁浓度越低。碱度为 5 mg/L 试验组,4~12 d 内的平均总铁浓度为 13.88 mg/L。相对于碱度为 5 mg/L 试验组,碱度为 40 mg/L、70 mg/L、100 mg/L、130 mg/L、150 mg/L 的试验组,总铁浓度分别降低 38.0%、52.5%、58.6%、74.3%、86.2%,降低效果十分显著。这说明,在淡化海水本身碱度很低的情况下,增加碱度来抑制铁释放的手段非常有效,尤其是碱度大于 130 mg/L,效果更佳。Imran 等^[7]基于 2 年的试验数据证明,当水中碱度大于 80 mg/L 时,可对抑制铁释放、防止红水发生。

提高碱度可以抑制铁释放是由于碱度越高,水溶液缓冲强度越大,同时碳酸盐浓度增加,使水中二价铁离子的平衡浓度降低,从而减缓或抑制管网的铁释放。溶液中的碳酸根还可以与钙离子结合形成碳酸钙沉淀,碳酸钙沉淀可以有效减小腐蚀瘤内核层的孔隙率,而被认为是一种有效的阻垢剂,碳酸钙还可以在管壁上形成一层致密的保护膜,抑制管道的腐蚀与铁的释放^[8]。此外,对于低 pH、低碱度的淡化海水,增加碱度也可以使 pH 从 6.6 升高到 8 以上,提高 pH 抑制铁释放。

2.3 调节淡化海水混合比例对管网铁释放的影响

用淡化海水与自来水厂出厂水以不同比例相互混合的试验结果见图 6、图 7 所示。

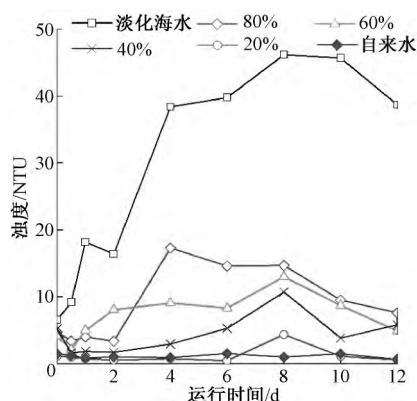


图 6 调节淡化海水混合比例对管网浊度的影响

由图 6 可知淡化海水比例为 20% 试验组在 12 d 时浊度已降低到 0.57 NTU,淡化海水试验组,6~12 d 时达到相对稳定;比例为 80% 试验组在 4 d 后逐渐趋于稳定,其他试验组基本一直处于稳定状态。淡化海水比例越低,稳定时浊度越低。由图 7

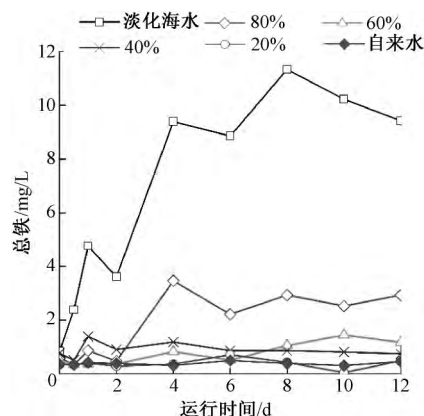


图 7 调节淡化海水混合比例对管网铁释放的影响

可以看出,混合自来水后,反应器中的总铁浓度很快趋于平衡,且淡化海水比例越低,总铁浓度越低,100% 淡化海水在稳定时,总铁浓度达到 9.96 mg/L,而淡化海水比例为 80% 时就骤降到 2.65 mg/L,减少了 73.4%,比例为 60% 时总铁浓度减少了 89.2%,甚至在比例为 20% 时降低到 0.41 mg/L,减少了 95.9%,这说明在淡化海水中混合自来水可以显著减少管网管垢的铁释放。

在淡化海水中混入自来水可以有效抑制铁释放的原因,除了混入自来水可以提高淡化海水的 pH 与碱度值之外,还因为自来水的混入改变了无机离子的浓度。氯离子是一种腐蚀性阴离子,田一梅等^[9]认为氯离子在铁释放的反应中扮演催化剂的角色,氯离子会取代钝化层中金属离子相互连接的氢键,破坏硬壳层,生成了溶解态的 Fe^{2+} ,同时,氯离子浓度的提高使水中离子强度增加,从而增加了离子的迁移速率,促进了铁的释放。淡化海水中氯离子浓度很高,是常规自来水中的 7~8 倍,与自来水混合起到稀释的作用,降低氯离子浓度,从而降低铁释放。钙镁离子除了是人体必需的矿物质元素,且对管网铁释放有明显的抑制作用。淡化海水中钙镁离子浓度极低,与自来水混合可以大大提高水中钙镁离子浓度,从而抑制铁释放。

图 8 表示浊度与总铁浓度的关系,根据所有对应的浊度与铁浓度值计算可得,其相关系数达到 0.900 2,说明浊度与总铁浓度成正相关,且相关性较高,原因可能为溶液中的铁主要以含铁颗粒物形式存在。

2.4 CCPP 与 LRI 与管网铁释放的关系

利用试验用水的各水质参数可以计算出该水样

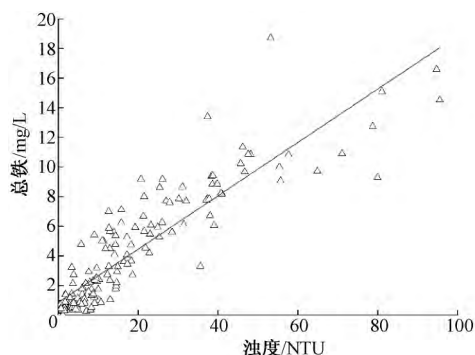


图8 浊度与总铁浓度的相关性比较

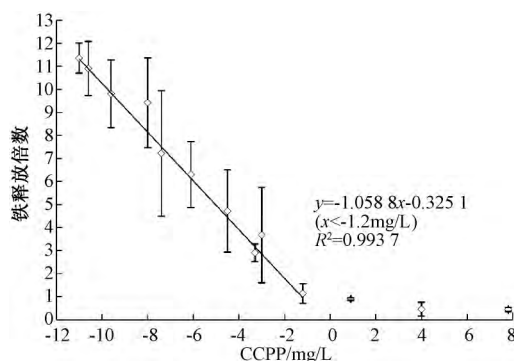


图9 CCPP与铁释放倍数的关系

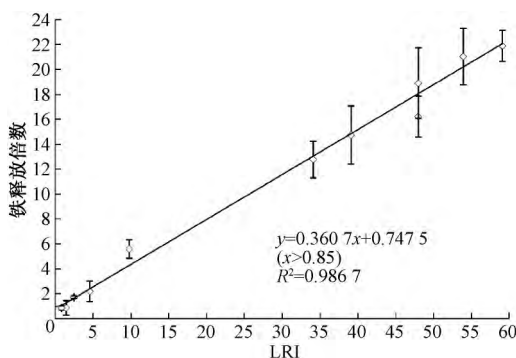


图10 LRI与铁释放倍数的关系

的CCPP与LRI,结合试验时平衡期的总铁浓度,可以观察CCPP与LRI与管网铁释放的关系,如图9与图10所示。

一般认为,CCPP<-5 mg/L时,碳酸钙有溶解趋势,-5 mg/L<CCPP<5 mg/L时,水处于相对稳定状态;CCPP>5 mg/L时,碳酸钙具有沉淀趋势;LRI<0.3时,水基本没有腐蚀性,0.3<LRI<0.7时,有较弱腐蚀性,LRI>0.7时,有较强腐蚀性^[10]。但是,LRI是由大量数据总结出来的规律,CCPP虽然可以定量地反映碳酸钙的理论沉淀量或

溶解量,但与铁的释放没有直接的关系。管网铁释放是一个非常复杂的体系,LRI与CCPP管网铁释放的关系与影响机理目前还需要进一步研究。

以CCPP=0,LRI=0.7时的铁释放浓度为基准,计算各CCPP或LRI时的铁释放倍数,可得图9、图10的化学稳定性判别指数与铁释放倍数的关系。由图9可以看出,当CCPP<-1.2 mg/L时,CCPP值与铁释放浓度具有较好的线性关系,CCPP负值越大,铁释放浓度越高,说明水体腐蚀性越强;而CCPP>0.9 mg/L时,铁释放浓度总体较低较稳定,与CCPP值没有明显的线性关系。CCPP是定量表征溶液中碳酸钙溶解或沉淀量的指标,CCPP与铁释放倍数成线性关系,说明管道铁腐蚀与溶液碳酸钙溶解有一定的关系。由图10可以看出LRI值越大,铁释放浓度越高,当LRI>0.85时,LRI值与铁释放浓度也成较好的线性关系。

综上可说明,当水质呈腐蚀性时(CCPP<-1.2 mg/L、LRI>0.85),水质稳定性判别指数与铁释放量成线性关系,可以根据此线性关系定量表征水质的腐蚀性强弱。

为抑制管网铁释放,可以通过提高淡化海水的pH、碱度以及钙离子浓度来增大CCPP,或增加碱度、降低氯离子浓度减小LRI。单独提高pH并未大幅度改变CCPP与LRI,增加碱度可大幅度提高CCPP、降低LRI,混合自来水可以提高pH、碱度、钙离子浓度,降低氯离子浓度,从多个方面改善水质,尤其是当淡化海水比例低于60%时,可调节CCPP大于-1.2 mg/L,抑制铁释放效果十分显著。

3 结论

本文针对调节淡化海水的pH、碱度与混合比例对饮用水管网铁释放的影响进行研究,所得结论如下:

(1)单独提高pH或碱度都对管网铁释放有抑制作用,调节pH从6.6到8.2,浊度减少58.4%,铁释放减少了41.6%,而增加碱度到130 mg/L,浊度降低83.3%,铁释放减少了74.3%,这说明增加淡化海水的碱度比单独提高pH对铁释放的控制效果更明显。

(2)淡化海水与常规自来水混合对管网铁释放有显著的控制效果,当淡化海水比例为60%时,

罗钾Ⅱ期供水管道泄水消能系统型式选择探讨

张金承

(水利部新疆水利水电勘测设计研究院, 乌鲁木齐 830000)

摘要 以罗钾Ⅱ期外部供水工程为例,分析了5种泄水消能方案,并对每种方案流速情况,以及流速对阀门、管道及出口消能的影响进行了探讨,详细说明了其优缺点及应注意的问题。

关键词 泄水 消能 流速水头 气蚀 冲蚀

管道泄水系统设计的关键是水流流速的控制,过去其一贯被作为附属构筑物设计,设计中不重视泄水管流速大小,因此常会给工程运行遗留隐患,造成泄水阀门气蚀、泄水管道内壁冲蚀、泄水管震动、泄水管道出口消能并淘刷等破坏形式。本文通过罗钾Ⅱ期外部供水工程泄水阀设计实例,谈一谈泄水管流速控制及消能系统型式的选择。

1 工程概况

罗钾Ⅱ期外部供水工程管道,位于罗布泊西部36团西南方向的戈壁平原上,原水取自米兰水库,水库位于米兰河出山口上游约4 km处,供水管道起自米兰水库下游电站尾水池。管道走向自尾水池

下游出山口7 km向北至Ⅰ期供水工程首部的调节池区。管道全长27.5 km,管道沿线地形为上游高下游低,总落差397 m,全线采用重力流单管输水,管材为螺旋焊钢管,管径为0.9 m、0.8 m及0.7 m 3种。年供水量2 100万 m^3 ,供水对象为解决国投新疆罗布泊钾肥有限责任公司增加的生产和生活用水。沿线地形上游4 km起伏较大,4 km后地形缓倾。在上游7+650处设水处理厂1座,沿线设消能阀3座,泄水阀14座,末端设2 000 m^3 混合池1座,管线平面示意图1。

管道在初步设计时确定沿线的泄水方案是分段泄水,沿线泄水阀直径为 $DN200$,泄水阀采用闸阀,

CCPP大于 -1.2 mg/L ,铁释放浓度降低89.2%。建议淡化海水在进入市政管网前,先与常规自来水进行混合会大大提高管网铁释放的控制效果。

(3)CCPP大于 0.9 mg/L 时,铁释放量稳定较低,得到有效控制,当水体呈腐蚀性时($CCPP < -1.2\text{ mg/L}$, $LRI > 0.85$),铁释放浓度与CCPP呈良好的线性关系, R^2 达到0.993 7,同时也与LRI呈良好的线性关系, R^2 达到0.986 7。可以根据此线性关系定量表征水质的腐蚀性强弱。

参考文献

- 胡小佳. 水质变化对供水管网铁释放的影响及其机理研究[学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012
- 米子龙, 张晓健, 陈超, 等. 淡化海水进入市政供水管网的铁稳定性. 清华大学学报(自然科学版), 2014, (10): 1333~1338
- GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准
- 许仕荣, 赵伟, 王长平, 等. 碳酸盐沉淀理论计算模型及其应

用. 给水排水, 2012, 38(5): 157~160

- 米子龙, 张晓健, 王洋, 等. 调节pH值和碱度对给水管网铁释放的控制作用. 中国给水排水, 2012, (13): 43~46
- Sarin P, Clement J A, Snoeyink V L, et al. Iron release from corroded, unlined cast-iron pipe. Journal American Water Works Association, 2003, 95(11): 85~96
- Imran S A, Dietz J D, Mutoti G, et al. Red water release in drinking water distribution systems. Journal American Water Works Association, 2005, 97(9): 93~100
- Lahav O, Birnhack L. Quality criteria for desalinated water following post-treatment. Desalination, 2007, 207(1): 286~303
- 田一梅, 刘扬, 赵鹏, 等. 海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究. 环境科学, 2012, (4): 1216~1220
- 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. 中国给水排水, 2015, 31(19): 1~7

○ E-mail: 1084054568@qq.com

收稿日期: 2016-04-08

修回日期: 2016-06-07