

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.008

长距离输水管道输水过程中水质变化情况

张 锋¹, 俞 周¹, 芮继承², 黄 鑫²

(1. 上海城投原水有限公司, 上海 200125; 2. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444)

摘 要: 针对长距离输水过程中供水水质安全问题,以JZ水库至SP原水厂之间的原水输送管道(约40 km)为研究对象,分析原水输送过程中水质的变化。结果表明,在输水过程中,总体上典型水质指标如氨氮下降约40%,高锰酸盐指数有所下降,但浊度和菌落总数有所升高。同时,比较加氯、加炭两种预处理方法对原水的净化作用,结果发现两者对原水的预处理效果相当。

关键词: 长距离输水管道; 水质变化; 预处理; 净化作用

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0050-05

Changes of Water Quality in Long-distance Pipelines during Transmission

ZHANG Feng¹, YU Zhou¹, RUI Ji-cheng², HUANG Xin²

(1. Shanghai Chengtou Raw Water Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 2. School of

Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Water samples collected from the transmission pipeline (approximately 40 km) between JZ reservoir and SP waterworks were detected, and the changes of water quality were analyzed aimed at the problem of water quality safety in long-distance water transmission. In the process of water transmission, the typical water quality indexes such as ammonia nitrogen decreased by approximately 40%, permanganate index decreased, but turbidity and total number of bacteria increased. In addition, the pretreatment effects of different methods (chlorination/activated carbon addition) on raw water were compared, and the results showed that the pretreatment effects of raw water were similar.

Key words: long-distance transmission pipeline; change of water quality; pretreatment; purification effect

近年来,为解决淡水资源短缺、时空分布不均及城市水源污染所致的供水紧缺问题,我国实施了多项跨流域、跨地区的长距离原水输水工程^[1-2]。当前,上海市金泽水库通过长距离输水管道为西南五区(青浦、金山、松江、闵行、奉贤)供应原水,输送至各区的管道长度分别为20.0、36.5、40.0、50.0和60.0 km,输水规模达到 $351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,服务人口约

670万人,是上海市居民供水的重要保障之一。

研究发现,长距离大口径输水管道附着的生物膜中存在多种微生物^[3-5],管壁生物膜为了满足自身生长需从水中吸收有机物、氮、磷等营养物质,从而使输送到净水厂的原水水质得到一定程度的净化^[6]。然而在供水管道生物膜上可能存在条件致病菌,对水质造成一定的微生物风险^[7]。因此,生物膜

基金项目: 上海城投原水有限公司青年科技创新项目(KY.YS.2020.0008); 国家自然科学基金资助项目(51678351)

通信作者: 黄鑫 E-mail: huangxin2008@shu.edu.cn

的作用是多方面的^[8-11]。

加氯和加粉末活性炭是比较常见的原水预处理方式^[12]。间歇加氯可以降低长距离输水管道水中溶解氧的消耗、抑制淡水贝类及管壁微生物的生长^[13]。试验发现投加活性炭可有效去除臭味物质、藻毒素、消毒副产物前驱物、农药等多种有机物质,去除效率随着粉末活性炭投加量的增加而提高,并且与未加活性炭时相比,COD、TOC、DOC和UV₂₅₄的去除率均有一定程度的提高^[14]。

因此,研究长距离输水过程中原水水质的变化规律,全面科学地评价输水过程中水质可能受到的影响,并提出相应的解决措施,对保障输水工程水质安全具有重要意义。笔者通过对2019年全年JZ水库至SP原水厂之间原水输送管道(40 km)的水质分析,解析长距离输水过程中的原水水质变化情况,旨在进一步加强对原水水质的管理。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

华东JZ水库供水工程取水规模为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原水通过泵站由管道输送至各区自来水厂。本研究主要讨论长距离输水过程对原水水质的影响,选取JZ水库以及相距40 km的SP原水厂为采样点,对2个采样点2019年春(2月—4月)、夏(5月—7月)、秋(8月—10月)、冬(11月—1月)的数据进行分析。

1.2 检测项目与方法

检测项目有水温、pH、溶解氧、浊度、氨氮、高锰酸盐指数和菌落总数。水温、pH、溶解氧及浊度采用便携式仪器测定,氨氮采用水杨酸分光光度法测定,高锰酸盐指数采用高锰酸钾法测定,菌落总数采用平板计数法测定。

2 结果与讨论

2.1 水质基本概况

图1为长距离输水过程中常规水质指标的变化情况,可知JZ水库原水的水温为 $7.3 \sim 30.4^\circ\text{C}$,pH为 $7.74 \sim 8.08$,溶解氧为 $5.95 \sim 10.05 \text{ mg/L}$;通过管道输水至SP水厂时,水温为 $8 \sim 30^\circ\text{C}$,pH为 $7.82 \sim 7.93$,溶解氧为 $5.97 \sim 11.21 \text{ mg/L}$ 。水温、pH等常规水质指标在长距离输水过程中无明显变化,其中溶解氧有所增加是因为沿程有曝气设备或加压泵站。其供水水质均满足《地表水环境质量标准》(GB

3838—2002)中Ⅲ类及以上水质标准,大部分满足Ⅱ类水质标准。

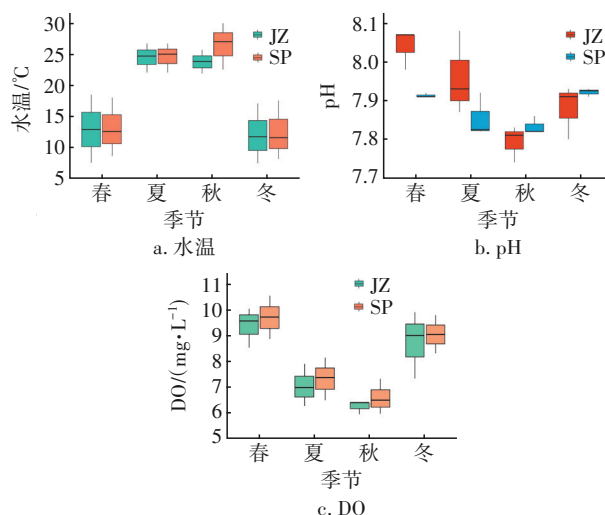


图1 长距离输水过程中常规水质指标的变化情况

Fig.1 Changes in conventional water quality indicators during long-distance water transmission

2.2 有机物降解原因

图2为长距离输水过程中特征水质指标的变化情况。

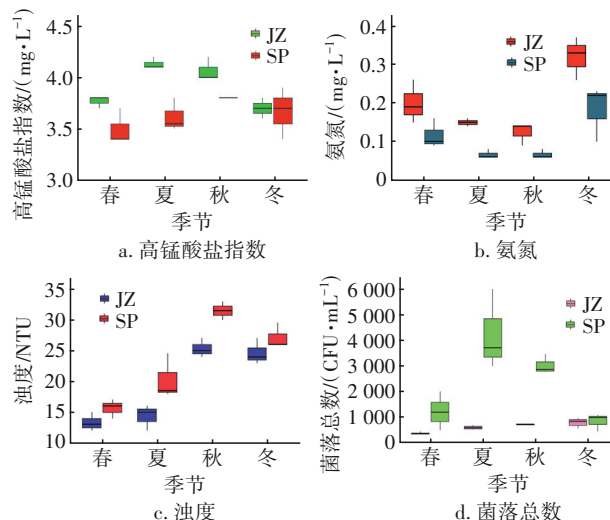


图2 长距离输水过程中特征水质指标的变化情况

Fig.2 Changes in characteristic water quality indicators during long-distance water transmission

由图2可知,JZ水库中高锰酸盐指数为 $3.6 \sim 4.2 \text{ mg/L}$,氨氮为 $0.09 \sim 0.37 \text{ mg/L}$,浊度为 $12 \sim 27 \text{ NTU}$,菌落总数为 $360 \sim 980 \text{ CFU/mL}$;通过管道输水至SP水厂时,高锰酸盐指数为 $3.4 \sim 3.9 \text{ mg/L}$,氨氮为 $0.06 \sim 0.23 \text{ mg/L}$,浊度为 $14 \sim 33 \text{ NTU}$,菌落总数为 $450 \sim 6000 \text{ CFU/mL}$ 。在长距离输水过程中,高锰酸

盐指数和氨氮呈降低的趋势,而浊度和菌落总数呈升高的趋势。

进一步分析可知,高锰酸盐指数的去除率存在季节性的变化,夏季高、春秋季略低、冬季最低,去除率分别为7%、12.5%、6.5%及1%;氨氮的总体去除率在40%以上,存在季节性的变化,夏秋相对较高、冬春相对较低,去除率分别为41.7%、55.6%、46.0%及42.7%。由于在长距离输水管道中常年加氯(次氯酸钠,2.5 mg/L),因此两者降低可能是预处理作用及夏秋季节水温较高、微生物活动较频繁共同影响所致。这与高炜^[15]、侯宝芹等^[16]的研究一致。

在长距离输水过程中浊度和菌落总数有所增加,夏秋季节增长较大、冬春季节增长较小,其中浊度呈春夏秋季节升高、冬季趋于平稳的规律。我国大量使用铸铁管和镀锌钢管,主要成分均为铁,铁元素在管壁微生物环境下存在化学平衡,一旦平衡被打破,可以经氧化还原、沉淀等复杂反应在管壁形成管垢。管垢通过溶解、氧化还原、微生物作用以及水力冲刷等途径,将铁元素释放到管道中,使得浊度升高^[17]。菌落总数在JZ水库全年趋于平稳,低于1 000 CFU/mL,在输水过程中有所增加,夏秋季节增长最为显著,可能是夏秋季温度较高、细菌繁殖活动较为频繁所致。这与雒江茵^[18]的研究一致,在输水管道的前端有机物含量充足,温度等因素满足细菌生长代谢的要求,因此菌落总数增加。

浊度增长率、高锰酸盐指数去除率和氨氮去除率与菌落总数的增长率均有良好的相关性,其中浊度增长率和高锰酸盐指数去除率对菌落总数的增长率具有统计学意义($p < 0.05$),而氨氮去除率对菌落总数的增长率无统计学意义($p > 0.05$)。浊度增长率和高锰酸盐指数去除率与菌落总数增长率的线性拟合见图3,随着菌落总数的增加,高锰酸盐指数去除率也逐渐升高,主要是微生物的降解作用导致化学需氧量的下降;同时,由于微生物侵蚀输水管道,浊度也随之升高。研究发现,由于长距离输水管道微生物的降解作用,COD、TP浓度均下降^[19-20]。目前以铸铁和钢为主的铁质管材在给水管网中仍普遍存在,这类管材与水接触不可避免地会发生腐蚀现象,大多数输水管网都会在管壁表面形成铁腐蚀产物。腐蚀管垢的存在会限制输水能力,还会导致铁的溶出,使得浊度升高^[21-22]。

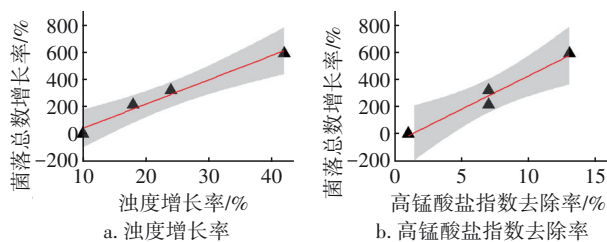


图3 浊度增长率和高锰酸盐指数去除率与菌落总数增长率的线性拟合

Fig.3 Linear fit of the growth rate of turbidity and the removal rate of permanganate index with the growth rate of the total number of bacteria

2.3 加炭、加氯的水质变化

在长距离输水管道中,原水预处理常采用加氯(次氯酸钠)和投加活性炭的方式,且加氯为主要预处理手段,间歇投加粉末活性炭。因此,选取投加活性炭前一天与后一天的数据,分析投加活性炭与加氯对原水的预处理效果。

图4为不同工况对水质指标的影响,可知加炭与加氯对原水的预处理效果接近,但在投加活性炭时菌落总数低于加氯时,可能是由于活性炭对细菌有明显的吸附作用,同时在输水过程中活性炭不断沉降在管道中。因此当原水中致病菌浓度较高时,可以考虑通过投加活性炭来提高原水的水质。赵艳等人^[14]构建长距离管道生物化学反应器模拟实际原水输送管道,研究了粉末活性炭对管道中污染物的强化去除作用,发现投加粉末活性炭对去除有机物具有一定效果,去除率随粉末活性炭投加量的增加而提高。苏喆等人^[23]针对水厂原水长距离输送的工艺特征,研究了黄河中下游地表水体单独投加粉末活性炭和二氧化氯以及同时投加两种水处理药剂的除嗅效果,发现两者单独使用对嗅味的去除率均在50%以上,但联合使用效果不佳,这是由于活性炭有可能被二氧化氯氧化,从而降低了对致嗅物质的去除率。

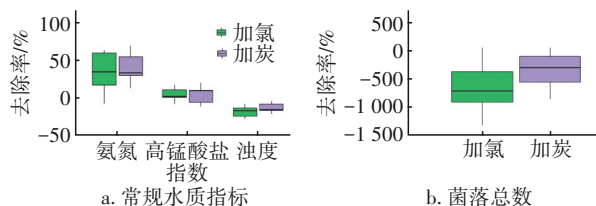


图4 不同工况对水质指标的影响

Fig.4 Influence of different working conditions on water quality indicators

3 结论

调研华东 JZ 水库至 SP 原水厂相距 40 km 的长距离输水管道,在输水过程中,氨氮和高锰酸盐指数有所降低,夏季去除率最高,分别为 55.6% 和 12.5%,主要是微生物降解与管道预处理共同作用所致。但是,菌落总数与浊度有所增加,这是由于长距离输水管道中有机物含量充足,温度等因素满足细菌生长代谢的要求。加氯、加炭两种预处理方法对水质的净化效果相当,但在投加活性炭时菌落总数低于加氯时。因此,当原水中致病菌浓度较高时,建议通过投加活性炭来提高原水的水质,保障供水安全。

参考文献:

- [1] 王圃,潘玉洁,席星林,等. 长距离重力流输水管道系统扩建优化研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 57-60.
WANG Pu, PAN Yujie, XI Xinglin, *et al.* Optimization of expansion of long-distance gravity-flow water conveyance pipeline system [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21): 57-60(in Chinese).
- [2] 罗宇丰. 长距离输水管道设计若干问题探讨[J]. 城市建筑, 2013 (20): 150, 156.
LUO Yufeng. Discuss several problems of long-distance water conveyance pipe design [J]. Urbanism and Architecture, 2013 (20): 150, 156(in Chinese).
- [3] LIU J, CHEN H, YAO L, *et al.* The spatial distribution of pollutants in pipe-scale of large-diameter pipelines in a drinking water distribution system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 317: 27-35.
- [4] LIU J, REN H, YE X, *et al.* Bacterial community radial-spatial distribution in biofilms along pipe wall in chlorinated drinking water distribution system of East China [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(2): 749-759.
- [5] XU H, LIN C, CHEN W, *et al.* Effects of pipe material on nitrogen transformation, microbial communities and functional genes in raw water transportation [J]. Water Research, 2018, 143: 188-197.
- [6] 朱永娟,杨艳玲,李星,等. 长距离输水管道微生物存在水平及水质变化规律[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 34-36.
ZHU Yongjuan, YANG Yanling, LI Xing, *et al.* Occurrence of microorganism and variation of water quality in long distance water delivery pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 34-36(in Chinese).
- [7] 刘慧娜,孙吉慧,沈加艳. 给水管网中管壁生物膜对水质二次污染的影响[J]. 环保科技, 2009, 15(4): 9-13.
LIU Huina, SUN Jihui, SHEN Jiayan. Influence of the recontamination resulted from the biomembrane in water distribution network [J]. Environmental Protection and Technology, 2009, 15(4): 9-13(in Chinese).
- [8] SKJEVRAK I, LUND V, ORMEROD K, *et al.* Biofilm in water pipelines; a potential source for off-flavours in the drinking water [J]. Water Science and Technology, 2004, 49(9): 211-217.
- [9] PLUCHON C, SERODES J B, BERTHIAUME C, *et al.* Haloacetic acid degradation by a biofilm in a simulated drinking water distribution system [J]. Water Science and Technology, 2013, 13(2): 447-461.
- [10] XIA Y, LIN Z, HE L, *et al.* The advanced nutrient removal efficiency and microbial community of a pipeline biofilm system for tailwater transportation [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 38: 101679.
- [11] SILVA F V D, YAMAGUCHI N U, LOVATO G A, *et al.* Effects of coconut granular activated carbon pretreatment on membrane filtration in a gravitational driven process to improve drinking water quality [J]. Environmental Technology, 2012, 33(6): 711-716.
- [12] LI Q, SUN H, LAI N, *et al.* Counter-emergency removing pollutants at high concentration of water source of drinking water by pre-chlorination technology [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(3): 99-103.
- [13] 赵乐乐,李星,杨艳玲,等. 预氯化对原水长距离输水管道硝化性能的破坏与恢复[J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1403-1407.
ZHAO Lele, LI Xing, YANG Yanling, *et al.* Destruction and restoration of nitrification performance in aqueduct by pre-chlorination [J]. CIESC Journal, 2013, 64(4): 1403-1407(in Chinese).
- [14] 赵艳,朱光灿,石晶晶,等. 粉末活性炭吸附强化长距离输水管道反应器净水效能实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 801-806.
ZHAO Yan, ZHU Guangcan, SHI Jingjing, *et al.* Experimental study on purification efficiency of powder activated carbon adsorption enhanced long-distance water delivery pipeline reactor [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(4):

- 801-806(in Chinese).
- [15] 高炜. 原水长距离输水管道对典型水质指标的影响[J]. 中国给水排水, 2013, 29(19): 62-65.
- GAO Wei. Effect of long-distance raw water pipeline on typical water quality indicators [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(19): 62-65(in Chinese).
- [16] 侯宝芹, 田原, 姚国英, 等. 不同预氧化剂净水效果及运行条件的优化[J]. 城镇供水, 2020 (3): 44-48, 39.
- HOU Baoqin, TIAN Yuan, YAO Guoying, *et al.* Optimization of water purification effects and operating conditions with different preoxidants [J]. City and Town Water Supply, 2020 (3): 44-48, 39(in Chinese).
- [17] GINIGE M P, WYLIE J, PLUMB J. Influence of biofilms on iron and manganese deposition in drinking water distribution systems [J]. Biofouling, 2011, 27 (2): 151-163.
- [18] 雒江菡. 大型原水输水管道水质模拟及生物膜净水功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- LUO Jianghan. Research of Water Characteristics Simulation and Function of Biofilm Purifying Water in Large-scale Raw Water Distribution System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [19] 赵乐乐, 李星, 杨艳玲, 等. 长距离原水输水管道管壁生物膜特征分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(12): 118-122.
- ZHAO Lele, LI Xing, YANG Yanling, *et al.* Characteristics of biofilms in long-distance raw water diversion pipes [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 118-122(in Chinese).
- [20] 赵乐乐, 李星, 杨艳玲, 等. 南洲水厂原水长距离输水管道水质变化规律研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30 (15): 70-72.
- ZHAO Lele, LI Xing, YANG Yanling, *et al.* Study on water quality in long-distance water delivery pipeline of Nanzhou Water Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(15): 70-72(in Chinese).
- [21] 雒江菡, 贾瑞宝, 于瑞洪, 等. 溶解氧对输水管道生物膜微生物群落结构及出水水质影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(8): 24-30.
- LUO Jianghan, JIA Ruibao, YU Ruihong, *et al.* Effect of dissolved oxygen concentration on pipeline biofilm microbial community structure and effluent water quality [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48 (8): 24-30(in Chinese).
- [22] 鲁智礼, 王刚亮, 石宝友, 等. 消毒剂和溶解氧对管网铁释放影响的中试研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(4): 1410-1416.
- LU Zhili, WANG Gangliang, SHI Baoyou, *et al.* Pilot study on effects of disinfectants and dissolved oxygen on iron release in distribution system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(4): 1410-1416 (in Chinese).
- [23] 苏喆, 李树林, 王琰, 等. 粉末活性炭和二氧化氯在长距离原水输送中除臭研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(3): 123-125.
- SU Zhe, LI Shulin, WANG Yan, *et al.* Removal odor in long distance raw water transmission pipeline by PAC and ClO_2 [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2011, 32(3): 123-125 (in Chinese).

作者简介: 张锋(1979-), 男, 上海人, 本科, 助理工程师, 研究方向为给排水工程水质监控。

E-mail: situans@126.com

收稿日期: 2021-10-02

修回日期: 2022-04-07

(编辑: 沈靖怡)