

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.008

强化集成工艺处理不同原水的生产适用性研究

赵宇^{1,2}, 魏振彦^{1,2}, 张怡然^{1,2}, 常华^{1,2}, 李建科^{1,2}

(1. 天津泰达水业有限公司, 天津 300457; 2. 天津泰达津联自来水有限公司, 天津 300457)

摘要: 以引滦原水、引江原水和引滦引江掺混原水为研究对象, 将天津某净水厂强化集成工艺近三年的实际生产运行数据, 特别是高温高藻期的数据进行对比分析。结果表明, 预氧化—上向流脉冲澄清—主加氯消毒的强化集成工艺可以适应原水水质的变化, 对引滦原水、引江原水和引滦引江掺混原水浊度、 COD_{Mn} 的去除率分别高达 94.90% 和 64% 以上, 出厂水浊度和 COD_{Mn} 最低分别达到 0.13 NTU 和 0.29 mg/L, 藻类均未检出, 三卤甲烷、卤乙酸、甲醛、溴酸盐等消毒副产物指标也远低于国标限值, 能够保证出厂水的水质安全达标。

关键词: 强化集成工艺; 生产适用性; 引江原水; 引滦原水; 引江引滦掺混原水

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0046-05

Applicability of Enhanced Integrated Process for Treating Different Raw Water

ZHAO Yu^{1,2}, WEI Zhen-yan^{1,2}, ZHANG Yi-ran^{1,2}, CHANG Hua^{1,2}, LI Jian-ke^{1,2}

(1. Tianjin TEDA Water Industry Co. Ltd., Tianjin 300457, China; 2. Tianjin TEDA Tsinlien Water Supply Co. Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: Actual operational data of an enhanced integrated process of a water plant treating different raw water from the Yangtze River, Luan River and their mixture in Tianjin in recent three years, especially the data of high temperature and high algae period, were compared and analyzed. The enhanced integrated process of pre-oxidation, pulse clarifying and chlorine disinfection could adapt to the change of raw water quality. The removal efficiencies of turbidity and COD_{Mn} in three raw waters were more than 94.90% and 64%, respectively. The lowest turbidity and COD_{Mn} in the effluent were 0.13 NTU and 0.29 mg/L, respectively, and algae were not detected. Disinfection by-products indexes such as THMs, HAAs, formaldehyde and bromate were all far below the maximum contaminant levels of national standard limits, indicating that the process can ensure the safety of the effluent water quality.

Key words: enhanced integrated process; applicability; raw water from Yangtze River; raw water from Luan River; mixed raw water from Yangtze River and Luan River

随着水源水污染的日益严重, 常规水处理工艺已不能满足日益严格的饮用水水质标准要求, 强化常规工艺、采用预处理技术和深度处理工艺等是今

后的主要发展方向^[1-2]。天津市某净水厂在常规工艺基础上形成了预氧化—上向流炭吸附脉冲澄清—紫外线联合氯消毒强化集成工艺, 且已经应用于该

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404002)

通信作者: 张怡然 E-mail: zyzrmw@163.com

水厂实际生产中^[3-5]。自南水北调中线工程通水后,该水厂的生产用原水由引滦原水逐渐向引江原水过渡。笔者分析了近三年该水厂的生产数据,特别对高温高藻期的生产数据进行横向对比分析,以验证该强化集成工艺对不同水质时期和原水(引江原水、引滦原水和引江引滦掺混原水)变化的适用性,以及应对不同水质的处理效果,可为实际生产运行积累宝贵经验。

1 生产工艺及参数

1.1 净水厂生产工艺及取样点

净水厂三期工程产水能力为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在水厂常规工艺基础上,新增加臭氧预氧化、粉末活性炭投加系统和紫外线联合氯消毒技术,针对以往滦河高藻原水,以预臭氧为主工艺,预氯化为辅助工艺,以强化对藻类的去除;针对引滦原水有机污染,以粉末活性炭吸附为主,强化对有机物的去除;以投加聚丙烯酰胺(PAM)和聚二甲基二烯丙基氯化铵(HCA)助凝剂、调节原水 pH 值作为强化常规处理方法,用于强化混凝效果;以紫外联合氯作为安全消毒手段,用于灭活“两虫”并减少氯化消毒副产物含量。实际生产中,可根据原水水质情况选择适当的预氧化、药剂投加及消毒方式,在保证出厂水水质的前提下节能降耗。结合工艺特点和研究需要,本试

验共设置 4 个取样点,分别设置在取水泵房、上向流炭吸附脉冲澄清池出水口、V 型滤池出水口和配水泵房,并依次命名为生产用原水、滤前水、滤后水和出厂水。工艺流程和取样点位置见图 1。

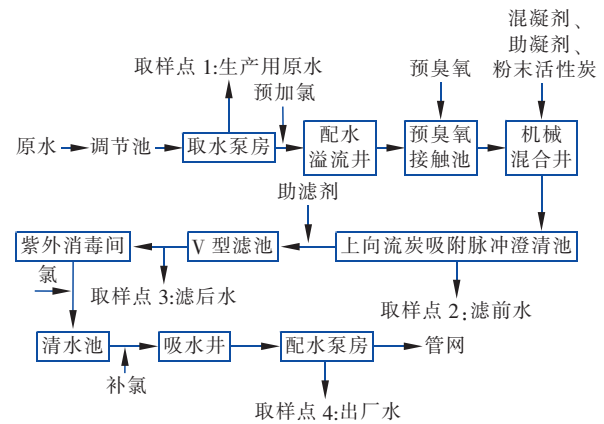


图1 工艺流程和取样点示意

Fig.1 Schematic diagram of treatment process and sampling points

1.2 工艺参数

2017 年—2019 年高温高藻期,生产用原水由引滦原水逐渐向引江原水过渡,结合原水水质情况,采用原水—预臭氧化/预氯化—三氯化铁 + 聚合氯化铝联合混凝—上向流脉冲澄清—V 型滤池—主加氯消毒工艺进行生产。具体工艺参数见表 1。

表 1 2017 年—2019 年高温高藻期净水厂生产工艺参数

Tab.1 Parameters of water treatment plant in high temperature and high algae period from 2017 to 2019

阶段	日期	原水类型	预氧化剂种类和投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	聚合氯化铝/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	三氯化铁/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	2017 年 6 月 1 日—8 日	掺混水	臭氧/1.2	25	20
2	2017 年 6 月 9 日—26 日	掺混水	臭氧/1.2	22	18
3	2017 年 6 月 27 日—7 月 7 日	掺混水	臭氧/1.2	25	20
4	2017 年 7 月 8 日—8 月 14 日	掺混水	臭氧/1.5	25	20
5	2017 年 8 月 15 日—22 日	掺混水	臭氧/1.8	25	20
6	2017 年 8 月 23 日—31 日	掺混水	臭氧/1.0	25	20
7	2017 年 9 月 1 日—30 日	掺混水	臭氧/1.2	20	15
8	2018 年 6 月 1 日—6 日	掺混水	臭氧/1.0	20	15
9	2018 年 6 月 7 日—26 日	掺混水	次氯酸钠(以有效氯计)/2.0	20	15
10	2018 年 6 月 27 日—7 月 18 日	掺混水	臭氧/1.2	20	15
11	2018 年 7 月 19 日—31 日	掺混水	次氯酸钠/2.0	20	15
12	2018 年 8 月 1 日—7 日	掺混水	次氯酸钠/1.0	20	15
13	2018 年 8 月 8 日—31 日	掺混水	次氯酸钠/0.8	20	15
14	2018 年 9 月 1 日—30 日	掺混水	次氯酸钠/0.6	20	15
15	2019 年 6 月 1 日—30 日	引江水	臭氧/1.0	20	15
16	2019 年 7 月 1 日—31 日	引江水	臭氧/1.0	20	15
17	2019 年 8 月 1 日—31 日	引江水	臭氧/1.0	20	15
18	2019 年 9 月 1 日—30 日	引江水	臭氧 1.0	20	15

1.3 检测项目及分析方法

浊度采用浊度仪测定;pH值采用pH计测定;COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾滴定法(GB/T 5750.7—2006)测定;藻类数量采用平板计数法测定;叶绿素a采用分光光度法测定;三卤甲烷采用顶空气相色谱法测定;卤乙酸采用气相色谱法测定;甲醛采用乙酰丙酮光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 原水情况

2017年—2019年,该净水厂生产用原水由引滦水逐渐向引江水过渡,高温高藻期(6月—9月)原水情况见表2。可知,三年间,随着引江原水占比的提高,浊度、COD_{Mn}、藻类数量均逐渐降低,生产用原水水质逐渐变好。

表2 原水水质

Tab.2 Raw water quality

项 目		2017年	2018年	2019年
		引滦引江 掺混水(引 滦水居多)	引江引滦 掺混原水(引 江水居多)	引江水
pH值	范围	7.7~8.5	7.9~8.9	7.7~8.3
	均值	8.1	8.3	8.0
温度/℃	范围	22.1~31.0	21.3~32.4	22.8~30.7
	均值	26.9	27.1	26.4
浊度/NTU	范围	2.6~29.3	1.0~22.3	0.9~17.1
	均值	9.0	5.0	5.2
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	范围	1.6~3.8	1.5~3.9	1.2~2.7
	均值	2.5	2.4	1.9
藻类/(10 ⁴ 个·L ⁻¹)	范围	2 851~ 8 656	1 776~7 745	475~4 190
	均值	6 215	4 014	1 923
叶绿素a/(μg·L ⁻¹)	范围	3.6~25	2.3~17.7	0.7~12.7
	均值	14.0	7.1	4.2

2.2 浊度的去除效果

图2为2017年—2019年高温高藻期浊度的变化。可知,2017年,各阶段出厂水浊度均在0.3 NTU以下,平均为0.17 NTU,平均去除率为97.97%。2018年,各阶段出厂水浊度均在0.25 NTU以下,平均为0.20 NTU,平均去除率为94.90%。2019年,各阶段出厂水浊度均在0.20 NTU以下,平均为0.16 NTU,平均去除率高达98.46%。与2017年同期相比,2018年高温高藻期出厂水浊度的去除率略有下降。这是因为2018年高温高藻期原水水质略优于2017年同期,净水厂尝

试采用预加氯工艺进行预氧化。与2017年和2018年同期相比,2019年高温高藻期出厂水浊度有了较大幅度下降,去除率也为三年同期最高。这是因为2019年高温高藻期原水水质优于2017年和2018年同期,净水厂仍采用了预臭氧化的处理方式,但是适当降低了臭氧和混凝剂的投加量。

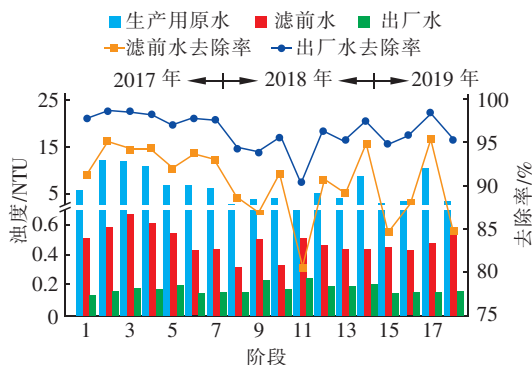


图2 2017年—2019年高温高藻期浊度的变化

Fig.2 Change of turbidity in high temperature and high algae period from 2017 to 2019

2.3 COD_{Mn}的去除效果

图3为2017年—2019年高温高藻期COD_{Mn}的变化。可知,2017年,出厂水COD_{Mn}均在1 mg/L以下,平均为0.57 mg/L,平均去除率为77.82%。2018年,出厂水COD_{Mn}均在1.5 mg/L以下,平均为0.83 mg/L,平均去除率为64.07%。2019年,出厂水COD_{Mn}均在1 mg/L以下,平均为0.46 mg/L,平均去除率为75.71%。

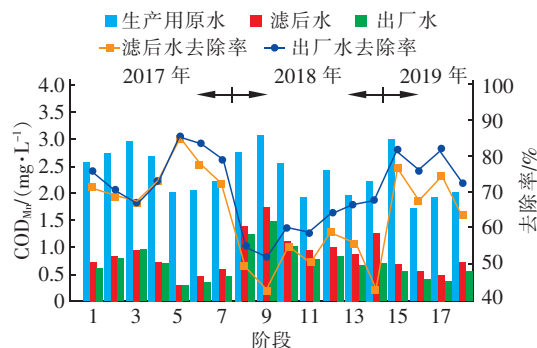


图3 2017年—2019年高温高藻期COD_{Mn}的变化

Fig.3 Change of COD_{Mn} in high temperature and high algae period from 2017 to 2019

与2017年同期相比,2018年的COD_{Mn}去除率略有下降,与浊度的变化规律相似。这是因为2018年高温高藻期原水水质略优于2017年同期,净水厂

尝试采用预加氯工艺进行预氧化。之前的研究表明,预加氯比预臭氧化对浊度和 COD_{Mn} 的去除效果略差,但出水水质仍能满足国家标准要求^[6]。考虑到预加氯的成本比预臭氧低^[7],在确保出水水质达标的前提下,即使在高温高藻期,生产用原水为引江原水或引江水比例较高的掺混原水时,仍可考虑采用预加氯作为预氧化方式。

与2017年和2018年同期相比,2019年出厂水 COD_{Mn} 有了较大幅度下降,去除率也为三年同期最高。这是因为2019年高温高藻期原水水质优于2017年和2018年同期,净水厂仍采用了预臭氧化的处理方式,但是适当降低了臭氧和混凝剂的投加量。结合对浊度去除效果的分析,并根据之前的研究,考虑到预加氯的成本比预臭氧低,在确保出水水质达标的前提下,即使在高温高藻期,生产用原水为引江原水时,可以考虑采用预加氯作为预氧化方式。

2.4 藻类的去除效果和消毒副产物生成情况

2017年高温高藻期,生产用原水为引江掺混原水。经测定,藻类数量为 $(2\,851 \sim 8\,656) \times 10^4$ 个/L,平均为 $6\,215 \times 10^4$ 个/L,采用预臭氧工艺处理以后,出厂水中未检出藻类。2018年高温高藻期,生产用原水为引江水居多的引江引滦掺混原水,藻类数量为 $(1\,766 \sim 7\,745) \times 10^4$ 个/L,平均为 $4\,014 \times 10^4$ 个/L,略优于2017年同期。采用预加氯工艺处理后,出厂水藻类为未检出。2019年高温高藻期,生产用原水为引江水,藻类数量为 $(475 \sim 4\,190) \times 10^4$ 个/L,平均为 $1\,923 \times 10^4$ 个/L,为三年内最低。采用预臭氧化工艺处理后,在出厂水中未检出藻类。该水厂高温高藻期两种预氧化工艺对藻类去除效果的研究表明,在预氧化处理单元,经预臭氧化后对藻类的去除率高达42.5%,而预氯化对藻类的去除效果较预臭氧化低,平均去除率仅为31%^[8]。有报道,臭氧能够显著抑制藻类的生长和运动活性,能够破坏并溶裂藻细胞,氧化藻细胞内的叶绿素,提高可沉降性,使其易于被后续处理工艺去除^[9-10]。

另外,检测出厂水中三卤甲烷、二氯乙酸、三氯乙酸等氯消毒副产物和甲醛、溴酸盐等臭氧消毒副产物。结果表明,2017年—2019年高温高藻期,二氯乙酸、三氯乙酸的浓度在检出限以下(检出限分别为 $20\,\mu\text{g/L}$ 和 $60\,\mu\text{g/L}$),甲醛 $<0.05\,\text{mg/L}$,溴酸盐 $<0.005\,\text{mg/L}$,远低于国标限值。2017年高温高藻期,全程采用预臭氧化工艺,三卤甲烷在0.15~

0.20之间;2018年,采用预臭氧化工艺时三卤甲烷在0.15~0.20之间,采用预加氯工艺时,该值略有升高,在0.20~0.30之间,但也远低于国标限值;2019年生产用原水为引江水,水质为三年内最优,采用预臭氧化工艺后,出厂水中三卤甲烷也为三年内最小,在0.10~0.15之间。由此可见,2017年—2019年高温高藻期,出厂水三卤甲烷亦远低于国标限值,能够保证出厂水水质安全达标。

3 结论

将预氧化—上向流脉冲澄清—主加氯消毒的强化集成优化技术应用于生产中,对于不同水质和原水(引江原水、引滦原水和引江引滦掺混原水)的变化适用性较好,确保了净水厂的优质供水,且能够保证出厂水水质安全达标,达到了优化工艺、指导生产的预期效果,实现了安全运行、提高水质的目标。

参考文献:

- [1] MOSTEO R, MIGUEL N, MUNIESA S M, *et al.* Evaluation of trihalomethane formation potential in function of oxidation processes used during the drinking water production process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2/3): 661–666.
- [2] CHEN W, LIU Z G, TAO H, *et al.* Factors affecting the formation of nitrogenous disinfection by-products during chlorination of aspartic acid in drinking water [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 519–524.
- [3] 方自毅, 张怡然, 马文红, 等. 南水北调引江原水强化集成工艺中试研究 [J]. *给水排水*, 2017, 43(5): 13–16.
FANG Ziyi, ZHANG Yiran, MA Wenhong, *et al.* Pilot study on enhanced integration process of Yangtze River raw water from South to North Water Transfer Project [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(5): 13–16 (in Chinese).
- [4] 方自毅, 张怡然, 马文红, 等. 不同消毒方式对引江原水中试处理效果的对比研究 [J]. *天津科技*, 2017, 44(7): 100–103.
FANG Ziyi, ZHANG Yiran, MA Wenhong, *et al.* A pilot-scale study on the effects of different disinfection methods of Yangtze River raw water [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2017, 44(7): 100–103 (in Chinese).
- [5] 方自毅, 张怡然, 马文红, 等. 不同工艺处理引江引滦掺混水的中试对比研究 [J]. *供水技术*, 2017, 11(3):

- 19-22,30.
- FANG Ziyi, ZHANG Yiran, MA Wenhong, *et al.* A pilot-scale comparative study on different processes of mixed raw water from Yangtze River and Luan River [J]. *Water Technology*, 2017, 11 (3): 19-22, 30 (in Chinese).
- [6] 方自毅, 张怡然, 何凤华, 等. 南水北调引江原水不同预氧化方式中试对比研究[J]. *供水技术*, 2018, 12 (3): 32-35.
- FANG Ziyi, ZHANG Yiran, HE Fenghua, *et al.* Comparison on different preoxidation processes of the Yangtze River raw water from South-to-North Water Diversion Project [J]. *Water Technology*, 2018, 12 (3): 32-35 (in Chinese).
- [7] 张怡然, 方自毅, 马文红, 等. 低温低浊期原水预氧化和消毒副产物控制优化研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33 (11): 44-48.
- ZHANG Yiran, FANG Ziyi, MA Wenhong, *et al.* Optimization of preoxidation and DBPs control of low temperature and low turbidity raw water [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (11): 44-48 (in Chinese).
- [8] 岳尚超. 预臭氧化工艺对微污染原水消毒副产物影响的试验研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
- YUE Shangchao. Effects of Pre-ozonation on Disinfection By-products for Micro-polluted Raw Water [D]. Tianjin: Nankai University, 2012 (in Chinese).
- [9] CHU W H, GAO N Y, DENG Y, *et al.* Impacts of drinking water pretreatments on the formation of nitrogenous disinfection by-products [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (24): 11161-11166.
- [10] JIA A Y, WU C D, DUAN Y. Precursors and factors affecting formation of haloacetonitriles and chloropicrin during chlor(am)ination of nitrogenous organic compounds in drinking water [J]. *Journal of Hazardous Material*, 2016, 308: 411-418.
-
- 作者简介:** 赵宇 (1987-), 男, 天津人, 大学本科, 工程师, 主要研究方向为饮用水处理技术。
E-mail: jsc3821@163.com
收稿日期: 2021-01-27
修回日期: 2021-04-01

(编辑: 任莹莹)

(上接第45页)

- (20): 100-103.
- XUE Shilong, ZHOU Mi, ZHANG Liangchun. Application of horizontal tube sedimentation technology in waterworks expansion project with low temperature, low turbidity or high turbidity raw water [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (20): 100-103 (in Chinese).
- [8] 中国工程建设标准化协会. 水平管沉淀池工程技术规程: CECS 338 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Horizontal-tube Sedimentation Tank Engineering: CECS 338 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014 (in Chinese).
- [9] 张良纯, 彭艳波. 沉淀池自动冲洗装置的研发与应用分析[J]. *中国给水排水*, 2017, 33 (20): 25-27.
- ZHANG Liangchun, PENG Yanbo. Development and application of automation washing device in sedimentation tank [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (20): 25-27 (in Chinese).
- [10] 方素梅, 张建国, 周密. 水平管沉淀综合技术在嘉陵江原水处理中的应用[J]. *中国给水排水*, 2016, 32 (8): 106-109.
- FANG Sumei, ZHANG Jianguo, ZHOU Mi. Application of horizontal tube sedimentation technology to Jialing River raw water treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32 (8): 106-109 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 宋学峰 (1967-), 男, 黑龙江大庆人, 博士研究生, 教授级高工, 主要研究方向为水处理技术。
E-mail: songxf@cnpc.com.cn
收稿日期: 2020-12-30
修回日期: 2021-04-02

(编辑: 任莹莹)