

技术总结

武汉市自来水厂典型工艺设计及运行效能对比

李柏林¹, 杨莹¹, 王俊^{1,2,3}, 杨威¹, 夏天明^{2,3}, 李晔¹

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉临空港经济技术开发区
服务业发展投资集团有限公司, 湖北 武汉 430040; 3. 武汉市东西湖自来水公司, 湖北
武汉 430040)

摘要: 武汉市余氏墩水厂和走马岭水厂都属于武汉市东西湖自来水公司, 但两水厂制水工艺有不同之处。通过分析两水厂1年的出厂水浊度、氨氮、COD_{Mn}及去除率, 对比了两水厂运行能耗、原水水质及工艺区别, 分析了不同原水水质及制水工艺对出厂水水质的影响。结果表明, 原水水质对工艺处理效果有较大影响。余氏墩水厂出厂水浊度为0.18 NTU, 去除率为99.07%; 氨氮浓度<0.03 mg/L, 去除率为76.54%; COD_{Mn}为1.90 mg/L, 去除率为31.88%。走马岭水厂出厂水浊度为0.16 NTU, 去除率为98.41%; 氨氮浓度<0.02 mg/L, 去除率为74.71%; COD_{Mn}为1.64 mg/L, 去除率为32.80%。由于走马岭水厂自动化程度更高, 其运行能耗较低。余氏墩水厂和走马岭水厂耗药量年平均值分别为26.38、9.74 kg/10³ m³, 耗电量年平均值分别为3.25、2.69 kg/10³ m³。

关键词: 自来水厂; 制水工艺; 浊度; 氨氮; COD_{Mn}; 运行能耗

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0035-06

Comparison of Typical Process Design and Operation Efficiency of Waterworks in Wuhan City

LI Bo-lin¹, YANG Ying¹, WANG Jun^{1,2,3}, YANG Wei¹, XIA Tian-ming^{2,3}, LI Ye¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Linkong Port Economic and Technological Development Zone Service Industry Development Investment Group Co. Ltd., Wuhan 430040, China; 3. Wuhan Dongxihu Water Supply Company, Wuhan 430040, China)

Abstract: Wuhan Yushidun Waterworks and Zoumaling Waterworks belong to Wuhan Dongxihu Water Supply Company. The water treatment processes of the two waterworks are different. Through the analyses of turbidity, ammonia nitrogen, and COD_{Mn} of the finished water and their removal rates of the two waterworks for one year, the operation energy consumption, the raw water quality, and the water treatment process of the two waterworks were compared, and the influence of raw water quality and water treatment process on the finished water quality was studied. The results showed that the raw water quality had large impact on the treatment efficiency. The finished water quality of Yushidun Waterworks were as follows: turbidity was 0.18 NTU, removal rate was 99.07%; ammonia nitrogen was less than 0.03 mg/

基金项目: 武汉市应用基础前沿项目(2018060401011313); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018IVB057)

L, removal rate was 76.54%; COD_{Mn} was 1.90 mg/L, removal rate was 31.88%. The finished water quality of Zoumaling Waterworks were as follows: turbidity was 0.16 NTU, removal rate was 98.41%; ammonia nitrogen was less than 0.02 mg/L, removal rate was 74.71%; COD_{Mn} was 1.64 mg/L, removal rate was 32.80%. Zoumaling Waterworks showed lower operation energy consumption due to higher level of automation. The annual average dosage of alum at Yushidun Waterworks and Zoumaling Waterworks were $26.38 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$ and $9.74 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$, respectively; the annual average dosage of chlorine was $3.25 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$ and $2.69 \text{ kg}/10^3 \text{ m}^3$, respectively.

Key words: waterworks; water treatment process; turbidity; ammonia nitrogen; COD_{Mn} ; operation energy consumption

我国城镇供水系统在 20 世纪 80 年代后期和 90 年代前期得到快速发展,后因水源普遍污染和优良水资源逐渐减少、水环境保护缺乏、水厂技术水平以及输配水设施配套改造建设滞后,供水水质、运行能耗及安全等问题逐步显现^[1]。现如今不论是国家标准还是实际水源情况,都给城市净水厂的传统工艺提出了新要求,急需对现有常规处理工艺进行升级改造。

从既有建成投产的净水厂切入,通过面上调研,了解我国低浊度水源概况及处理工艺基本现状,再实地深入研究水厂的原水水质、处理工艺、各工艺单元运行现状、药耗能耗及生产中存在的问题等具有重要意义^[2]。笔者通过对比武汉市东西湖区两个不同水厂的工艺及运行现状,发现新老工艺存在的问题,总结不同水厂各自工艺优势及运行经验,有助于找到适合不同原水水质的更高效的工艺组合,提高处理效率。

1 工程概况

武汉市东西湖自来水公司现有余氏墩、走马岭和西湖 3 座水厂。其中,余氏墩水厂现有工艺建成于 1997 年,目前供水能力为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要为东西湖吴家山新老城区近 20 万人提供生活用水。走马岭水厂建成于 2009 年,目前供水能力为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,供水范围包括走新路以东的全区环状供水管线。两水厂均从汉江取水,出水水质均执行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

1.1 余氏墩水厂工艺流程

余氏墩水厂采用由穿孔反应池、斜管沉淀池和双阀快滤池等组成的制水工艺系统,见图 1。目前自动化程度偏低,主要依靠班组人员进行现场操作及管理。处理单元的设计特点如下:①穿孔反应池利用沿池壁一侧对角交错布置的过水孔洞,水流通

过过水孔洞时会在竖井内沿池壁形成旋流造成一定的速度梯度;沿水流流向,过水孔洞的尺寸依次增大。②由于余氏墩水厂的面积较小,为节省用地,采用斜管沉淀池,提高了沉淀池的处理能力、缩短了沉淀时间、增加了沉淀池的沉淀面积,从而提高了处理效率。③为减少阀门,采用双阀快滤池,用虹吸管代替进水和排水阀。

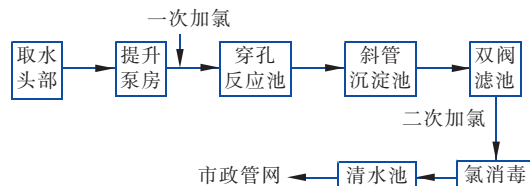


图 1 余氏墩水厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of Yushidun Waterworks

1.2 走马岭水厂工艺流程

走马岭水厂的处理单元由折板絮凝池、平流沉淀池和 V 型滤池等构成,如图 2 所示。主要处理单元的设计特点如下:①折板絮凝池是在池中加入一些交替反向的折板组合作为扰流单元,以提高絮凝效果。②平流式沉淀池进口采用淹没进水孔,出口采用溢流堰,以保证沉淀后的澄清水可沿池宽均匀流入出水渠。③V 型滤池的滤料层填充均质石英砂,采用气水联合反冲洗方式。

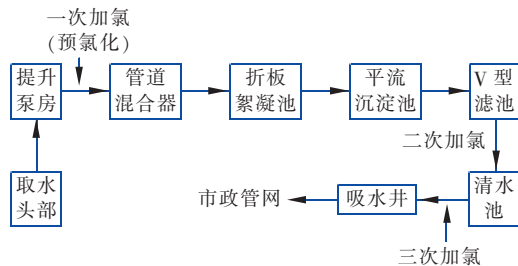


图 2 走马岭水厂工艺流程

Fig. 2 Flow chart of Zoumaling Waterworks

1.3 两水厂工艺对比

将两水厂工艺分成预处理、混凝、沉淀、过滤、消毒等功能单元。主要设计参数如表 1 所示。

表 1 两水厂的主要工艺参数对比

Tab. 1 Comparison of main process parameters of two waterworks

项 目	处理单元	构筑物	主要设计参数
余氏墩水厂	混凝/沉淀	穿孔反应池	共分 3 组,每组平面尺寸为 19.15 m×31.10 m,进水水位为 30.1 m;有效水深为 4.95 m,反应沉淀时间为 15 min;斜管倾角为 60°,边距为 30 mm
		斜管沉淀池	
走马岭水厂	过滤	双阀快滤池	总平面尺寸为 23.74 m×31.10 m,共分 3 组,每组分 8 格,每格有效过滤面积为 35 m ² ,池内水位为 29.4 m,内水头为 2.5 m;每日冲洗时间为 48 min
	混凝/沉淀	折板絮凝池	每座折板絮凝池平面尺寸为 18.08 m×19.90 m,池深为 3.60 m,有效水深为 3.30 m,反应时间为 26.8 min,折板第 1 段流速为 0.33 m/s、第 2 段流速为 0.21 m/s、第 3 段流速为 0.11 m/s
		平流沉淀池	每座平流沉淀池平面尺寸为 76.32 m×19.90 m,池深为 3.30 m,有效水深为 3.00 m,沉淀时间为 1.91 h,水平流速为 10.81 mm/s;池内设 2 道导流墙
	过滤	V 型滤池	单元面积为 99.8 m ² ,分为 2 格,每格宽度为 3.55 m、长度为 14.05 m;气冲洗 3 min,气水联合冲洗 3 min,水冲洗 4 min

两水厂均采用液氯预氧化技术及氯消毒方式。使用液氯预氧化,可以氧化掉一部分可能影响絮凝沉淀的有机物,为后续混凝创造条件,同时可以对原水进行初步消毒。

在滤池后投加液氯,为满足氯在管网及末梢水中的含量,抑制细菌的滋生,按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的规定,经氯消毒后出厂水的游离氯浓度为 0.3~4 mg/L,需进行 3 次加氯。

两水厂均选用新型高效的聚合氯化铝铁(PAFC)作为混凝剂,集铝盐和铁盐各自优点,对铝离子和铁离子的形态都有明显改善,聚合程度大幅提高;对高浊水和低温低浊水的净化效果特别明显,可不加助凝剂。

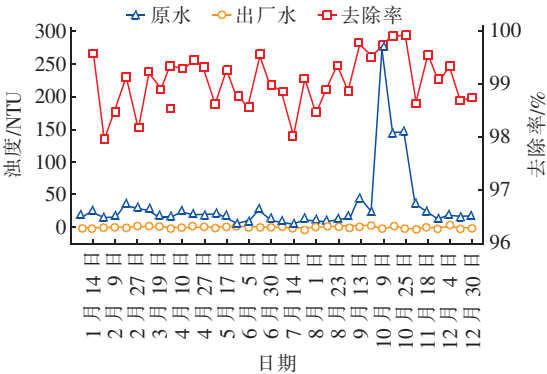
2 运行效能对比分析

浊度是反映天然水和饮用水物理性状的一项重要指标;微污染水的有机污染物一部分来源于生活性有机污染,其主要指标为高锰酸盐指数(COD_{Mn})和氨氮^[3]。这 3 个主要指标对于评价水厂出厂水水质有着重要意义。分别在 2017 年同一天采集两个水厂的原水和出厂水,每个月采样 3 次进行浊度、氨氮和 COD_{Mn}等指标的测定,对污染指标的去除率及水厂运行能耗进行分析。

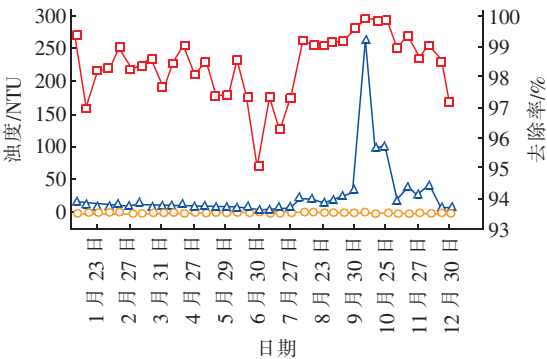
2.1 对浊度的去除效果

余氏墩水厂和走马岭水厂对浊度的去除效果如图 3 所示。可以看出,两个水厂在 2017 年 10 月初原水浊度都有明显上升,最高值出现在 10 月 9 日,余氏墩水厂为 275 NTU、走马岭水厂为 260 NTU。原水浊度骤增的主要原因是:在 10 月初,武汉连日

降雨,雨水冲刷使上游的污染物随着雨水径流一并进入水体,致使这一段时间原水浊度陡增。



a. 2017 年采样期间余氏墩水厂浊度变化



b. 2017 年采样期间走马岭水厂浊度变化

图 3 2017 年采样期间两水厂的浊度变化

Fig. 3 Change of turbidity in two waterworks during the sampling period in 2017

余氏墩水厂原水浊度年平均值为 32.5 NTU, 出厂水浊度年平均值为 0.18 NTU, 年平均去除率为 99.07%; 走马岭水厂原水浊度年平均值为 24.4

NTU, 出厂水浊度年平均值为 0.16 NTU, 年平均去除率为 98.41%。两水厂对浊度的去除效果都较好, 出厂水浊度均低于 0.3 NTU, 远低于国家标准限值(1.0 NTU)。

两水厂制水工艺对浊度的去除率都较为稳定, 集中在 98%~99%。走马岭水厂原水水质较好, 其浊度低于余氏墩水厂原水, 而最终出厂水浊度相差不大, 可见其处理效果不及余氏墩水厂。

2.2 对氨氮的去除效果

对两个水厂原水及出厂水的氨氮浓度变化进行分析, 如图 4 所示。

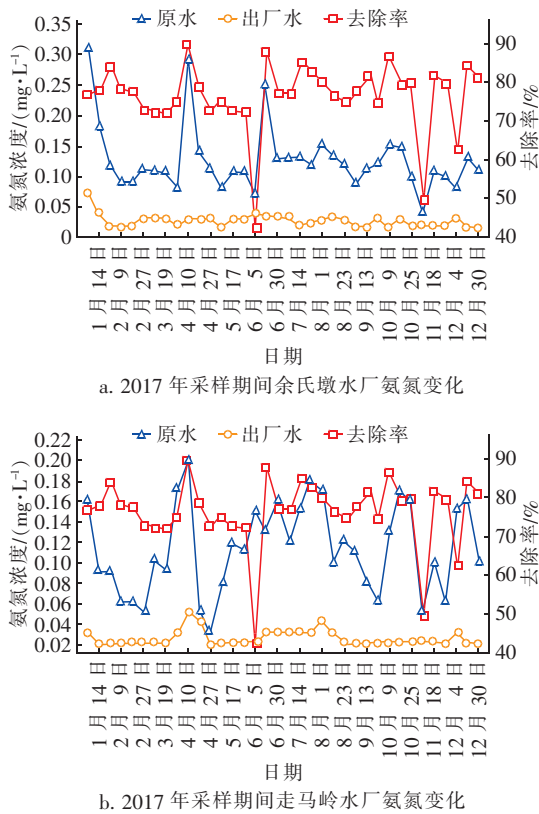


图 4 2017 年采样期间两水厂氨氮变化

Fig.4 Changes of ammonia nitrogen in two waterworks during the sampling period in 2017

由图 4 可知, 余氏墩水厂 2017 年原水氨氮浓度最高为 0.31 mg/L、最低为 0.04 mg/L、年平均值为 0.13 mg/L, 出厂水氨氮浓度最高为 0.07 mg/L、最低值低于《生活饮用水标准检验方法 无机非金属指标》(GB/T 5750.5—2006) 中的最低检出限 0.02 mg/L、年平均值 < 0.03 mg/L, 最高去除率可达到 89.66%、最低去除率为 42.86%、年平均去除率为 76.54%; 走马岭水厂 2017 年原水氨氮浓度最高为

0.20 mg/L、最低为 0.03 mg/L、年平均值为 0.11 mg/L, 出厂水氨氮浓度最高为 0.05 mg/L、最低值 < 0.02 mg/L、年平均值 < 0.02 mg/L, 最高去除率达到 88.24%、最低去除率为 20.00%、年平均去除率为 74.71%。

两水厂出厂水氨氮浓度基本稳定, 说明水厂工艺在应对不同原水水质时有着较好的适应性, 不会出现较大波动。水中氨氮浓度并非固定不变, 而是可在多种氮的存在形式间互相转化。在特定条件下, 如氧化和微生物活动, 有机氮可能会转化为氨氮^[4]。就全年来看, 在水温较高的夏季原水氨氮浓度整体偏高于冬季, 原因是: 在一定温度范围内, 水温越高, 越能促进细菌等微生物的繁殖, 氨氮浓度随水温升高而升高; 其次, 夏季降雨量大于冬季, 降雨量也会影响水中氨氮浓度。

2.3 对 COD_{Mn} 的去除效果

两水厂原水及出厂水 COD_{Mn} 浓度变化见图 5。

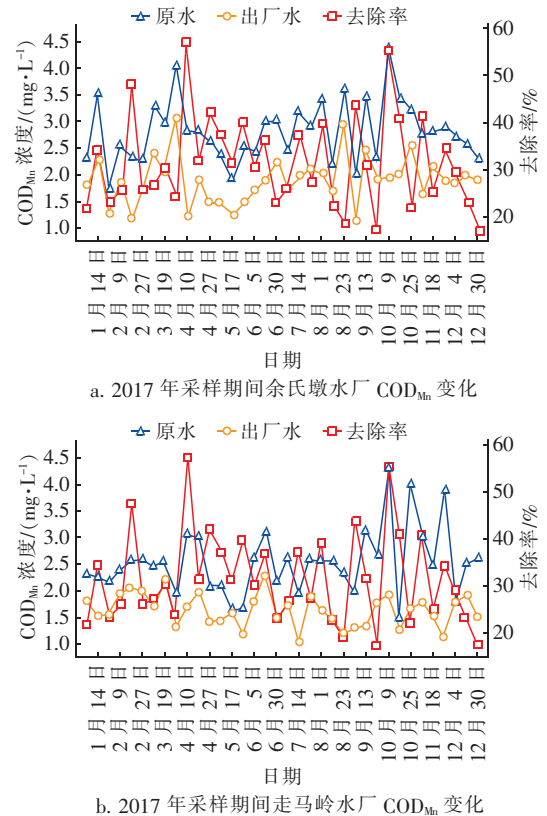


图 5 2017 年采样期间两水厂 COD_{Mn} 变化

Fig.5 Changes of COD_{Mn} in two waterworks during the sampling period in 2017

由图 5 可知, 2017 年余氏墩水厂原水 COD_{Mn} 最大值为 4.39 mg/L、最小值为 1.70 mg/L、年平均值为

为 2.80 mg/L,出厂水 COD_{Mn}最大值为 3.10 mg/L、最小值为 1.12 mg/L、年平均值为 1.90 mg/L,最高去除率为 57.14%、最低去除率为 17.39%、年平均去除率为 31.88%。

同期走马岭水厂原水 COD_{Mn}最大值为 4.31 mg/L、最小值为 1.48 mg/L、年平均值为 2.53 mg/L,出厂水 COD_{Mn}最大值为 2.30 mg/L、最小值为 1.05 mg/L、年平均值为 1.64 mg/L,最高去除率为 70.88%、最低去除率为 0.56%、年平均去除率为 32.80%。

对于两个水厂,夏季(6月—8月)原水中的 COD_{Mn}含量高于其他季节,主要与雨水径流量有关系。夏季降雨量大,雨水径流冲刷将大量有机物带至中下游水体,使得 COD_{Mn}浓度升高;在其他季节时,雨水量较小,所以进入原水中的有机物也相对较

少。此外,原水中 COD_{Mn}浓度较高时,COD_{Mn}去除率也相应有所提高。同时结合在水厂取样时的水温,由于 COD_{Mn}的去除主要依靠混凝和沉淀,水温较高时形成的矾花质量好,混凝效果好,则 COD_{Mn}去除效果更好;而水温低时,混凝效果会相对变差,COD_{Mn}去除效果就会变差,去除率相应降低^[5]。

相比较而言,走马岭水厂采用的新工艺对 COD_{Mn}的去除效果更好,这主要是因为平流沉淀池的水力停留时间较斜管沉淀池更长,对冲击负荷和温度变化的适应能力较强,更有利于水体中有机物的氧化去除。

2.4 运行能耗分析

将 2017 年余氏墩水厂和走马岭水厂日常运行情况结合原水水质进行分析,重点比较了两水厂的单位耗电量、耗氯量和耗矾量,如表 2 所示。

表 2 两水厂 2017 年能耗比较

Tab.2 Comparison of energy consumption of two waterworks in 2017

项 目		原水 pH 值	原水浊度/NTU	原水氨氮/(mg·L ⁻¹)	原水 COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	单位耗电量/(kW·h·10 ³ m ⁻³)	单位耗氯量/(kg·10 ³ m ⁻³)	单位耗矾量/(kg·10 ³ m ⁻³)	平均供水量/(m ³ ·d ⁻¹)
余氏墩水厂	最大值	8.00	257.00	0.33	4.39	248.74	3.96	38.56	142 146.00
	最小值	7.81	8.00	0.04	1.71	200.10	2.48	18.99	108 425.00
	平均值	7.99	32.73	0.13	2.77	238.90	3.25	26.38	126 871.92
走马岭水厂	最大值	8.20	260.00	0.23	5.72	264.48	3.34	15.76	106 809.00
	最小值	7.45	2.00	0.03	1.64	212.64	1.98	7.11	51 846.00
	平均值	7.91	21.51	0.11	2.59	235.46	2.69	9.74	80 594.08

由表 2 可知,两水厂单位耗电量差距不大,走马岭水厂平均耗电量相对更低一些。余氏墩水厂原水 pH 值和有机物含量平均值高于走马岭水厂,pH 值越高,为达到同等杀菌消毒目的,需氯量就越大;原水有机物含量越高,需氯量同样越高,所以其耗氯量高于走马岭水厂同期值。与同年其他时间相比,8 月—10 月原水浊度较高,日平均耗矾量增大,耗矾总费用提高。但是走马岭水厂单位耗矾量低于余氏墩水厂,其主要原因有:①余氏墩水厂原水浊度平均值高于走马岭水厂,原水水质相对较差,所以要投加更多的絮凝剂以达到较好的絮凝效果;②走马岭水厂采用折板絮凝池和平流沉淀池。折板絮凝池形成水流曲折的水道达到紊流状态,使能量得到充分利用,能耗与药耗有所降低,停留时间缩短;而平流沉淀池对前期絮凝要求不需要很高,且在进平流沉淀池后要经过 1.5~2 h 的沉淀,沉淀效果较好,对冲击负荷和温度变化的适应能力较强,所以前期投矾量不需要很多就能保证出厂水浊度达到国家标准。

而余氏墩水厂采用穿孔反应池和斜管沉淀池,其沉淀效率虽较高但并不见得沉淀效果最好。由于目前余氏墩水厂改造构筑物有难度,建议余氏墩水厂选择投加更高效的絮凝剂以期在水质达标的前提下减少耗药量。

此外,由于走马岭水厂将反冲洗水进行回收利用,重新再次进入折板絮凝池进行后续处理,所以大大节约了水资源,从而降低了水厂能耗,降低了制水成本。

3 运行经验总结

① 两个水厂采用液氯进行预氧化,预氯化工艺由于能够有效杀灭细菌等病原微生物,且成本低廉,在给水厂中应用最为广泛,但在预氯化过程中,水源水中普遍存在的天然有机物(NOM)与氯作用生成较高浓度的消毒副产物(DBPs)^[6],这些物质很难通过后续常规工艺有效去除。因此,为了提高饮用水水质,保障用水安全,在后期水厂运行及改造中,可以改进预处理技术,如采用臭氧预氧化、高铁

酸盐预氧化等。

② 因为斜管沉淀池容易长藻而堵塞,余氏墩水厂特增加黑色不透光遮阳布,以避免阳光直射,减少藻类产生。同时,水厂安排人员对斜管进行定期清扫、检测和更换,力求达到最佳沉淀效果。

③ 传统工艺不能高效去除水体中的氨氮,应该在水厂中增加深度处理工艺,比如生物活性炭深度处理工艺,不仅能提高水中氨氮的去除率,而且通过活性炭吸附及生物作用,可有效降低出厂水色度、浊度、嗅和味,使得出厂水水质优于国家标准,更有利于人体健康。

④ 对于余氏墩水厂,在日后的提标改造中应更广泛地推进全自动化控制的应用,以节约制水成本和减轻工作人员负担。

4 结论

分析了余氏墩水厂和走马岭水厂2017年实际运行的相关指标,两水厂对浊度、氨氮和 COD_{Mn} 的年平均去除率分别在98.40%、74.70%、30.00%以上,全年出厂水水质合格率都达到99%以上,且出厂水水质均优于国家标准。走马岭水厂原水水质更好,且工艺更优良,全厂区自动化控制,所以在运行能耗、耗矾量和耗氯量方面都有着明显的优势。

参考文献:

- [1] 王如华. 现有城镇水厂技术升级改造面临的主要问题及对策[J]. 净水技术, 2012, 31(4): 4-6, 83.
Wang Ruhua. Main problems and solutions of technical upgrading and rehabilitation for existing urban water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2012, 31(4): 4-6, 83 (in Chinese).
- [2] 兰迪. 低浊度原水净化工艺运行现状调查研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Lan Di. Investigation and Research on Operation Situation of Low Turbidity Raw Water Purification Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [3] 左金龙. 微污染水源水水质特点及其处理工艺选择[J]. 中国给水排水, 2012, 28(16): 15-18.
Zuo Jinlong. Characteristics of micro-polluted source

water quality and selection of its treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(16): 15-18 (in Chinese).

- [4] 李学艳, 马焱, 徐飞飞, 等. 预臭氧氧化强化常规工艺去除黄浦江原水中污染物[J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 38-41.
Li Xueyan, Ma Yao, Xu Feifei, et al. Conventional treatment process enhanced by pre-ozonation for removing pollutants in raw water from Huangpu River [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(23): 38-41 (in Chinese).
- [5] 姜登岭, 薄国柱, 倪国威, 等. 常规处理工艺对饮用水中有机物的去除[J]. 河北理工学院学报, 2006, 28(3): 130-133, 137.
Jiang Dengling, Bo Guozhu, Ni Guowei, et al. Removal of natural organic matter (NOM) in drinking water by conventional treatment process [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2006, 28(3): 130-133, 137 (in Chinese).
- [6] 岳尚超. 预臭氧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).



作者简介: 李柏林(1983-), 男, 湖北钟祥人, 博士, 副教授, 研究方向为饮用水深度处理及水质安全保障。

E-mail: bolly1221@163.com

收稿日期: 2019-05-04