

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.007

城镇给水厂气浮工艺运行性能与经济性分析

沈虎¹, 王永磊¹, 鞠玲², 田立平³, 贾瑞宝⁴, 宋武昌⁴

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250100; 2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250100; 3. 潍坊市市政公用事业服务中心, 山东 潍坊 261041; 4. 山东省城市供排水水质监测中心, 山东 济南 250100)

摘要: 随着季节性藻华事件的频发,越来越多的给水厂将气浮工艺应用到水处理中。以国内4套典型给水厂的气浮设备为研究对象,利用高速摄像机等评估气泡特性及对污染物的去除效果,并进行气浮设备的性能评估及运行能耗规律研究。结果表明,气浮设备整体运行情况基本正常,各水厂气浮设备的溶气效率为58.4%~78.7%,气泡平均粒径均低于30 μm,气泡稳定时间大多在240 s以上;对浊度和藻类的去除效果较好,去除率分别为50.70%~77.66%和77.41%~86.31%,对TOC、UV₂₅₄、COD_{Mn}的去除率不高,但可以起到减轻后续工艺单元运行压力的作用;同时,气浮工艺运行产生的较高电能和药剂消耗,能够通过其他指标的降低相互抵消,投资成本仅增加了0.024~0.030元/m³。综合考虑运行性能、经济性和出水水质等因素,气浮工艺对城镇给水厂处理低浊高藻水具有较好的适用性。

关键词: 给水厂; 气浮; 运行性能; 经济性分析; 设备性能评估

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0047-09

Performance and Economic Analysis of Air Flotation Process in Urban Water Supply Plant

SHEN Hu¹, WANG Yong-lei¹, JU Ling², TIAN Li-ping³, JIA Rui-bao⁴,
SONG Wu-chang⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China; 2. Shuifa Planning and Design Co. Ltd., Jinan 250100, China; 3. Weifang Municipal Public Utility Service Center, Weifang 261041, China; 4. Shandong Province City Water Supply and Drainage Water Quality Monitoring Center, Jinan 250100, China)

Abstract: With the frequent occurrence of seasonal algal blooms, an increasing number of water supply plants are applying air flotation process to water treatment. The bubble characteristics and pollutants removal performance of the air flotation equipments of four typical water supply plants in China were evaluated by using high-speed cameras and other equipments. In addition, the performance of the air flotation equipment was evaluated, and the change in operational energy consumption was investigated. The overall operation of the air flotation equipment was basically normal. The air-dissolved efficiency of the air flotation equipment in each water supply plant was 58.4%~78.7%, the average particle size of the

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020ME221); 潍坊市科学技术发展计划项目(2020ZJ1320)

通信作者: 王永磊 E-mail: wyl1016@sdjzu.edu.cn

bubble was always less than 30 μm , and the bubble stabilization time was mostly more than 240 s. The removal rates of turbidity and algae were 50.70%–77.66% and 77.41%–86.31%, respectively. The removal rates of TOC, UV_{254} and COD_{Mn} were not high. However, it alleviated the operational load of the subsequent process. In addition, the higher electric energy and chemicals consumption caused by the operation of air flotation process could be offset by the reduction of other indicators, and the operational cost only increased by 0.024–0.030 yuan/ m^3 . The performance, operational cost and effluent quality of the air flotation process indicate that the process has good applicability to the treatment of low turbidity and high algae density water in urban water supply plants.

Key words: water supply plant; air flotation; operational performance; economic analysis; equipment performance evaluation

近年来,我国环境污染及水体富营养化情况日益严重。根据《2020中国生态环境状况公报》统计,在110个进行营养状态监测的重要湖泊(水库)中,贫营养状态、中营养状态分别为10、68个,而轻度、中度和重度富营养状态分别为26、5、1个。与2019年相比,情况有所恶化,季节性藻华事件频发。藻类暴发会对人类和水生动物造成许多负面影响,可能会产生有毒物质、微囊藻毒素和许多具有异常味道、气味的化合物。在水处理过程中,水源被藻严重污染会导致混凝剂投加量增加、膜阻塞、砂滤器堵塞和沉降能力降低等问题。

气浮是一种可以有效去除饮用水中藻类的方法^[1-2],也是给水处理中的重要工艺之一。其通过溶气释放器来释放大量微气泡,以达到固液分离目的,对藻类的去除效果显著^[3-4]。随着季节性高藻的不断暴发,国内给水厂纷纷进行升级改造,将气浮技术应用其中。天津芥园水厂采用气浮工艺后,对叶绿素的去除率达到90%,出水浊度 <0.4 NTU;资阳市二水厂对气浮工艺进行了升级,使除藻率提升到92.5%;长流陂水厂选用的是浅层气浮工艺,除藻率超过80%^[5];珠海三灶水厂完成气浮—沉淀工艺改造后,对藻类和浊度的平均去除率分别为96.6%和94.1%^[6];济南玉清水厂将沉淀池改为了沉淀气浮池,除藻率为92.5%,出水水质显著提升^[7]。

尽管气浮在水处理过程中得到了较为广泛的应用,但目前仍缺乏对气浮设备性能及运行情况的评价,并且尚不明确气浮设备性能与除污染效能的关系,对于气浮工艺的运行能耗规律及经济性也鲜有报道。笔者对国内部分典型给水厂气浮设备的

运行性能进行了评估,并分析了气浮工艺的经济性,提出了给水厂气浮设备的运行建议。

1 材料与方 法

1.1 典型水厂气浮工艺概况

国内应用溶气气浮的典型给水厂基本信息如下:①N水厂供水能力为 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,处理工艺为气浮池+臭氧接触池+活性炭吸附池+浸没式膜滤池+次氯酸钠消毒,气浮池供水量为 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,回流比为10%;②B水厂供水能力为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水厂采用常规处理、微絮凝、微絮凝浮滤3种不同的工艺流程来应对不同水质,微絮凝采用浮滤工艺,气浮池与滤池合建,回流比为10%,溶气压力为0.35~0.4 MPa;③Y水厂供水能力为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,处理工艺为高锰酸盐预处理+浮沉池+生物活性炭砂滤池+中压紫外线消毒,气浮池供水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,回流比为10%,溶气压力为0.30 MPa;④M水厂供水能力为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,处理工艺为加药、前加氯+反应池+气浮池+沉淀池+滤池+活性炭吸附+清水池+吸水井二次加氯消毒,回流比为8%~10%。

1.2 气浮设备性能评估方法

气浮设备的性能直接决定了去除污染物效能,代表性参数主要有微气泡粒径、溶气效率、气泡稳定时间、溶解氧含量、能耗等。微气泡的粒径大小与气浮工艺的处理效果密切相关,水中污染物的粒度与微气泡粒径尺寸相似,所以能够去除水中微细颗粒物;气浮设备的性能好坏也在于溶气效率的高低,在同等温度、压力条件下,溶气效率越高的气浮设备性能越好,更能降低能耗;微气泡在水中的稳定时间越长,越能够为絮体与颗粒的碰撞及黏附提供机会,通过查阅《城镇给水气浮处理工程技术规

程》(T/CECS 791—2020)(以下简称《气浮规程》),确定微纳米气泡稳定时间应不低于 240 s。

1.3 检测项目及方法

浊度的检测仪器为浊度仪;叶绿素 a 的检测仪器为电导率仪;溶解氧的检测仪器为多参数水质检测仪;TOC 的检测仪器为总有机碳分析仪;UV₂₅₄ 的检测仪器为紫外可见分光光度计;三维荧光光谱的检测仪器为荧光光谱仪;三卤甲烷前质的检测仪器为气相色谱仪;COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾法测定。

溶气效率、气泡消失时间和微气泡粒径采用《气浮规程》附录 A~C 所推荐的测定方法。将理论溶气量与测得的实际释气量比值作为溶气效率;气泡稳定时间与微气泡粒径的分析采用刘威^[8]介绍的微纳米气泡特性检测技术;根据测得的微气泡粒径计算气泡数密度,见式(1)。

$$N = \frac{V}{(4/3)\pi r^3} \quad (1)$$

式中: N 为气泡数密度,表示单位体积内的气泡数目; V 为单位体积,取 1 cm^3 ; r 为气泡的平均半径, μm 。

2 结果与讨论

2.1 气浮设备性能分析

溶气效率常用来衡量系统溶解空气的能力,因其难以直接测量,在实际应用中一般使用释气效率来间接反映^[9]。气泡稳定时间表征了释气水中所含气泡的数密度,气泡在水中的稳定时间越长,越能够为水中絮体与颗粒的碰撞及黏附提供机会。气泡粒径大小与气浮设备的性能密切相关,只有当气浮系统释放出合适大小的气泡时,才能增加与胶体的碰撞几率,进而提高除污效能,同时存在最适粒径,使得去除效率最高^[10]。溶解氧通常采用氧总转移系数(K_{La})来表示,即单位传质推动下,单位时间内向单位体积的水中所传递氧的质量,反映了溶气过程中氧的传递性,常用于表征气浮设备的溶气性能。因此将溶气效率、气泡稳定时间、气泡粒径、溶解氧作为气浮设备性能的评估参数。

2.1.1 溶气效率

不同水厂气浮设备的溶气效率如图 1 所示。可知,N、B、Y、M 水厂气浮设备的平均溶气效率分别为 77.8%、58.4%、78.7%、71.8%。通过调研发现,N、B、Y 水厂采用填料 1,M 水厂采用填料 2,各水厂溶气罐的使用年限分别为 3、10、6、10 年,在 2、6、10 年

时,填料 1 的溶气效率分别为 77.81%、71.84% 和 58.42%,填料 2 的溶气效率分别为 84.24%、81.29% 和 78.73%。由此看出,随着溶气罐使用年限的增加,溶气效率逐渐降低,不同类别的填料对溶气效率的影响也有所差异。因此,各溶气罐溶气效率参差不齐的原因可能与罐内填料结构种类有关,填料能够增加气液两相的接触面积,增强布水均匀性,提高溶气效率^[11]。

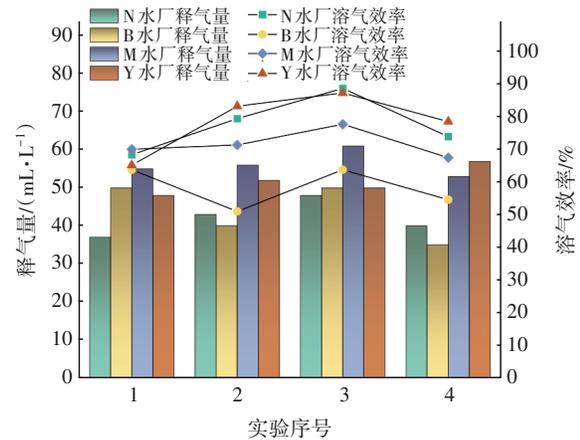


图 1 不同水厂气浮设备的溶气效率

Fig.1 Dissolved air efficiency of air flotation equipment in different water supply plants

2.1.2 气泡稳定时间

经计算,N、B、Y、M 水厂气浮池的气泡稳定时间分别为 307.67、259.75、287.34、200.25 s,溶气罐的气泡稳定时间分别为 176.00、79.67、109.22、305.50 s。N、B 和 Y 水厂气浮池中测得的气泡平均稳定时间均高于 240 s,符合《气浮规程》的要求。M 水厂的气泡稳定时间为 200.25 s,稳定时间较短,而其溶气罐气泡的稳定时间为 305.50 s,表明该水厂气浮设备的溶气效能可满足正常运行要求,但由于气浮体系设计的不合理,使得溶气水在经释放器减压进入气浮池后,压力沿程损失变大,进而导致水中微气泡的数密度减少。

气泡的稳定时间影响着气浮工艺的除污效能,气泡稳定时间越长,在水中的停留时间就越长,能够为气泡与水中絮体的黏附提供充足的空间和时间;若停留时间较短,絮体与气泡黏附得较为松散,在水流的冲击下,夹气絮体可能会破碎,从而影响出水水质。

2.1.3 气泡粒径

各水厂的气浮池均在一定条件下运行,由于池

深不同,因此分别选择距离池底释放器上方 0.5、1.0、1.5 m 处和两释放器中间上方 0.5、1.0、1.5 m

处的微气泡进行粒径的测定,微气泡粒径概率密度分布如图 2 所示。

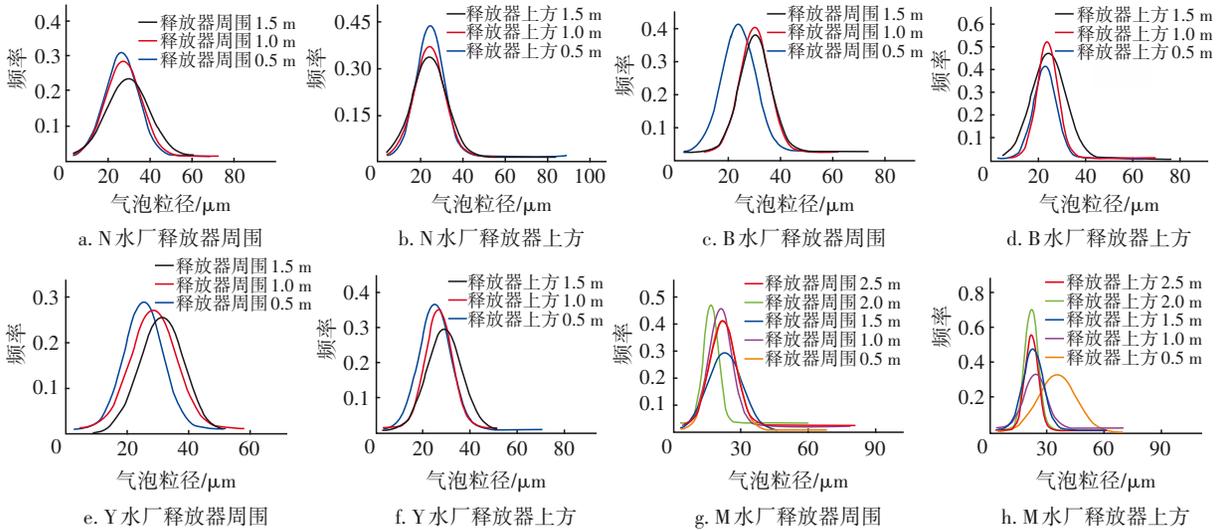


图 2 不同水厂不同位置微气泡粒径的概率密度分布情况

Fig.2 Probability density distribution of microbubble particle size at different locations of different water supply plants

从图 2 可以看出,N、B、Y、M 水厂气浮池中出现频率最高的气泡粒径主要分布在 25~29、22~31、22~29、17~24 μm,平均粒径分别为 29.6、27.47、29.15、27.34 μm。观察不同深度的微气泡情况可以发现,除 M 水厂外,随着检测位置的上升,概率密度的峰值逐渐向右移动,但移动的幅度不大,最高频率的粒径尺寸增加量低于 5 μm;且随着检测位置的上升,较小粒径出现的频率逐渐降低,最高频率的峰逐渐缓和。

分布情况可以发现,除 M 水厂外,微气泡的粒径分布变化较小。N、B、Y 水厂在同一深度和位置上的粒径分布变化不大,M 水厂出现差异的原因是该水厂溶气系统的布置与其他 3 个水厂不同,导致该水厂气浮池中的粒径分布范围及规律与其他 3 个水厂的差异较大。

对比释放器周围与释放器上方的微气泡尺寸

通过查阅《气浮规程》得知,微气泡平均粒径的合理范围为 20~60 μm,根据式(1)计算数密度的合理范围为 8 842~238 732 个/cm³。统计不同高度下气泡的平均粒径,结果见表 1。

表 1 不同高度下的气泡平均粒径与数密度

Tab.1 Average particle size and number density of bubbles at different heights

项 目		N 水厂		B 水厂		Y 水厂		M 水厂	
		平均粒径/ μm	气泡数密度/ (个·cm ⁻³)	平均粒 径/μm	气泡数密度/ (个·cm ⁻³)	平均粒径/ μm	气泡数密度/ (个·cm ⁻³)	平均粒径/ μm	气泡数密度/ (个·cm ⁻³)
释放器上方/m	0.5	28.84	79 619	25.73	112 120	27.24	94 489	36.93	37 920
	1.0	28.91	79 042	26.19	106 315	29.00	78 308	30.14	69 754
	1.5	28.97	78 552	27.07	96 280	30.41	67 913	27.05	96 494
	2.0	—	—	—	—	—	—	24.79	125 364
	2.5	—	—	—	—	—	—	23.90	139 597
释放器周围/m	0.5	30.41	67 912	26.52	102 396	27.14	95 537	24.25	133 926
	1.0	31.13	63 309	29.85	71 807	31.25	62 582	24.97	122 672
	1.5	31.45	61 396	30.74	65 749	31.55	60 814	24.93	123 264
	2.0	—	—	—	—	—	—	21.92	181 334
	2.5	—	—	—	—	—	—	27.58	91 037

从表 1 可知,N、B、Y 水厂中,随着气泡上升高度的增加,其平均粒径也有所增加,气泡数密度减少,

这与其他学者得出的结论一致^[12]。M 水厂的气泡粒径变化趋势与其他 3 个水厂相反,可能是由于 M 水厂溶气系统的布置与常规的溶气系统布置不同, M 水厂溶气罐采用串联方式给 4 个气浮池供溶气水,溶气水经溶气罐充分混合后,从溶气罐的底部先提升至气浮池顶部,再由气浮池顶部的溶气水管深入气浮池底部,与池子底部的释放器连接,在这个过程中,靠近溶气罐一端的溶气压力较足,释放的微气泡较均匀,远离溶气罐的一端溶气压力较小,气泡损失较大,产生的大气泡较多,所以离释放器位置较近区域微气泡的平均粒径较高,随着高度的增加,释气效果较差的释放器产生的大气泡开始破碎,释气效果较好的释放器产生的微气泡开始占据主导地位,因此随着高度的上升,微气泡的平均粒径逐渐减小并趋于稳定。M 水厂气浮形式的不合理性可为今后给水厂气浮工艺的设计提供警示。

2.1.4 溶解氧含量

不同水厂溶解氧含量的变化如图 3 所示。

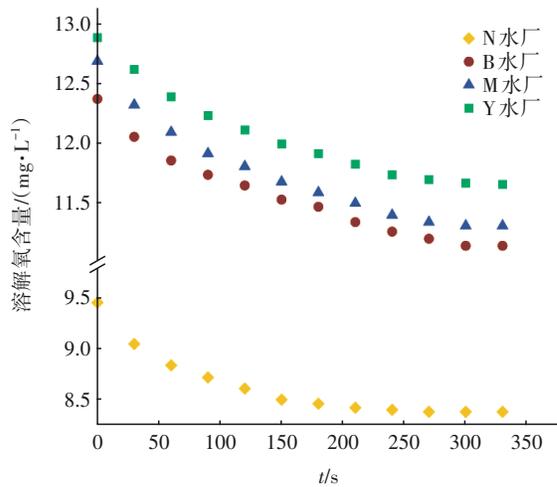


图 3 不同水厂溶解氧含量的变化

Fig.3 Change of dissolved oxygen content in different water supply plants

由于实验日期不同, N 水厂的测试水温为 25 °C, 气浮池中 DO 为 9.46 mg/L, 随着气泡的消失, DO 稳定在 8.38 mg/L, 高于相同温度和压力下清水的理论值 8.25 mg/L; B 水厂和 M 水厂的测试水温为 13 °C, DO 分别为 12.37 和 12.69 mg/L, 随着气泡的消失, 溶解氧含量逐渐稳定在 11.13 和 11.30 mg/L, 均高于相同温度和压力下清水的理论值 10.53 mg/L; Y 水厂的测试水温为 7 °C, 气浮池中 DO 为 12.89 mg/L, 随着气泡的消失, DO 逐渐稳定在 11.65 mg/L,

高于相同温度和压力下清水的理论值 12.11 mg/L。水体溶解氧含量与氧分压、水温、水生生物的活动、耗氧量等因素密切相关, 水温是影响溶解氧含量的关键因素。另外, 温度降低, 水中的耗氧微生物逐渐减少, 也会使溶解氧升高^[13]。同时微气泡具有较强的传质能力, 可以利用自身的增压作用来增大液界面间的传质效率, 这种自增压效应会使微气泡溶于水, 因此能够实现气液传质。

2.2 气浮单元的运行效能

2.2.1 对藻类和浊度的去除效能

不同水厂气浮池的除浊和除藻效能见图 4。

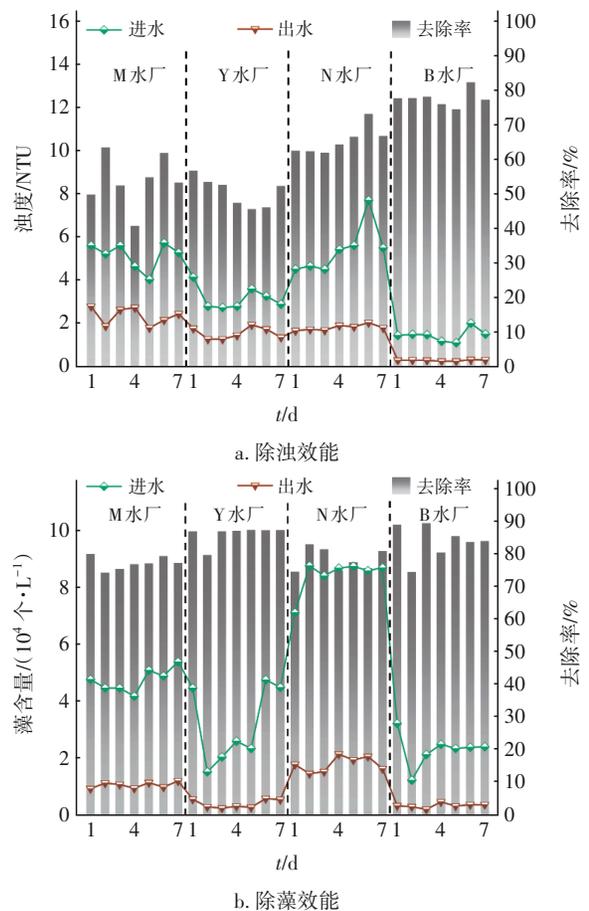


图 4 不同水厂气浮池的除浊和除藻效能

Fig.4 Removal efficiency of turbidity and algae by air flotation tank in different water supply plants

从图 4 可以看出, N、B、M、Y 水厂气浮工艺对浊度的平均去除率分别为 65.42%、77.66%、53.91%、50.70%, 对藻类的平均去除率分别为 78.50%、84.00%、77.41%、86.31%, 整体运行情况较为稳定。10 月—11 月, 各水厂进水的浊度均不高, 且气浮池出水浊度均满足相应工艺的出水水质要求, 其

中 B 水厂浮滤池的出水浊度 < 0.5 NTU, 符合滤池出水水质标准; M 水厂气浮池出水浊度为 1.83~2.82 NTU, 因为水厂工艺流程的不同, 气浮作为预处理单元放置在沉淀之前, 在进入气浮池前先投加部分絮凝剂, 保证形成的矾花能够与微气泡结合, 在进入沉淀池前再投加可保证沉淀池的有效运行, 减少药耗, 气浮池出水浊度控制在 2~4 NTU。虽然测试期间不是藻类暴发期, 但气浮的除藻率依然能达到 75% 以上, 说明经该单元处理后藻类含量急剧减少^[14]。

2.2.2 对有机物的去除效能

不同水厂气浮池对 TOC、UV₂₅₄ 和 COD_{Mn} 的去除效能如图 5 所示。可以看出, N、B、M、Y 水厂气浮单元对 TOC 的平均去除率分别为 3.99%、4.91%、1.36%、6.47%; 对 UV₂₅₄ 的平均去除率分别为 21.34%、31.60%、19.75%、12.03%; 对 COD_{Mn} 的平均去除率分别为 17.03%、32.50%、18.75%、8.89%, 运行情况均相对稳定。不同水厂对污染物的去除效果基本符合 UV₂₅₄ > COD_{Mn} > TOC。UV₂₅₄ 反映了水中天然存在的腐殖质类大分子有机物和芳环取代程度较高的疏水性芳香化合物。本研究中气浮对水中的大分子和疏水性有机物具有较强的去除效能, 但对于溶解性有机物的吸附作用较差, 这与时玉龙^[15]的研究结果基本一致。

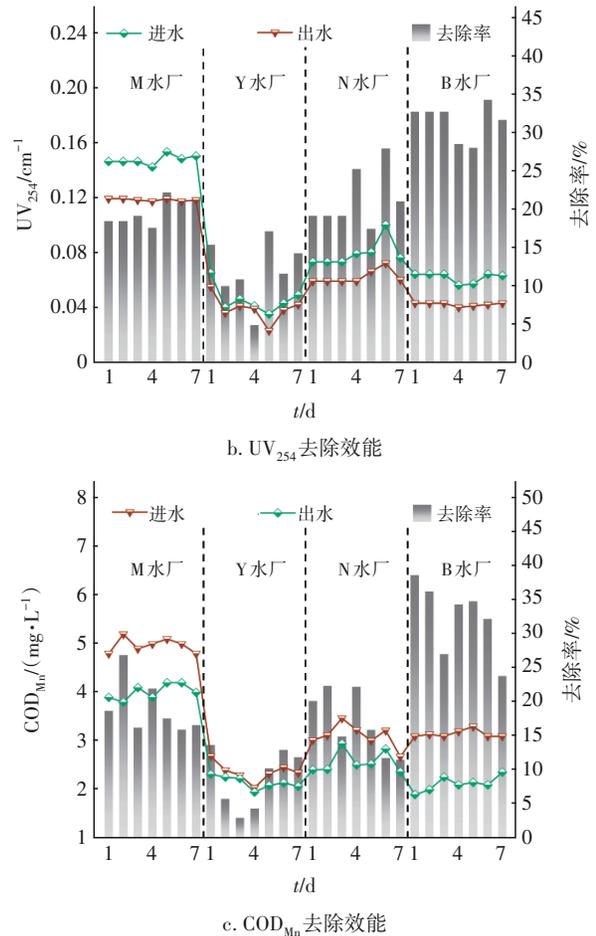
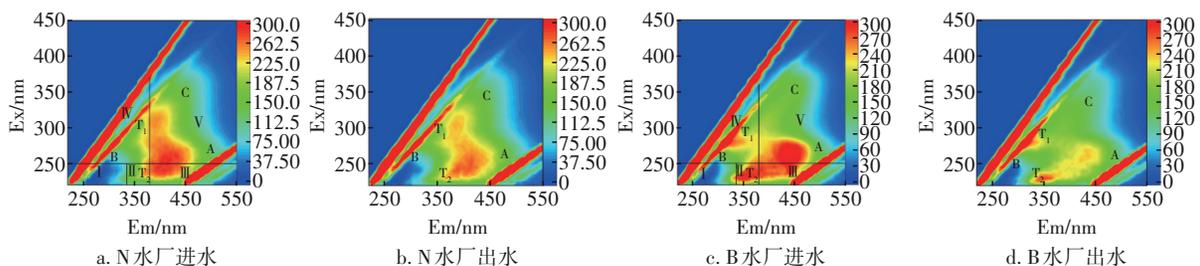
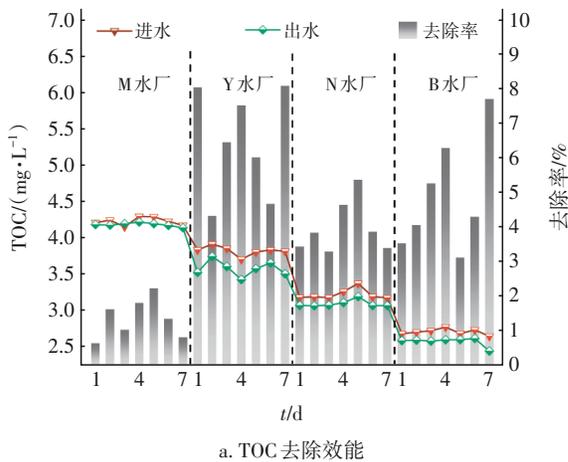


图 5 不同水厂气浮池对 TOC、UV₂₅₄ 和 COD_{Mn} 的去除效能
Fig.5 Removal efficiency of TOC, UV₂₅₄ and COD_{Mn} by air flotation tank in different water supply plants

B 水厂的 UV₂₅₄ 和 COD_{Mn} 去除率均高于其他水厂, 这是工艺组合优化的结果, 改善了出水水质。

2.2.3 对荧光类有机物的去除效能

分析不同水厂气浮池进出水的三维荧光光谱, 结果如图 6 所示。可知, 不同水厂的气浮池进水在 II、III、IV 和 V 区处的荧光峰面积相对较高, 说明进水中有机物的种类非常丰富。根据峰的强弱程度可以得出, 水中的有机物包含微生物代谢产物、类芳香蛋白质、腐殖酸类和富里酸类有机物、类色氨酸有机物等。

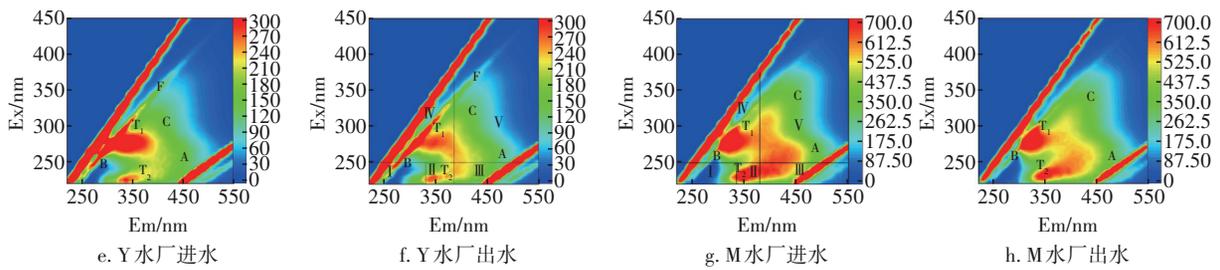


图6 不同水厂气浮池进出水的三维荧光光谱

Fig.6 Three-dimensional fluorescence spectra of influent and effluent of air flotation tank in different water supply plants

经过混凝沉淀和气浮处理后,出水中各峰值都有所减弱,其中V区的峰值削减程度最大,以A峰、C峰的削减为主,说明水中溶解性蛋白质类和腐殖酸类有机物去除的程度较大,气浮对于这类大分子疏水性有机物的去除效果比较显著。

2.2.4 三卤甲烷生成情况分析

分析不同水厂的三卤甲烷生成情况,结果如图7所示。可以看出,各水厂气浮池进水中以三氯甲烷前质为主,通过气浮处理后,N、B、Y和M水厂对三氯甲烷生成势的去除率分别为27.12%、30.46%、28.49%、28.42%,说明气浮及其组合工艺对水中有机物有较高的去除效能,如藻类代谢产物、腐殖质等,这些有机物是生成三卤甲烷的前体物,本结果与2.2.2节中的有机物去除趋势相同,也与Wang等人^[16]得出的结论相符。

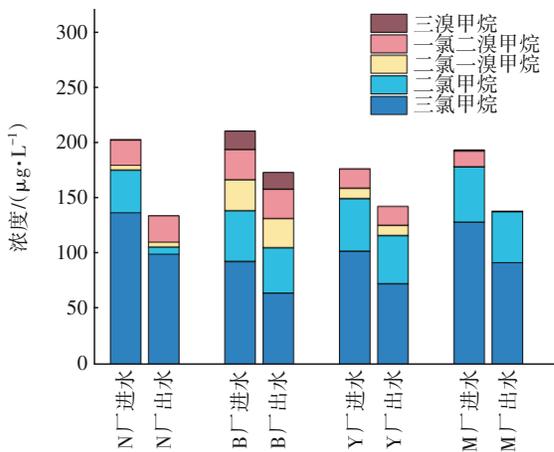


图7 不同水厂中三卤甲烷的生成情况

Fig.7 Formation of trihalomethane in different water supply plants

2.3 气浮工艺能耗分析

耗电分析:气浮工艺在运行时会比常规水处理工艺多消耗一部分电能用于溶气,通过对4座水厂的耗电量进行调研发现,Y、N、B、M水厂的耗电分别

为0.017、0.029、0.024、0.030元/m³。气浮系统正常运行时,需要用电的有回流泵、回流泵配用电机、刮渣机、空压机等大功率设备,当回流比和溶气压力升高时,回流泵与空压机的耗电会随之增加^[17],而根据亨利定律,随着溶气罐中的压力不断增加,在水中溶解的空气浓度也会相应增加,由此导致了空压机的总耗电上升。

药耗分析:目前水厂常用的混凝剂主要有无机低分子洗凝剂和无机高分子混凝剂,Y、N、B、M水厂所用的混凝剂分别为硫酸铝、聚合氯化铝、聚合氯化铝、高效氧化铝,药耗分别为11.83、24.05、35.00、88.00 μg/m²,核算后的经济成本分别为0.625、0.022、0.038、0.020元/m³。传统工艺处理低温低浊水时,常采用加大混凝剂投加量的方式,但是并没有形成很好的矾花^[18]。采用气浮工艺后,利用微气泡的碰撞黏附作用去除水中的细小颗粒物,降低了药耗,所以在处理高浊高藻或低温低浊水时,联合使用气浮工艺能够减少混凝剂的用量,节约成本,提高出水水质。

投资成本分析:Y、N、B、M水厂的 investment cost 分别为22.50、47.27、39.17、60.00元/m³,与常规处理工艺的费用接近。增加气浮工艺后,投资总成本有所增加,但随着工艺的联合应用,处理后的出水水质得以提高,产水量随之增多,处理规模增加,水厂运行的单位体积水投资成本会相应降低,气浮带来的整体经济效益仍然呈上升趋势。经核算,投资成本仅增加0.024~0.030元/m³。

尽管气浮工艺的运行带来了较高的电能消耗和部分药剂消耗,但提高了出水水质,减轻了下一阶段过滤单元的运行负荷,减少了反冲洗水量^[19],后续处理工艺能耗的降低和低用水量会相对抵消部分耗电量和耗药量^[20],所以采用气浮工艺后总能耗增加相对较少,这样也为气浮工艺的推广奠定了

经济基础。另外,在今后气浮设备的研发过程中,需要格外重视环保和节能效益,让气浮设备既能保证稳定的性能、提高除污效能,又可以节约能耗,这样才能够为推动气浮技术的发展提供经济保障。

3 结论

① 溶气效率与溶气罐的使用年限和填料有关。N、B、Y水厂中,随着气泡上升高度的增加,微气泡的平均粒径缓慢增加,微气泡的数密度逐渐减少;M水厂的部分指标呈现出相反的趋势,这与溶气设备的布置有关。各水厂进行气浮时水中的溶解氧含量均高于同温同压下清水的溶解氧含量。建议采用气浮工艺的水厂选择合适的填料,并及时更换溶气罐,使气浮设备的溶气效率始终保持较高水平,提高工艺的处理效率。

② 各水厂气浮工艺对浊度和藻类的去除率分别为 50.70%~77.66% 和 77.41%~86.31%;对 TOC、UV₂₅₄、COD_{Mn} 的去除率虽然不高,但仍可以减轻后续工艺的运行压力,有效提高出水水质。气浮工艺对低温低浊高藻的水源水有较好的处理效果,可为未来水厂选用气浮设备提供参考。

③ 气浮工艺的加入会提高单位制水成本,增加了 0.024~0.030 元/m³,但各水厂间的单位制水成本差距不大,能耗的增加在合理范围内;并且气浮工艺的加入在一定程度上能够减少混凝阶段的药剂投加量,减少反冲洗水量,提高产水率;同时发现气浮带来的经济效益随产水率的升高而提高,这也为气浮工艺的推广提供了经济保障。

参考文献:

- [1] JEONG I, YI M, ZHAO H, *et al.* Characteristics of DBPs reduction of AOM by dissolved air flotation [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54 (4/5): 1436-1444.
- [2] ZHANG X Z, HEWSON J C, AMENDOLA P, *et al.* Critical evaluation and modeling of algal harvesting using dissolved air flotation [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2014, 111(12): 2477-2485.
- [3] GAO G Q, JU H Y, LI D W. Pilot-scale study on treatment of high-algae and low-turbidity source water by air flotation in South China [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 255/260: 2686-2690.
- [4] KWON H, LU M, LEE E Y, *et al.* Harvesting of microalgae using flocculation combined with dissolved air flotation [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2014, 19(1): 143-149.
- [5] 黄慧,王梅芳,王长平,等. 浅层气浮除藻工艺中试试验[J]. *净水技术*, 2015, 34(6): 55-59.
HUANG Hui, WANG Meifang, WANG Changping, *et al.* Pilot scale test of shallow dissolving air-flotation process for algae removal [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(6): 55-59(in Chinese).
- [6] 徐晓然,唐曾晖,李振兴,等. 气浮与沉淀切换运行的新型气浮-沉淀工艺设计和工程应用[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3): 791-798.
XU Xiaoran, TANG Zenghui, LI Zhenxing, *et al.* Design and engineering application of the integrated flotation and sedimentation unit [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(3): 791-798(in Chinese).
- [7] 李浩,贾瑞宝,李世俊. 济南玉清水厂强化常规处理工艺改造设计及运行分析[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(14): 90-93.
LI Hao, JIA Ruibao, LI Shijun. Reconstruction design and operation of conventional treatment processes in Jinan Yuqing Waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(14): 90-93(in Chinese).
- [8] 刘威. 表面改性气泡强化共聚气浮除污染效能及机理研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2020.
LIU Wei. Study on the Efficiency and Mechanism of Surface Modified Microbubble Enhanced Co-coagulation-DAF [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020(in Chinese).
- [9] 蔡蕊,邱天,夏科,等. 气浮设备溶释气效率影响因素研究[J]. *中国检验检测*, 2021, 29(5): 15-17.
CAI Rui, QIU Tian, XIA Ke, *et al.* Study on effect factors of dissolving and releasing efficiency of flotation equipment [J]. *China Inspection Body & Laboratory*, 2021, 29(5): 15-17(in Chinese).
- [10] LAKGHOMI B, LAWRYSHYN Y, HOFMANN R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: importance of stratified flow and bubble size [J]. *Water Research*, 2015, 68: 262-272.
- [11] 王永磊. 逆向-同向流气浮工艺特性及动力学研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.
WANG Yonglei. Study on Characteristics and Dynamics of Reverse-Converse Flow Air Flotation Process [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [12] 岳鹏. 压力溶气法溶气罐内压及释放器倾角对气泡

- 影响的研究[D]. 西安:西安石油大学, 2017.
- YUE Peng. The Study on the Influence of the Dissolved Air Pressure and Release Angle on Bubbles with the Method of Dissolved Air Flotation [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017(in Chinese).
- [13] 尹晓琼. 芒究水库溶解氧变化规律及影响因素分析[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(1): 56-58,62.
- YIN Xiaoqiong. Analysis on the change law of dissolved oxygen and its influencing factors in Mangjiu Reservoir [J]. Environmental Science Survey, 2021, 40(1): 56-58,62(in Chinese).
- [14] 杨曦凯. 引黄水库水以气浮为核心净化工艺示范工程研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2012.
- YANG Xikai. Demonstration Project Study on the Treatment of Reservoir Water Derived from Yellow River by Combined Process of Flotation as Main Technology [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2012 (in Chinese).
- [15] 时玉龙. 多相流泵溶气气浮组合工艺除污染效能及强化措施研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- SHI Yulong. Pollutants Removal Efficiency of Multiphase Pump Dissolved Air Flotation Process and Its Enhancement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [16] WANG Y L, SUN W T, DING L M, *et al.* A study on the feasibility and mechanism of enhanced co-coagulation dissolved air flotation with chitosan-modified microbubbles [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101847.
- [17] 巴珊, 阴沛军, 姜建伟, 等. 基于效能保证和能耗节省的气浮工艺参数优化[J]. 供水技术, 2017, 11(1): 19-22, 27.
- BA Shan, YIN Peijun, JIANG Jianwei, *et al.* Optimization of operation parameters in DAF for performance guarantee and energy conservation [J]. Water Technology, 2017, 11 (1) : 19-22, 27 (in Chinese).
- [18] 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).
- [19] YAP R, HOLMES M, PEIRSON W, *et al.* Optimising dissolved air flotation/filtration treatment of algae-laden lagoon effluent using surface charge: a Bolivar treatment plant case study [J]. Water Science and Technology, 2012, 66(8): 1684-1690.
- [20] 徐晓然, 孙志民, 李振兴, 等. 新型气浮—沉淀工艺能耗研究[J]. 广东化工, 2015, 42(19): 127-129.
- XU Xiaoran, SUN Zhimin, LI Zhenxing, *et al.* The energy consumption research of the novel air flotation-sedimentation process [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(19): 127-129(in Chinese).

作者简介:沈虎(1998-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:807350831@qq.com

收稿日期:2021-10-04

修回日期:2022-02-08

(编辑:任莹莹)

全面推进水生态环境保护和修复
打造水清岸绿、河畅湖美的美丽家园