

由混凝或气浮构成的组合工艺处理太湖原水比较

高梦鸿¹, 高乃云¹, 周金金¹, 戎文磊², 陆纳新², 袁 君²

(1.同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 200092 上海; 2.无锡自来水总公司, 214031 江苏 无锡)

摘 要: 针对低温东太湖原水,考察常规+臭氧-生物活性炭(O₃-BAC)处理中气浮和沉淀两种工艺对出水水质的影响。结果表明:气浮工艺对原水浊度的去除效果明显优于沉淀工艺,平均去除率高约 10.1%,无论是气浮还是沉淀工艺,经 O₃-BAC 深度处理后出水浊度均稳定在 1 NTU 以下;气浮工艺对有机物的去除效果略优于沉淀工艺,COD_{Mn}和 DOC 平均去除率分别高约 5.4%和 1.6%,常规处理工艺后出水有机物含量不能达标,O₃-BAC 工艺出水 COD_{Mn}稳定在 0.5~2.1 mg/L,DOC 稳定在 0.3~2.0 mg/L;沉淀/气浮工艺只对腐殖质略有去除效果,砂滤对荧光物质几乎无去除作用,而 O₃-BAC工艺是去除水中荧光类物质的主要手段;气浮工艺对藻类的去除效果略优于沉淀工艺,深度处理后出水硅藻活性和叶绿素浓度降为 0,蓝藻仍保有部分活性。

关键词: 太湖水;斜管沉淀;气浮工艺;O₃-BAC;去除效果

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2014)08-0090-06

Comparison of pilot effect between sedimentation and dissolved air flocculation for the treatment of Taihu Lake water

GAO Menghong¹, GAO Naiyun¹, ZHOU Jinjin¹, RONG Wenlei², LU Naxin², YUAN Jun²

(1. Pollution Control and Resource Reuse State Key Laboratory, Tongji University, 200092 Shanghai, China;
2. Wuxi Water Works Co., Ltd, 214031 Wuxi, Jiangsu, China)

Abstract: The effluent quality of combined process containing O₃-BAC treatment between sedimentation process and dissolved air flocculation (DAF) process for the treatment of East Taihu Lake raw water were compared. The results showed that the removal efficiency of turbidity by DAF was 10.1% higher than that by sedimentation process, and the effluent turbidity was stabled at 1 NTU or less after the treatment of the O₃-BAC. Compared with the sedimentation process, the COD_{Mn} and DOC removal efficiencies of DAF were increased by 5.4% and 1.6%, respectively. The COD_{Mn} and DOC were stabled at 0.5–2.1 mg/L and 0.3–2.0 mg/L after O₃-BAC process respectively, while the organic concentration could not reach to effluent standard after conventional treatment. O₃-BAC process played a dominant role in the decrease of fluorescence intensity, while conventional treatment process had only a slight or no effect on the removal of fluorescent material. The experimental results indicated that the DAF was slightly better for algae removal efficiency than sedimentation process. The concentration of diatom activity and chlorophyll decreased to 0 and cyanobacteria still retained part of the activity after advanced treatment.

Keywords: Taihu Lake water; tube sedimentation process; dissolved air flocculation process; O₃-BAC; removal efficiency

收稿日期: 2014-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178321);国家科技重大专项(2012ZX07403-001;2008ZX07421-002);高等学校博士点基金资助项目(20120072110050);住房和城乡建设部研究开发项目(2009-K7-4).

作者简介: 高梦鸿(1990—),女,硕士研究生;
高乃云(1950—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 高乃云,gaonaiyun@sina.com.

以东太湖水域为饮用水水源地的周边水厂通常采用混凝-沉淀-过滤的常规处理加上臭氧-生物活性炭深度处理工艺流程.但因藻细胞微粒细小,属于胶体类物质,并带有较高的负电性,且不同原水中的藻细胞性质往往差异较大,故一般的

混凝沉淀除藻效果不佳^[1]. 气浮工艺利用微小气泡与絮体结合使絮体上浮而达到固液分离的目的, 对藻类与低温低浊水有较好的处理效果^[2]. 本文针对典型的湖泊含藻微污染水体, 通过中试考察在常规+臭氧-生物活性炭(O₃-BAC)处理过程中气浮和沉淀两种工艺对出水水质的影响, 包括各处理单元的出水浑浊度、有机物(COD_{Mn}和DOC)含量, 通过三维荧光光谱分析各工艺对荧光物质的去除效果以及藻类活性和叶绿素浓度的变化, 比较两种工艺在处理湖泊水体时的优缺点, 为今后自来水厂净水工艺的改进和优化提供指导和依据.

1 实 验

1.1 中试工艺流程

中试装置包括 A 和 B 两套水处理工艺流程, 即常规处理+O₃-BAC 深度处理, 如图 1 所示, 中试进水取自梅梁湾(东太湖)原水, 进水流量均为 1.0 m³/h.

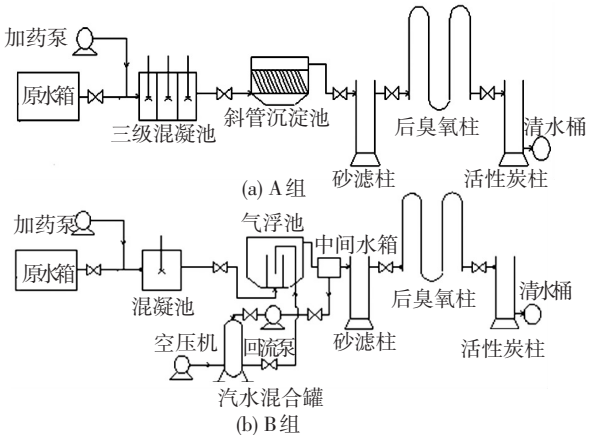


图 1 中试处理工艺流程

混凝-沉淀工艺设有 3 级搅拌混凝池, 尺寸为 1.2 m×0.4 m×0.5 m, 桨板转速分别为 100、30 和 10 r/min; 斜管沉淀池尺寸为 1.5 m×0.7 m×

1.4 m, 斜管材料采用 0.4 mm 塑料板热压成正六角形管, 内切圆直径 25 mm, 长 0.5 mm, 倾斜角度为 45°.

混凝-气浮工艺中混凝池尺寸为 0.42 m×0.42 m×0.61 m, 上下两个桨板, 转速为 50 r/min; 气浮池直径为 0.7 m, 池高 1 m; 气浮系统溶气罐为间歇式进气、连续式进水, 回流比为 10%~15%, 工作压力为 0.24~0.34 MPa; 气浮池采用 TS 型释放器, 连续刮渣.

砂滤柱直径 300 mm, 承托层高 450 mm, 砂层高 700 mm. 臭氧接触柱为串联式多级 U 形不锈钢柱, 直径为 200 mm, 柱高 4 m, 反应器底部装有不锈钢制曝气头, 反应柱出口接尾气吸收瓶. 活性炭柱直径 300 mm, 卵石承托层高 250 mm, 砂层高 300 mm, 活性炭层高 1 000 mm.

实验用混凝剂为聚合氯化铝, 前期中试运行数据表明, 气浮工艺混凝剂投加量为 15~20 mg/L、沉淀工艺为 20~30 mg/L 时, 深度处理出水浊度保持在 1 NTU 以下, 故选取混凝-气浮投药量为 20 mg/L, 混凝-沉淀投药量为 25 mg/L, 中试运行稳定后各工艺出水浊度、COD_{Mn}等采样频率为每天一次, TOC 采样 4 d 一次, 连续监测.

1.2 原水水质

10~12 月实验期间测得的中试工艺原水水质指标如表 1 所示. 由于暴雨和风浪作用, 实验期间原水水质波动较大, 浊度最高可达 118 NTU, COD_{Mn}最大时超过 6 mg/L, 按照国家规定的单因子评价法整体水质依据最高指标确定, 属于Ⅳ类水质. 近年充山水厂原水水质统计数据表明, 太湖梅梁湾属于Ⅳ~Ⅴ类水体, 氨氮和藻类含量常年偏高, 有机物污染严重, 故实验期间原水水质的波动范围对梅梁湾近年水质的整体水平具有一定的代表性.

表 1 中试期间原水水质指标

pH	浑浊度/NTU	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	ρ(氨氮)/(mg·L ⁻¹)	ρ(TOC)/(mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)
7.5~8.3	19~118	0.078~0.150	0.28~1.54	2.58~23.56	3.51~7.01

1.3 测定方法

三维荧光光谱(EEM)检测采用 F-4500 型荧光光谱分析仪(Hitachi, 日本). 检测池为光路长度 1 cm 的石英荧光样品池, 检测温度为室温, 空白样采用去离子水. 基本检测参数为: 激发光源, 150 W 氨弧灯; PMT 电压, 700 V; 光栅夹缝, E_x = 10 nm, E_m = 10 nm; 响应时间, 0.5 s; 扫描速度, 1 200 nm/min; 扫描光谱进行仪器自动校正. 扫描

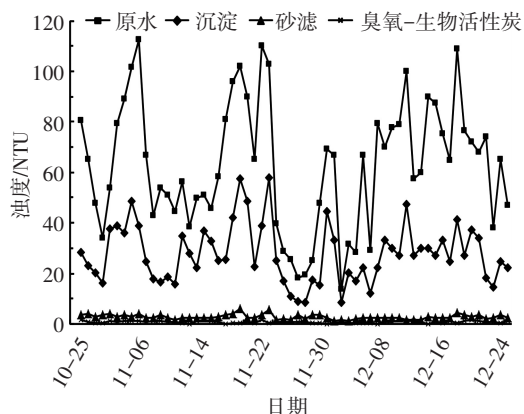
范围为 E_x/E_m = 200~450 nm/280~550 nm, 扫描间隔为 5 nm.

COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾滴定法测定; 浑浊度采用 HACH2100P 型便携式浊度仪测定; 溶解性有机碳(DOC)采用 TOC-VCPH 型 TOC 仪(Shimadzu, 日本)测定; 藻类活性及叶绿素 a 浓度采用 PHYTO-PAM 荧光仪(Walz, 德国)测定.

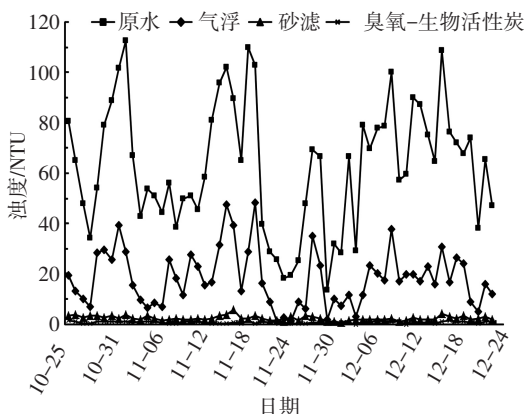
2 结果与讨论

2.1 对浊度的去除效果对比

实验期间 A、B 两组工艺各单元出水浑浊度见图 2。由图 2(a) 可以看出, A 组沉淀出水浊度降为 20~60 NTU, 平均去除率为 50%; 砂滤池出水浊度降为 1~10 NTU, 平均去除率为 90%; 经 O_3 -BAC 单元后, 浊度进一步降低到 0~1 NTU, 该组工艺对浑浊度的总去除率达 99% 以上。由图 2(b) 可以看出, B 组气浮出水浊度降为 5~50 NTU, 平均去除率为 60.1%; 砂滤池出水浊度降为 0.9~5.0 NTU, 平均去除率为 90%; 经 O_3 -BAC 单元后, 浊度进一步降低到 0~0.8 NTU, 该组合工艺对浑浊度的总去除率达 99.5% 以上。



(a) A 组



(b) B 组

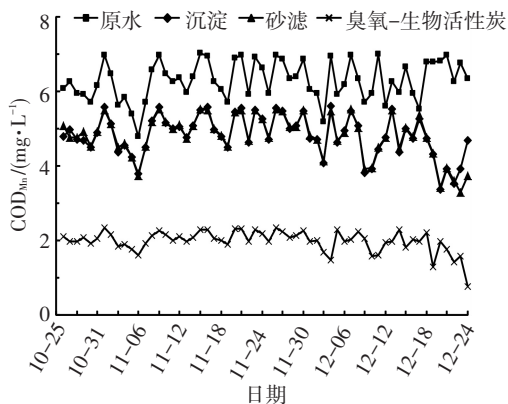
图 2 各水处理单元出水浑浊度

对比 A、B 两组工艺可知, 气浮工艺对浊度的去除效果优于沉淀工艺, 这与胡澄澄等^[3]研究结论相同。其原因是实验在 11~12 月低温低浊期间, 原水黏度增大, 颗粒外围吸附水化膜增厚, 亲水性加强, 布朗运动减弱, 从而使颗粒在水中稳定地存在, 不易形成大颗粒; 低温低浊水中的胶体颗粒物质数量较少, 主要以细而均匀的胶体颗粒为主, 其 Zeta 电位负值很高, 碰撞效率较低, 不利于矾花的形成; 沉淀需要较大尺寸的絮体颗粒, 而气

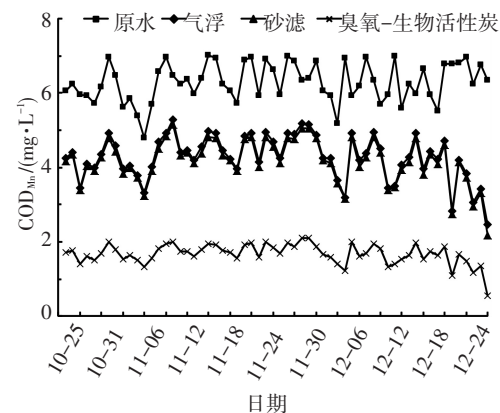
浮对絮体颗粒尺寸的要求没有沉淀严格, 且低温时水中溶解气体增多, 吸附于形成的絮体周围, 使得絮体易于上浮^[4-5]。故针对低温低浊太湖原水, 在控制出水浊度上, 气浮工艺比沉淀工艺具有更大的优势, 而沉淀工艺则需要通过加大投药量达到相同的出水水质效果。

2.2 对有机物的去除效果对比

有机污染物含量的综合指标主要包括化学需氧量 (COD_{Cr} 和 COD_{Mn}) 和总有机碳 (TOC)。其中 COD_{Mn} 主要反映水中能够被高锰酸钾氧化的一类还原物质, 可作为水中易被氧化降解有机物的良好替代参数, 表征水中有机污染物被氧化的程度或污染物的还原能力; TOC 则代表了水体中全部含碳有机物的质量浓度, 由于水样中的大颗粒悬浮物不能进入 TOC 测定仪, 测定前采用 $0.45 \mu m$ 膜过滤预处理, 得到的结果实际为溶解性有机碳 (DOC)。 COD_{Mn} 和 DOC 相互补充, 可以对水体中的有机污染物质量浓度作更全面的表达。实验期间 A 和 B 两组工艺各单元出水 COD_{Mn} 和 DOC 质量浓度见图 3、4。



(a) A 组



(b) B 组

图 3 各水处理单元出水 COD_{Mn}

由图 3 可以看出, A 组沉淀工艺对 COD_{Mn} 平均去除率为 29.3%, 而 B 组气浮工艺对 COD_{Mn} 平均去除率为 34.7%; 两套工艺中砂滤和 O_3 -BAC 单元对 COD_{Mn} 的去除效果差别不大, COD_{Mn} 平均

去除率分别为 14.3%和 56.3%;A 和 B 两组工艺对 COD_{Mn}的总去除率分别达 74.6%和 79.0%.

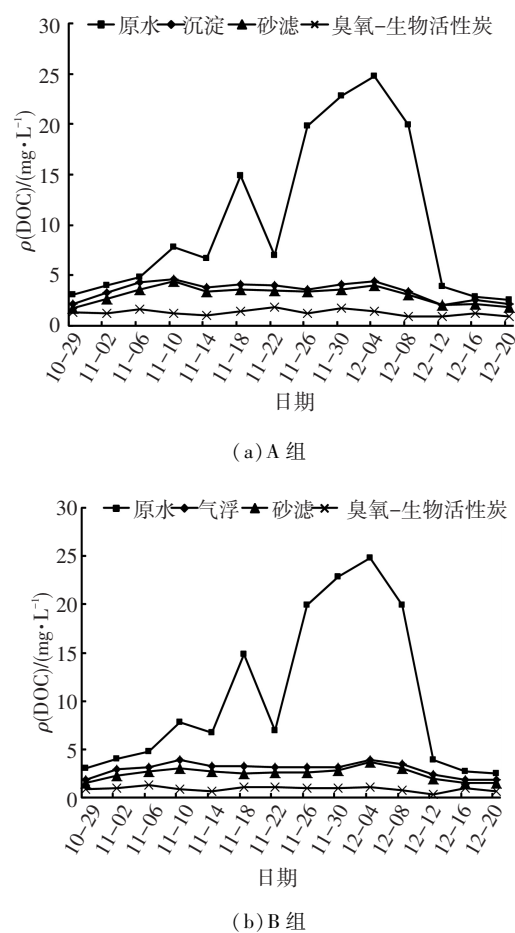


图 4 各水处理单元出水 DOC

由图 4 可以看出,两套工艺各处理单元对 DOC 的去除变化趋势基本与 COD_{Mn}类似,但 DOC 的去除效果要优于 COD_{Mn}.A 组沉淀工艺对 DOC 平均去除率为 50.3%,而 B 组气浮工艺 DOC 平均去除率为 51.9%;砂滤和 O₃-BAC 单元对 DOC 的平均去除率分别为 3.8%和 61.3%;A、B 两组工艺对 DOC 的总去除率分别达 80.6%和 82.5%.

比较各处理单元对 COD_{Mn}和 TOC 的去除效能可知,气浮工艺对有机物的去除效果稍强于沉淀工艺,无论对 A 组还是 B 组,沉淀/气浮和 O₃-BAC 单元均对水中有机物的去除起主要控制作用,且受进水水质波动影响较小.两套工艺深度处理后出水 COD_{Mn}稳定在 0.5~2.1 mg/L,DOC 稳定在 0.3~2.0 mg/L,满足生活饮用水卫生标准 (GB5749—2006) 中规定的出水 COD_{Mn}不得超过 3 mg/L、TOC 不得超过 5 mg/L 的要求.

2.3 对荧光强度的去除效果对比

三维荧光光谱 (EEM) 以特征荧光峰中心最大荧光强度 (FI) 作为表征水中某类溶解性有机物含量的指标,与传统表征有机物含量的水质参

数相比,不仅能反映有机物的浓度,还可以提供有机物组成成分信息,具有快速、高灵敏度、高选择性、预处理简单、所需样品少及不会破坏样品结构等特点^[6-7].根据各种溶解有机质 (DOM) 的 E_x/E_m 荧光峰位置,三维荧光光谱通常可以分为 5 个区:第 I 区 (E_x/E_m = 220~250 nm/60~330 nm) 和第 II 区 (E_x/E_m = 220~250 nm/330~380 nm) 均为芳香族蛋白质荧光;第 III 区 (E_x/E_m = 220~250 nm/380~500 nm) 为类富里酸荧光;第 IV 区 (E_x/E_m = 250~400 nm/260~380 nm) 为溶解性微生物类代谢产物荧光;第 V 区 (E_x/E_m = 250~400 nm/380~500 nm) 为类腐殖酸荧光^[8].实验期间 A 和 B 两组工艺各单元出水三维荧光光谱图及对应的 FI 值见图 5,6.可以看出,沉淀/气浮及砂滤工艺对荧光物质去除率很低,其中砂滤后出水微生物溶解性蛋白含量反而提高,这可能是砂滤池受到异养性微生物的污染导致有机氮泄漏的缘故.而 O₃-BAC 能有效去除有机氮及腐殖酸,但对富里酸的去除率较低,A 组和 B 组对应的 O₃-BAC 工艺对微生物溶解性蛋白的去除率分别为 74.16%和 72.01%,对芳香性蛋白的去除率为 78.34%和 83.06%,对腐殖酸的去除率为 80.45%和 81.48%,对富里酸的去除率则相对较低,分别为 39.78%和 40.15%.

总体上看,沉淀/气浮工艺只对腐殖质略有去除效果,砂滤对荧光物质几乎无去除作用,而 O₃-BAC 工艺是去除水中荧光类物质的主要手段,其原因是在 O₃-BAC 联用工艺中,O₃ 能有效地将大分子有机物氧化分解为小分子有机物,而小分子有机物则被活性炭吸附或炭层中微生物降解,两者在去除不同分子质量的有机物过程中存在较好的互补性^[9].

2.4 对藻类的去除效果对比

利用荧光脉冲检测器 (PAM) 可以方便快捷地研究藻类的光合作用,其中光合活性表示细胞色素有效利用所吸收光能的效率,活性高说明细胞生长旺盛,活性低则表明细胞可能受到某种胁迫或者处于衰亡期,从而判别细胞的生存状态;而叶绿素浓度可间接表征藻类的浓度.A 和 B 组工艺各单元出水藻类的光合活性和叶绿素浓度去除效果如图 7 所示.可以看出,各工艺对藻类活性均有一定的去除作用,O₃-BAC 工艺是去除藻类活性的主要作用单元.A 组和 B 组工艺深度处理后出水的硅藻活性分别由 0.36 和 0.33 降至 0,蓝藻活性由 0.48 和 0.51 降至 0.21 和 0.15,表明常规 +O₃-BAC 出水对硅藻活性的抑制效果高于蓝藻.

常规处理工艺对叶绿素已有较好的去除效果,A组和B组砂滤出水蓝藻叶绿素的去除率分别达97.87%和97.89%,硅藻叶绿素的去除率分别达91.58%和96.31%,而经O₃-BAC后出水蓝藻和硅藻叶绿素浓度已低于检出限,表明经常规+O₃-BAC处理工艺后出水藻类可基本完全去除.

对比A和B组工艺可知,气浮工艺对藻类的去除效果略优于沉淀工艺.这是因为对于低温低浊的含藻水,水中泥沙颗粒较少,混凝生成的絮体密度较低,故沉降较慢,出水效果不佳;而气浮工艺形成的微小气泡有利于黏附絮体颗粒上浮,从而达到良好的除藻效果^[10-11].

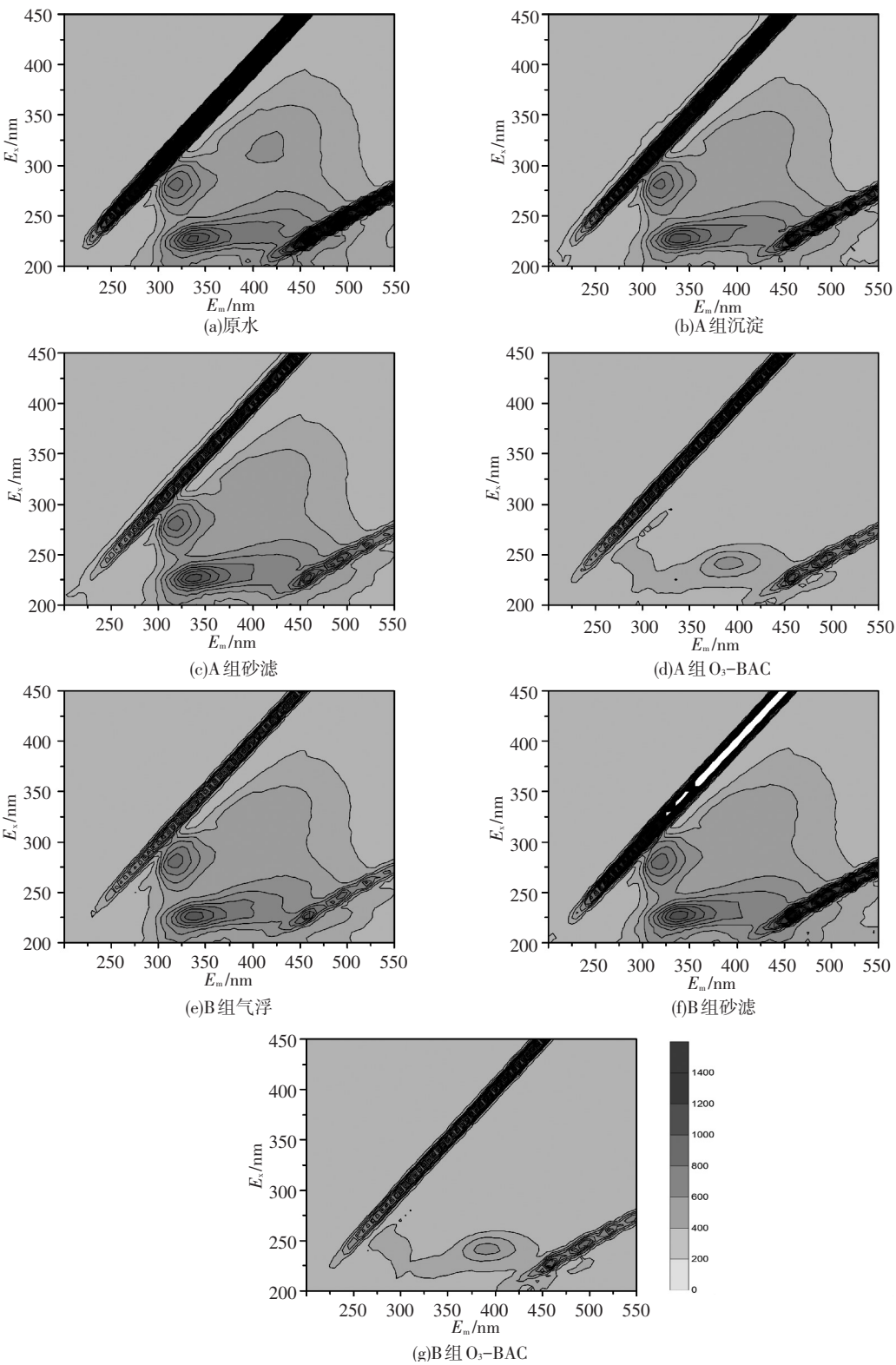


图 5 各单元出水 EEM 图

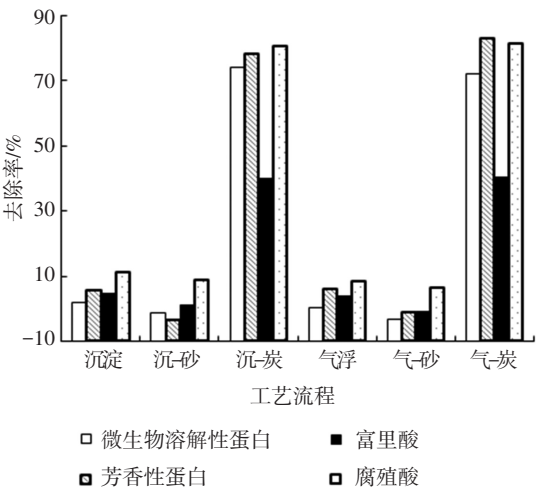


图 6 各工艺对荧光强度(FI)的去除效果

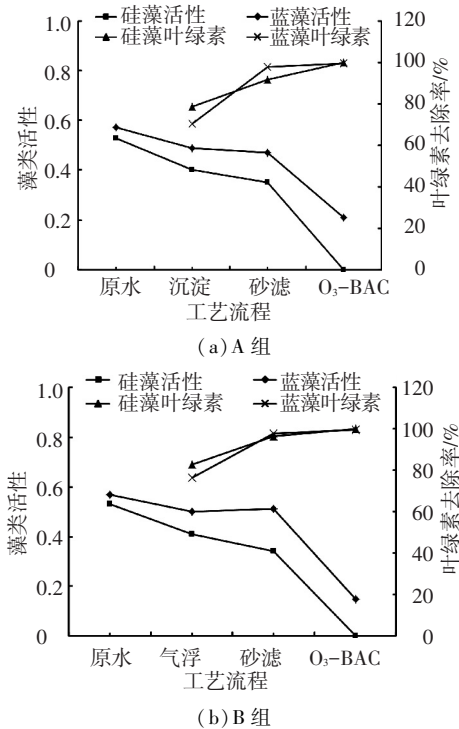


图 7 各工艺出水藻类活性及叶绿素去除效果

3 结 论

- 1) 针对低温东太湖源水,气浮工艺对原水浊度的去除效果明显优于沉淀工艺,平均去除率高 10.1%。无论是气浮还是沉淀工艺,经 O₃-BAC 深度处理后出水浊度均稳定在 1 NTU 以下,满足饮用水卫生标准规定的出水浊度要求。
- 2) 从有机物的去除效果看,气浮工艺略优于沉淀工艺,COD_{mn}和 DOC 的平均去除率分别高 5.4%和 1.6%。常规工艺出水 COD_{mn}和 DOC 并不能满足要求。因此,O₃-BAC 工艺对控制稳定出水有机物含量不可缺少,两套工艺深度处理后出水 COD_{mn}稳定在 0.5~2.1 mg/L,DOC 稳定在0.3~2.0 mg/L。
- 3) 沉淀/气浮工艺只对腐殖质略有去除效

- 果,砂滤对荧光物质几乎无去除作用,而 O₃-BAC 工艺是去除水中荧光类物质的主要手段。气浮工艺对藻类的去除效果略优于沉淀工艺,深度处理后出水硅藻活性和叶绿素浓度降为 0,蓝藻仍保有部分活性。
- 4) 总体上看,气浮工艺对太湖水的处理效果优于沉淀工艺,且节约了混凝剂投药量,但气浮池的汽水比难以控制,管理较复杂。在以湖泊水为水源水的中小水厂新建或改建中可考虑采用自动控制汽水比的气浮池,严格控制投药量,有利于后续工艺的运行。
- 参考文献
- [1] 刘丽娟,汪琳,李明玉,等. 不同混凝剂强化除藻、除浊的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5): 80-83.
 - [2] EDZWALD J K. Principles and applications of dissolved air flotation[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(34): 1-24.
 - [3] 胡澄澄,高乃云,楚文海.沉淀与气浮工艺单元处理太湖原水的效果比较[J]. 给水排水, 2010, 36(2): 13-16.
 - [4] BRAUL L, VIRARAGHAVAN T, CORKAL D. Cold water effects on enhanced coagulation of high DOC, low turbidity water[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2001, 36(4): 70-717.
 - [5] 霍明昕,刘鬃远. 低温低浊水质特性的分析[J]. 中国给水排水, 1998, 14(6): 33-34.
 - [6] COBLE P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation emission matrix spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 1996, 51(4): 325-346.
 - [7] COBLE P G, GREEN S A, BLOUGH N V, et al. Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy [J]. Nature, 1990, 348: 432-435.
 - [8] 廖日红,战楠,申颖洁,等. 活性炭吸附受污染河水中有机的三维荧光分析[J]. 中国给水排水, 2011 (1): 92-95.
 - [9] 韩帮军,马军,陈忠林,等. 臭氧催化氧化与 BAC 联用控制氯化消毒副产物[J]. 给水排水,2006,22(17): 18-23.
 - [10] HENDERSON R K, PARSONS S A, JEFFERSON B. Successful removal of algae through the control of zeta potential[J]. Separation Science and Technology, 2008, 43(7): 1653-1666.
 - [11] HENDERSON R K, PARSONS S A, JEFFERSON B. Surfactants as bubble surface modifiers in the flotation of algae: dissolved air flotation that utilizes a chemically modified bubble surface [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(13): 4883-4888.