

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响

张大为^{1,2}, 徐慧^{2*}, 王希², 门彬², 王东升², 段晋明¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 为了保证藻类暴发阶段优质的饮用水供应, 提高藻类的去除率, 缓解藻类对水处理过程的影响, 本研究以铜绿微囊藻(蓝藻)、小球藻(绿藻)和小环藻(硅藻)这3种不同形态藻细胞为研究对象, 使用了3种具有不同铝形态分布的混凝剂[$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (AS)、 Al_{13} 、 Al_{30}]进行混凝-超滤实验。在分离胞外有机物(EOM)的情况下, 考察混凝过程中絮体的特性(粒径、强度因子、恢复因子)以及不同条件下形成的絮体对膜通量的影响。结果表明 Al_{13} 与 Al_{30} 的混凝作用以静电簇作用为主导, AS主要是以电中和作用为主导。对于铜绿微囊藻与小球藻体系, 由于藻颗粒表面存在一定的凹陷, 当 Al_{13} 与 Al_{30} 做混凝剂时, 在投加量较低的情况下, 吸附在颗粒表面凹陷处的混凝剂“失活”, 其他部位由于仍带有一定的负电荷而造成絮体形成不明显, 而AS做混凝剂时, 混凝机制主要是电中和作用, 可以明显降低颗粒之间的排斥力, 在较低投加量下即可形成絮体。对于小环藻体系, 由于其藻细胞呈现光滑的表面, Al_{13} 与 Al_{30} 可有效发挥其静电簇作用机制, 絮体在较低投加量下即可有效形成。膜通量与絮体粒径有明显的相关性, 絮体粒径越大, 超滤过程中形成的沉积层越疏松, 膜比通量越大。

关键词: 藻形态; 铝形态; 混凝-超滤; 静电簇; 膜污染

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3281-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201701130

Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process

ZHANG Da-wei^{1,2}, XU Hui^{2*}, WANG Xi², MEN Bin², WANG Dong-sheng², DUAN Jin-ming¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to ensure drinking water quality, three different Al-based coagulants [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (AS), Al_{13} , Al_{30}] were used to treat water laden with different algae [*Microcystis aeruginosa* (cyanobacteria), *Chlorella* (green algae), *Cyclotella* (diatoms)]. Floc size, strength factor, and recovery factor under different conditions were measured to investigate the mechanisms in the coagulation-ultrafiltration process. The results indicated that the main mechanism in the coagulation process using Al_{13} or Al_{30} as coagulants was electrostatic patching and the main mechanism using AS was charge neutralization. In the *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella* systems, when Al_{13} and Al_{30} were used as coagulants at low dosage, the coagulants that were adsorbed on the side (which existed on the surfaces of *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella* cells) would lose their ability to aggregate the algal cells. When AS was used as coagulant, the electric double layer was effectively compressed. The repulsive force between algal particles decreased, and the flocs formed easily. In the *Cyclotella* system, Al_{13} and Al_{30} coagulants effectively formed the flocs through electrostatic patch effects. There was a significant correlation between membrane flux and floc size, and the larger flocs formed a looser cake layer on the membrane surface.

Key words: algal morphology; Al species distribution; coagulation-ultrafiltration; electrostatic patch effects; membrane fouling

近年来,日益严重的水体富营养化问题已成为全球性的环境问题。水体的富营养化会导致水体中藻类的大量生长繁殖,不仅会破坏水体的生态平衡,而且会严重地干扰水处理过程^[1]。例如,原水中的大量藻类会堵塞滤床、恶化水质、堵塞或腐蚀管道、增大混凝剂投加量^[2]、产生臭味、藻毒素^[3]以及消毒副产物的前驱物^[4]等。

目前国内大多数水厂仍然采用传统的混凝-沉淀-过滤-消毒工艺^[5],然而常规的净水工艺主要以去除水中颗粒物为主,通常不能有效净化含藻水体。以超滤为核心的组合工艺是代替传统工艺的最佳选

择之一,超滤膜技术能有效去除水体中的悬浮颗粒病原体以及内分泌干扰物等^[6,7]。然而,藻类引起严重的膜污染问题是限制超滤技术在高藻水处理应用中最大障碍。预处理技术被认为是降低膜污染的有效途径,常用的预处理技术有混凝预处理、氧化预处理、吸附预处理等^[8~11]。预氧化过程可能使藻细

收稿日期: 2017-01-16; 修订日期: 2017-03-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51338010); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51608515); 国家自然科学基金项目(21677156)

作者简介: 张大为(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为污水的物理化学处理技术, E-mail: zhangdawei9375@126.com

* 通信作者, E-mail: huixu@rcees.ac.cn

胞破碎,释放藻类胞内有机物,导致饮用水的生物安全性降低以及消毒副产物的增加,威胁人类健康^[4]. 混凝预处理技术操作简便、成本低廉、绿色环保、并且能有效提高出水水质,因此,混凝作为超滤过程的预处理技术得到了越来越多的应用,并且混凝效率直接影响着出水水质,进而影响超滤过程. 有研究表明,混凝剂的 Al 形态对于混凝-超滤过程具有重要影响,Al₁₃ 可产生粒径较大的絮体,且形成的絮体具有较大的强度与密实度,膜通量达到最优条件时,Al₁₃ 投加量较聚合氯化铝(PACl)有明显的下降^[12~14]. 并且藻类胞外有机物(EOM)种类对混凝-超滤过程同样有着重要影响,Qu 等^[15]的研究表明 EOM 的主要组成是高分子量以及亲水性的有机物,包括蛋白质、多糖以及腐殖酸类物质. EOM 可引起严重的膜污染,疏水性有机物会吸附在膜表面形成不可逆污染,同时滤饼层含有的亲水性有机物可导致快速的膜污染. Zhou 等^[16]的研究表明不可逆污染随 pH 值的下降而上升,Ca²⁺ 的存在可导致严重的通量下降及不可逆污染.

综上所述,目前关于藻类有机物种类和混凝剂种类对混凝-超滤过程的研究已经较为充分,但是对于不同形态藻细胞对混凝-超滤过程的影响机制的阐述并不充分. 因此,本研究以实验室配置的高藻水为实验原水,以 3 种不同形态藻细胞为处理对象,分析了不同的混凝剂对 3 种形态藻细胞的去除效率以及出水对超滤膜污染的机制,以期水厂在藻类暴发阶段保证优质的饮用水供应提供指导.

1 材料与方法

1.1 主要实验仪器

浊度仪(2100N, Turbidimeter, HACH, USA); pH 计(MP220, pH Meter, Mettler-Toledo, Switzerland); UV-8500 紫外/可见分光光度计(上海天美公司); 马尔文激光粒度分析仪(Laser Particle Analyzer, Mastersizer 2000, Malvern, UK); MY3000-6G 智能型混凝搅拌机(武汉梅宇有限公司); 扫描电子显微镜(HITACHI SU8020 FE-SEM, Japan); 高速冷冻离心机(Aantij26XP, Beckman Coulter, Inc. USA).

1.2 藻种培养及水样配置

1.2.1 藻种培养

铜绿微囊藻(蓝藻)、小球藻(绿藻)、小环藻(硅藻)均购置于中国科学院武汉水生生物研究所. 铜绿微囊藻和小球藻采用 BG11 培养基进行培养,

小环藻采用 CSI 培养基进行培养,无菌条件下接种至玻璃锥形瓶中,放在人工气候箱中培养,培养条件:温度 25℃ ± 1℃,光照强度 2 000 lx,光暗比(L:D) = 12h: 12h. 定期进行细胞计数,绘制藻类生长曲线,待藻种达到稳定期后用于实验.

1.2.2 藻细胞的分离

为了更好地保持藻细胞的完整性以及高效分离藻的胞外有机物,选择分离方法为^[17]:将原藻液置于高速冷冻离心机中,设置离心温度 4℃,4 000 r·min⁻¹,时间 5 min,待离心完成后上清液即为藻类胞外溶解性有机物;使用 0.6% NaCl 溶液将离心管底藻细胞重新溶解,40℃ 水浴加热 20 min 再次离心,设置离心温度 4℃,离心力 10 000 r·min⁻¹,时间 15 min,待离心完成后上清液即为藻类胞外黏附性有机物;再次使用 0.6% NaCl 溶液将离心管底藻细胞重新溶解即可得到实验所需裸藻细胞.

1.2.3 水样配置

藻类的藻细胞密度与悬浮液在 680 nm 处的吸光度具有良好的线性关系^[18],因此本研究以含藻水在 680 nm 处的吸光度值作为藻细胞密度的度量标准. 为方便藻细胞之间对比,3 种藻细胞均用去离子水稀释至 680 nm 处的吸光度值为 0.300,并加入 5.0 mmol·L⁻¹ NaNO₃ 和 4.0 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 提供离子强度和碱度,使用盐酸(0.1 mmol·L⁻¹)和氢氧化钠(0.1 mmol·L⁻¹)溶液调节 pH = 8.5.

1.3 混凝剂的选择

本实验选用 Al₂(SO₄)₃、Al₁₃ 以及 Al₃₀ 这 3 种铝系混凝剂. 采用 Ferron 络合比色法对混凝剂中铝形态分布进行测定^[19],Ferron 逐时络合比色法将聚合铝中铝的形态分为:单体态 Al_a (反应时间 < 1.0 min)、Al_b (反应时间在 1 ~ 120 min)、Al_c (不反应). 本实验所用混凝剂的 Ferron 表征结果见表 1.

由表 1 可看出,实验所用混凝剂有不同的铝形态分布,其中硫酸铝主要成分为 Al_a, Al₁₃ 主要成分主要为 Al_b, Al₃₀ 的主要成分主要为 Al_c.

表 1 实验所用混凝剂的 Al 形态分布/%

Table 1 Al coagulant species used in this study/%			
项目	Al _a	Al _b	Al _c
Al ₂ (SO ₄) ₃	95.48	2.93	1.59
Al ₁₃	2.93	95.94	1.13
Al ₃₀	6.84	11.92	81.24

1.4 实验方法

1.4.1 混凝实验

使用六联混凝搅拌机进行烧杯实验,加入混凝

剂后以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 快速搅拌 90 s, $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 慢速搅拌 10 min, 沉淀 30 min 后于上清液下 2.0 cm 处取样测量浊度及藻细胞吸光度值, 计算浊度以及藻细胞的去除率。

1.4.2 超滤实验

在 3 种藻体系中, 分别选择在 3 种混凝剂的最佳投加量下进行超滤实验, 并且选择在混凝结束后不经沉淀直接进行超滤实验。超滤杯购自 Millipore, 型号为 Amicon 8400。平板超滤膜 (100×10^3) 购自安德膜科技有限公司 (北京), 材质为聚偏氟乙烯 (PVDF)。超滤实验过程中, 固定压力为 0.1 MPa, 超滤时间为 1 800 s。超滤过程结束后, 将 PVDF 膜自然干燥, 使用扫描电子显微镜对膜表面情况进行分析。

1.4.3 絮体特征

为了更好地了解每种混凝剂的作用机制, 本实验使用马尔文激光粒度仪对絮体形成过程进行在线监测, 以 $D_{50} (\mu\text{m})$ 代表絮体的平均粒径。并且针对已形成的絮体增大搅拌强度至 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ (持续 5.0 min), 随后再次以 $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速 (持续 10 min) 使絮体再生, 考察絮体的强度因子和恢复因子^[20,21]。

2 结果与讨论

2.1 藻细胞扫描电镜图

为了更好地考察藻细胞形态对于混凝过程的影响, 对于 3 种藻细胞分别进行了扫描电镜观察, 实验结果见图 1。



图 1 实验所选藻细胞扫描电镜形貌

Fig. 1 SEM image of the algal particles used in this study

实验结果表明, 铜绿微囊藻藻细胞粒径较小 (700 nm 左右), 且细胞表面存在一定的凹陷, 小球藻与小环藻细胞粒径较大 (大于 $1 \mu\text{m}$), 小球藻表面也存在凹陷。

2.2 投加量对混凝过程的影响

为了考察混凝剂投加量对藻细胞及浊度去除率的影响, 调节 3 种混凝剂的投加量 (以 Al 计) 从 $0.02 \sim 0.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 实验结果见图 2。

由图 2 可以发现, 对于铜绿微囊藻和小球藻体系, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 在投加量达到 $0.04 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 即可达到最佳的混凝效果 (浊度去除率与藻细胞去除率接近 90%)。当 Al_{13} 作混凝剂时, 投加量达到 $0.06 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 才能达到相同的浊度与藻细胞去除率。当使用 Al_{30} 作混凝剂时, 两种藻细胞体系的浊度以及藻细胞去除率均无法达到上述两种混凝剂的去除率 (铜绿微囊藻在 80% 左右, 而小球藻在 70% 左右)。分析原因在于 Al_{13} 与 Al_{30} 主要的作用机制是静电簇作用^[22], 而 AS 的主要作用机制是电中和作用^[23] (图 3)。当 Al_{13} 与 Al_{30} 做混凝剂时, 处于凹陷部分的

Al_{13} 与 Al_{30} 分子的静电簇作用减弱, 而其他能产生有效碰撞的部位仍具有较多的负电荷, 此时电中和作用占主导的 AS (有效降低颗粒之间的排斥作用) 可使藻细胞颗粒有效结合。而在小环藻体系中, 由于小环藻细胞表面较为光滑 (图 1), Al_{13} 与 Al_{30} 的静电簇作用机制可以得到有效发挥, Al_{13} 与 Al_{30} 在较低投加量下可有效去除藻细胞。为便于对比, 在接下来的实验过程中选择 3 种混凝剂的最佳投加量进行实验。

2.3 膜比通量 (J/J_0)

本实验以膜比通量 J/J_0 表示膜污染程度, 其中 J_0 为初始膜通量, 膜比通量越大, 表明膜污染越轻, 不同条件下的膜比通量结果见图 4。

由图 4 可以得出, 3 种藻在不经混凝作用直接过膜时, 由于藻本身的性质, 其造成的膜污染差异较大。1 800 s 内铜绿微囊藻引起的膜比通量下降为 0.065, 小球藻引起的膜比通量下降为 0.643, 小环藻引起的膜比通量为 0.114。由于实验本身所用的 3 种藻细胞粒径远大于超滤膜孔径, 所以较大的藻

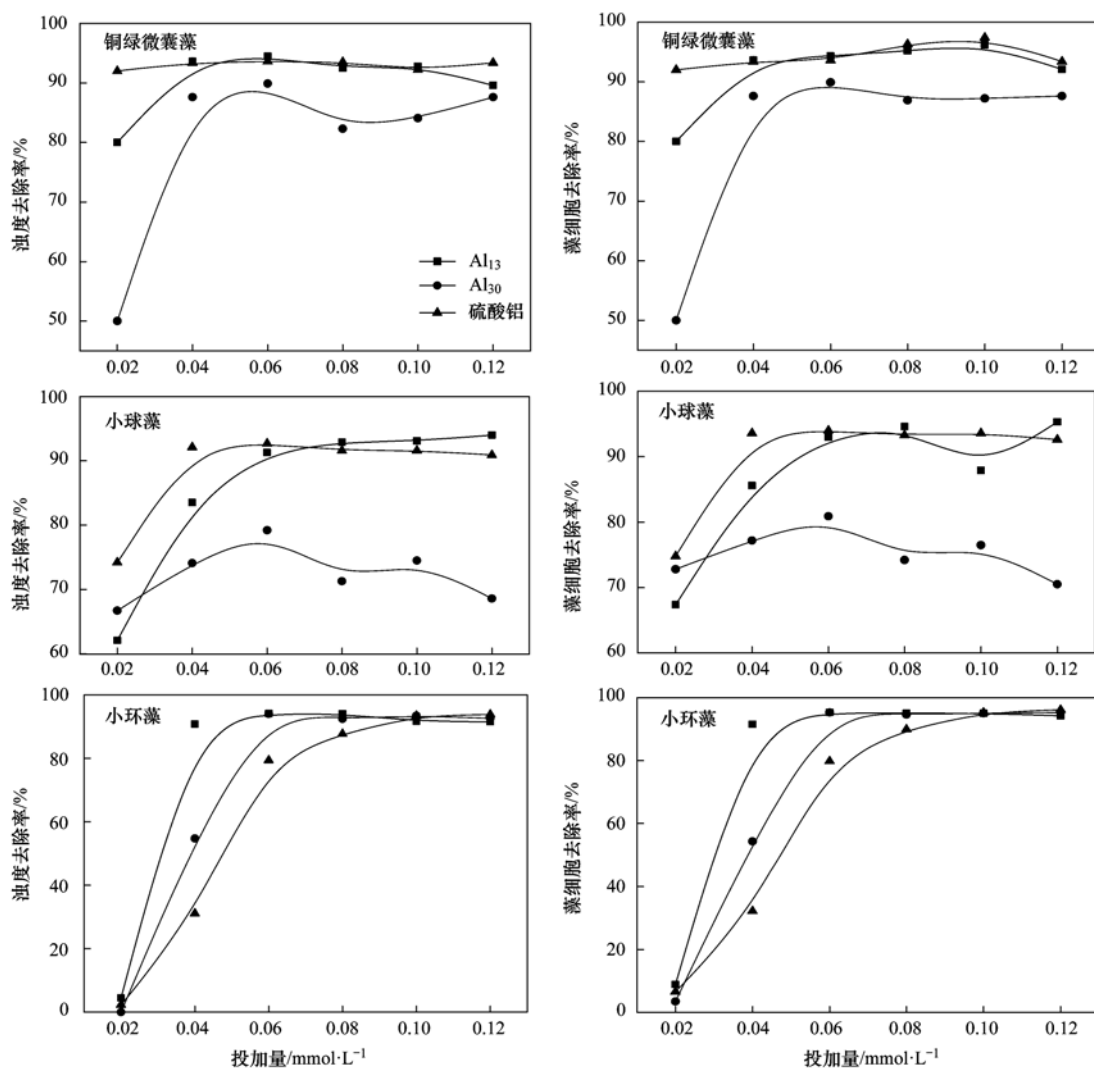


图2 混凝剂投加量对混凝效果的影响

Fig. 2 Effects of coagulant dosage on coagulation performance

细胞本身并不会堵塞膜孔,引起超滤膜污染的主要方式为藻细胞沉积层. 铜绿微囊藻由于本身体积较小,形成的沉积层较为密实,因而膜比通量下降程度相对比较大.

另外,3种藻细胞在经过混凝剂作用后,在过膜时引起的膜比通量得到了明显的提升. 在铜绿微囊藻体系中,经过 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 Al_{13} 和 Al_{30} 这3种混凝剂作用后,1800 s内膜比通量分别提升至0.751、0.698和0.67. 在小球藻体系中,1800 s内膜比通量分别提升至0.871,0.854和0.849. 在小环藻体系中,1800 s内膜比通量分别提升至0.462、0.704和0.685. 在铜绿微囊藻和小球藻体系中, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 对膜污染缓解程度大于 Al_{13} 和 Al_{30} 混凝剂形成的絮体,而对于小环藻体系, Al_{13} 和 Al_{30} 混凝剂形成的絮体可更有效地缓解膜污染. 由于在3种

藻体系中有有机物已经得到了分离,因此经混凝作用后影响膜污染的主要因素为絮体性质,不同作用条件下絮体的特性将在2.4节中进行详细分析.

2.4 絮体性质

3种藻在不同混凝剂作用下形成的絮体的性质,是超滤过程中膜污染的主要影响因素. 因此,考察絮体的形成、破碎和再生长过程对于了解膜污染机制,有效控制膜污染具有重要的意义,混凝过程中絮体粒径变化情况见图5.

由图5可以看出,在铜绿微囊藻和小球藻体系中, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 混凝剂形成的絮体平衡时粒径分别达到了750 μm (铜绿微囊藻)和350 μm (小球藻),而 Al_{13} 和 Al_{30} 混凝剂形成的絮体分别为420 μm 、220 μm (铜绿微囊藻)和240 μm 、150 μm (小球藻). 而在小环藻体系中,平衡时絮体粒径分

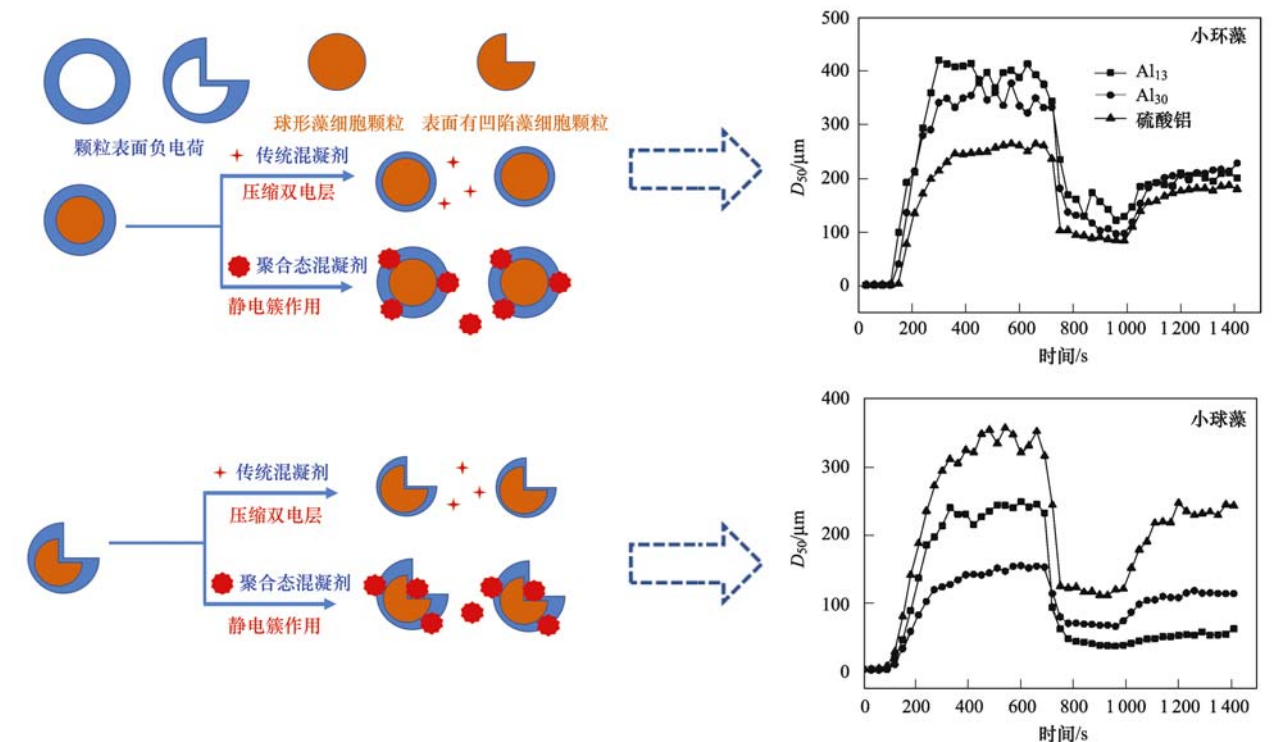


图 3 3 种藻混凝过程的机制

Fig. 3 Brief mechanism of the coagulation process in the three algal systems

别为 250 μm (AS)、400 μm (Al₁₃) 和 350 μm (Al₃₀)。与 2.2 节中的分析类似,对于铜绿微囊藻以及小球藻体系,AS 的电中和作用使得藻细胞颗粒可以更加有效地接触,快速形成肉眼可见的絮体,而 Al₁₃ 与 Al₃₀ 的静电簇作用由于表面凹陷的存在而受到一定的影响。

不同条件下形成絮体的强度因子及恢复因子见表 2。

项目	强度因子/%			恢复因子/%		
	Al ₁₃	Al ₃₀	Al ₂ (SO ₄) ₃	Al ₁₃	Al ₃₀	Al ₂ (SO ₄) ₃
铜绿微囊藻	36.1	43.4	64.2	29.2	50.3	80.7
小球藻	18.2	38.6	39.5	6.7	49.2	55.1
小环藻	36.7	36.1	35.2	23.5	38.9	55.5

由表 2 可以得出,在铜绿微囊藻体系和小球藻体系中,Al₂(SO₄)₃ 混凝剂形成的絮体强度因子达到 64.2% 和 39.5%,而 Al₁₃ 和 Al₃₀ 混凝剂形成的絮体强度因子为 36.1%、18.2% 和 43.4%、38.6%。结合膜通量的实验可以发现,在同一种藻体系中,强度因子越大的絮体,在超滤过程抗压力能力越强,从而使得絮体之间越疏松,膜表面沉积层越疏松,膜比通量越大。而在小环藻体系中,Al₁₃ 和 Al₃₀ 混凝剂形成絮体强度因子分别达到 36.7% 和 36.1%,略大于 Al₂(SO₄)₃ 混凝剂形成的絮体的强度因子(35.2%)。另外,对比铜绿微囊藻、小球藻和小环藻 3 种藻体系,Al₂(SO₄)₃ 混凝剂形成絮体的恢复

因子分别达到 80.7%、55.1% 和 55.5%,而 Al₁₃ 和 Al₃₀ 混凝剂形成的絮体恢复因子为 29.2%、6.7%、23.5% 和 50.3%、49.2%、38.9%。Al₂(SO₄)₃ 混凝剂形成的絮体相比于 Al₁₃ 和 Al₃₀ 混凝剂形成的絮体拥有更好的再生能力,此结果与前人的结果一致^[21,24,25],即电中和作用所形成的絮体粒径更易在絮体恢复过程中得到恢复。

2.5 膜表面扫描电镜图

为了更好地分析膜污染的过程,使用扫描电子显微镜对自然干燥后的膜(直接过滤藻细胞)表面进行了分析,实验结果见图 6。

从图 6(a) 可以看出,原始 PVDF 膜表面膜孔

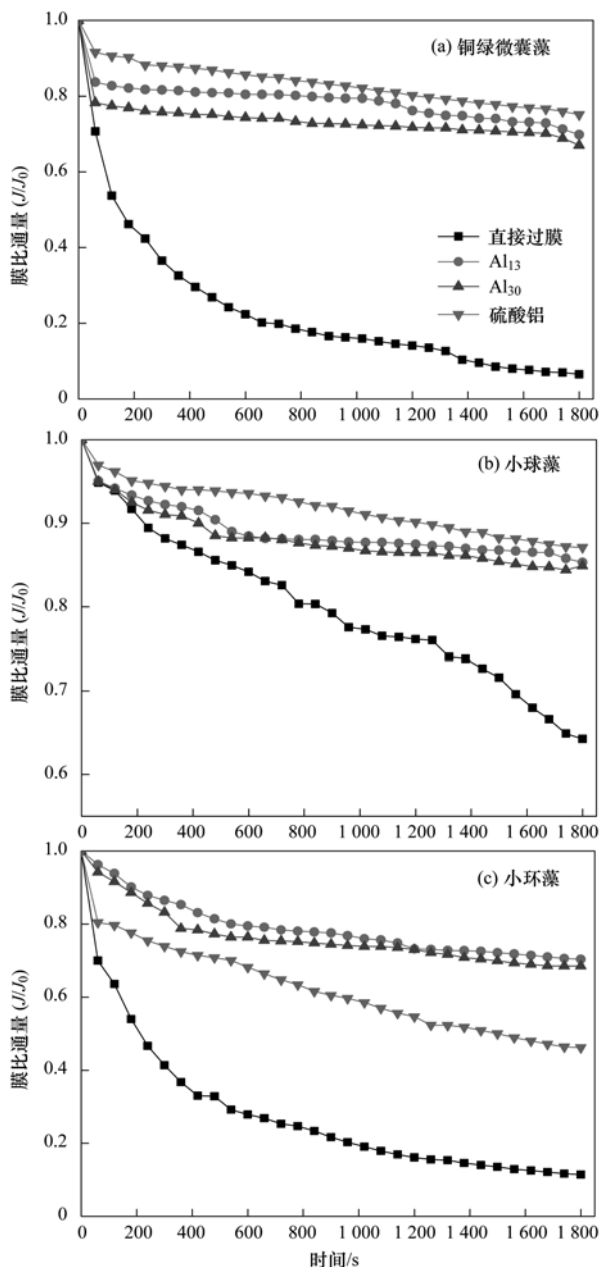


图4 3种藻在不同混凝剂作用下引起的膜比通量

Fig. 4 Membrane specific fluxes for the three kinds of algae with the different coagulants

明显,在3种藻直接过膜后,膜表面形成了藻细胞的沉积层.图6(c)中小球藻形成的沉积层之间缝隙比图6(b)中铜绿微囊藻形成的沉积层缝隙和图6(d)中小环藻形成的沉积层缝隙更为明显,因而在3种藻不经混凝作用直接过膜时,小球藻在1800 s内仍有较高的膜比通量(0.643),而此时铜绿微囊藻和小环藻直接过膜后膜比通量仅有0.065和0.114.

过滤经混凝剂处理后的藻细胞悬浮液且自然风干的膜表面的扫描电镜结果见图7.

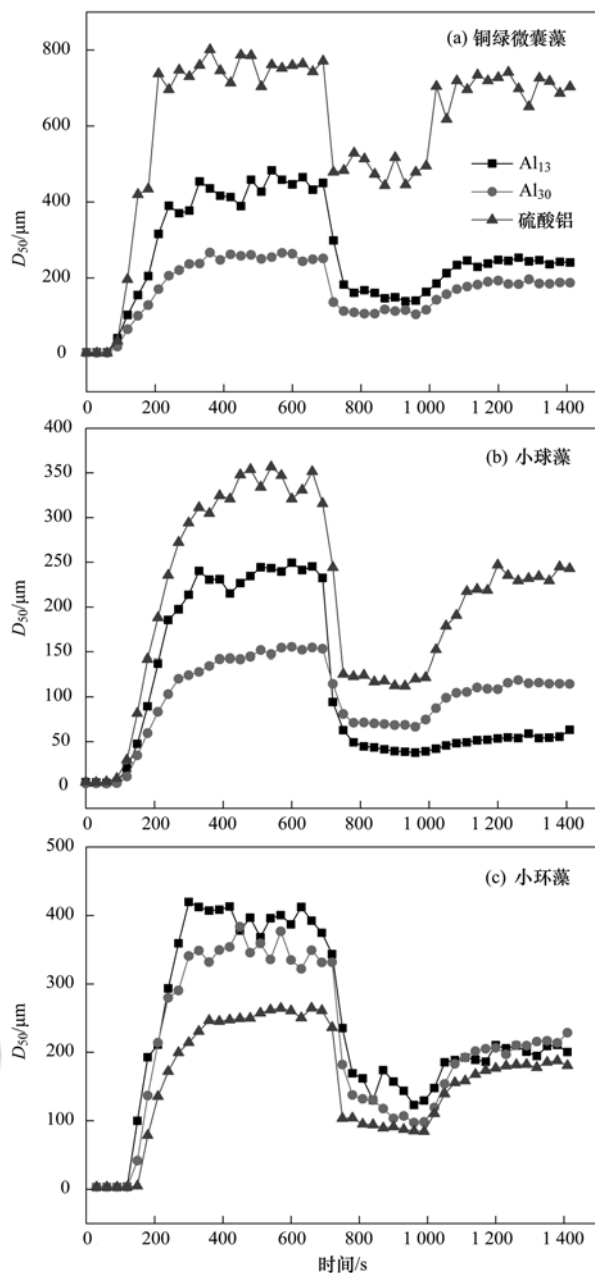


图5 3种藻在不同混凝剂作用下形成的絮体粒径变化

Fig. 5 Floc size of the three kinds of algae using the different coagulants

由图7可以发现,对于铜绿微囊藻体系,在AS做混凝剂时可明显形成絮体,而使用 Al_{13} 与 Al_{30} 做混凝剂时絮体形成不明显,在膜表面仍然会形成致密的污染层,导致膜通量下降较快.同样对于小球藻体系,当使用AS做混凝剂时可以在膜表面形成比较明显的污染层,而 Al_{13} 以及 Al_{30} 由于絮体形成不明显,使得膜表面污染层较为致密,通量下降较快.而对于小环藻体系,当使用AS做混凝剂时,絮体形成不明显,造成膜比通量下降最快(1800 s后下降为0.462).

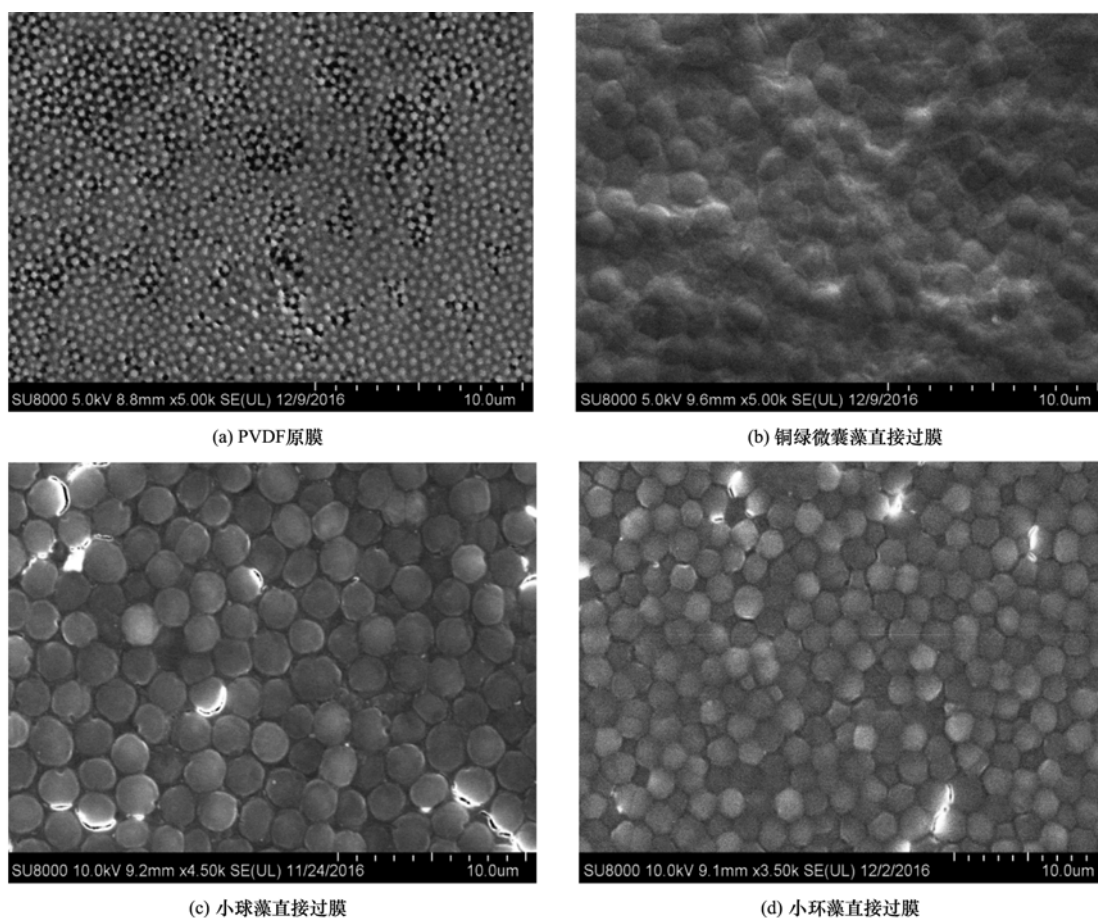


图6 膜表面扫描电镜图(直接过滤原始藻液)

Fig. 6 SEM images of the membrane surface-filtration of raw water samples

3 结论

(1) 3种藻细胞具有不同的粒径与形貌,铜绿微囊藻细胞粒径为700 nm左右,而小球藻和小环藻的细胞粒径大于1 μm 。铜绿微囊藻与小球藻的细胞表面存在一定的凹陷,而小环藻的细胞则较为光滑。

(2) 对于表面有凹陷的藻细胞而言, Al_{13} 与 Al_{30} 的静电簇作用机制由于某一部分混凝剂被吸附在凹陷处而受到影响,而此时电中和作用占主导的AS(有效降低颗粒之间的排斥作用)可使藻细胞颗粒有效结合。

(3) 在铜绿微囊藻和小球藻体系中,AS对膜污染缓解程度大于 Al_{13} 和 Al_{30} 混凝剂形成的絮体,而对于小环藻体系, Al_{13} 和 Al_{30} 混凝剂形成的絮体可更有效地缓解膜污染。

(4) 在铜绿微囊藻和小球藻体系中,AS形成的絮体具有较大的强度因子,絮体的抗压能力较强,在超滤过程中容易形成较为疏松的滤饼层,膜比通量较大。在小环藻体系中, Al_{13} 与 Al_{30} 形成的絮体强度因子略大于AS形成的絮体,膜比通量较大。

参考文献:

- [1] Plummer J D, Edzwald J K. Effect of ozone on algae as precursors for trihalomethane and haloacetic acid production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35** (18): 3661-3668.
- [2] 彭海清, 谭章荣, 高乃云, 等. 给水处理中藻类的去除[J]. *中国给水排水*, 2002, **18** (2): 29-31.
Peng H Q, Tan Z R, Gao N Y, *et al.* Removal of algae in water treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2002, **18** (2): 29-31.
- [3] 黄艺, 张郅灏. 微囊藻毒素的致毒机理和人体健康风险评估研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, **22** (2): 357-364.
Huang Y, Zhang Z H. Advances in the study of toxicology and human health risk assessment of microcystin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22** (2): 357-364.
- [4] 方晶云, 马军, 王立宁, 等. 臭氧预氧化对藻细胞及胞外分泌物消毒副产物生成势的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27** (6): 1127-1132.
Fang J Y, Ma J, Wang L N, *et al.* Effect of preozonation on disinfection by-products formation potential of algae cells and extracellular organic matter[J]. *Environmental Science*, 2006, **27** (6): 1127-1132.
- [5] Jiao R Y, Chow C W K, Xu H, *et al.* Organic removal assessment at full-scale treatment facilities using advanced organic characterization tools[J]. *Environmental Science: Processes &*

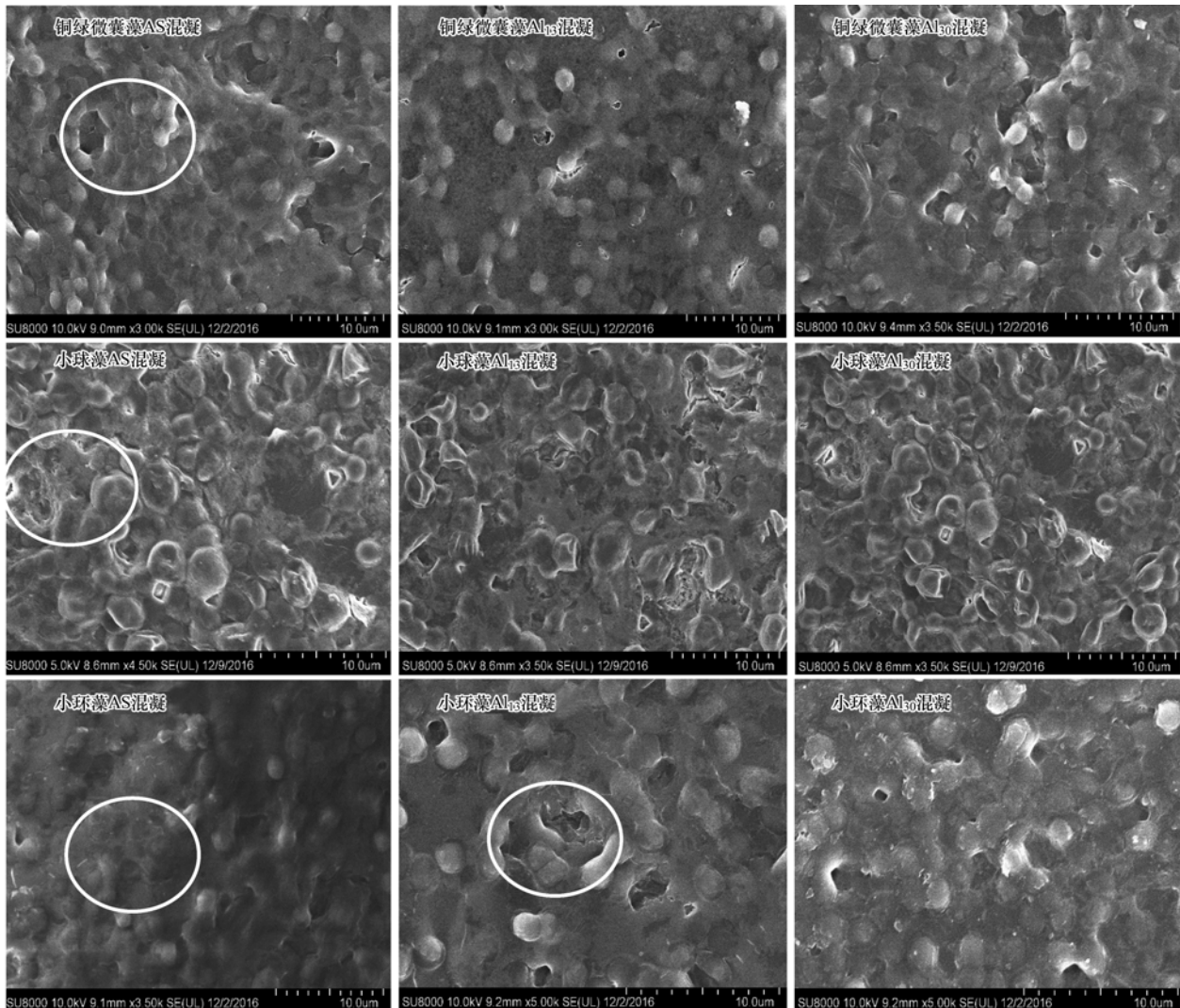


图 7 膜表面扫描电镜图——经过不同混凝剂处理

Fig. 7 SEM images of the membrane surface treated by the different coagulants

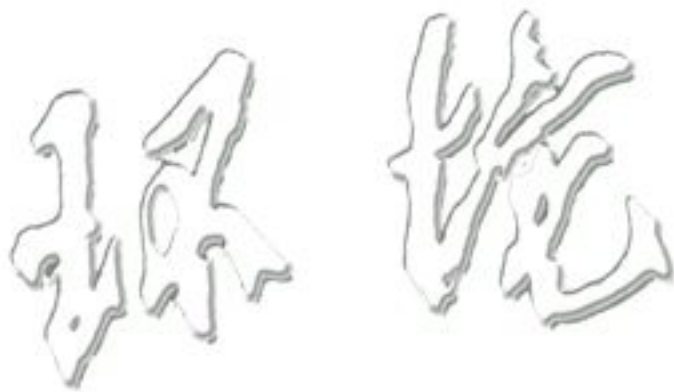
Impacts, 2014, **16**(10): 2451-2459.

- [6] Tian J Y, Chen Z L, Yang Y L, *et al.* Consecutive chemical cleaning of fouled PVC membrane using NaOH and ethanol during ultrafiltration of river water[J]. *Water Research*, 2010, **44**(1): 59-68.
- [7] 王琳, 董秉直, 高乃云. 超滤去除水中内分泌干扰物(BPA)的效果和影响因素[J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 329-334.
Wang L, Dong B Z, Gao N Y. Removal of EDCs (BPA) by ultrafiltration and impact factors[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(2): 329-334.
- [8] 董秉直, 王洪武, 冯晶, 等. 混凝预处理对超滤膜通量的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2783-2787.
Dong B Z, Wang H W, Feng J, *et al.* Influence of coagulation pretreatment on UF membrane flux[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2783-2787.
- [9] 赵凯, 杨春风, 孙镜求, 等. 超滤的预处理工艺对比研究: 化学混凝与电絮凝[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4706-4711.
Zhao K, Yang C F, Sun J Q, *et al.* comparative study on pretreatment process of ultrafiltration; chemical coagulation and

electrocoagulation[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4706-4711.

- [10] Sun S L, Gao B Y, Yue Q Y, *et al.* comparison of epichlorohydrin-dimethylamine with other cationic organic polymers as coagulation aids of polyferric chloride in coagulation-ultrafiltration process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **307**: 108-118.
- [11] Yu W Z, Xu L, Qu J H, *et al.* Investigation of pre-coagulation and powder activate carbon adsorption on ultrafiltration membrane fouling[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, **459**: 157-168.
- [12] Xu W Y, Gao B Y, Mao R R, *et al.* Influence of floc size and structure on membrane fouling in coagulation-ultrafiltration hybrid process—the role of Al_{13} species [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **193**: 249-256.
- [13] Xu W Y, Gao B Y. Effect of shear conditions on floc properties and membrane fouling in coagulation/ultrafiltration hybrid process—the significance of Al_b species [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, **415-416**: 153-160.
- [14] Kabsch-Korbutowicz M. Effect of Al coagulant type on natural organic matter removal efficiency in coagulation/ultrafiltration

- process[J]. Desalination, 2005, **185**(1-3): 327-333.
- [15] Qu F S, Liang H, Wang Z Z, *et al.* Ultrafiltration membrane fouling by extracellular organic matters (EOM) of *Microcystis aeruginosa* in stationary phase: influences of interfacial characteristics of foulants and fouling mechanisms[J]. Water Research, 2012, **46**(5): 1490-1500.
- [16] Zhou S Q, Shao Y S, Gao N Y, *et al.* Influence of hydrophobic/hydrophilic fractions of extracellular organic matters of *Microcystis aeruginosa* on ultrafiltration membrane fouling[J]. Science of Total Environment, 2014, **470-471**: 201-207.
- [17] Bagtho S A, Sharma S K, Amy G L. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 797-809.
- [18] 张龙, 乔俊莲, 雷青. 高锰酸钾预氧化强化混凝去除绿藻的研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 73-78.
Zhang L, Qiao J L, Lei Q. The study of green algae removal by potassium permanganate pre-oxidation enhanced coagulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(1): 73-78.
- [19] 冯利, 栾兆坤, 汤鸿霄. 铝的水解聚合形态分析方法研究[J]. 环境化学, 1993, **12**(5): 373-379.
Feng L, Luan Z K, Tang H X. The study on speciation analysis methods for hydrolysis polymerization of aluminum[J]. Environmental Chemistry, 1993, **12**(5): 373-379.
- [20] Wang Y, Gao B Y, Xu X M, *et al.* Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, **332**(2): 354-359.
- [21] Jarvis P, Jefferson B, Parsons S A. Breakage, regrowth, and fractal nature of natural organic matter flocs[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(7): 2307-2314.
- [22] Wang D S, Tang H X, Gregory J. Relative importance of charge neutralization and precipitation on coagulation of kaolin with PACl: effect of sulfate ion[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(8): 1815-1820.
- [23] Xu H, Xiao F, Wang D S. Effects of Al_2O_3 and TiO_2 on the coagulation process by $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (AS) and poly-aluminum chloride (PACl) in kaolin suspension[J]. Separation and Purification Technology, 2014, **124**: 9-17.
- [24] Yu W Z, Gregory J, Campos L C. Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and polyDADMAC[J]. Water Research, 2010, **44**(13): 3959-3965.
- [25] Zhao Y X, Gao B Y, Shon H K, *et al.* The effect of second coagulant dose on the regrowth of flocs formed by charge neutralization and sweep coagulation using titanium tetrachloride (TiCl_4)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **198**: 70-77.



CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)