

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染

赵凯^{1,2}, 杨春风¹, 孙境求^{2,3}, 李静¹, 胡承志^{2*}

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本研究通过调节电絮凝工艺参数来实现对絮体形态的调控, 进而达到减缓膜污染的目的. 主要考察了电流密度、初始 pH、初始电导率对絮体性质以及膜通量的影响, 并解析了超滤膜对不同形貌结构絮体的膜污染响应机制. 结果表明, 电絮凝减缓膜污染的关键是在膜表面形成疏松多孔的滤饼层, 电絮凝-超滤 (electrocoagulation-ultrafiltration, EC-UF) 工艺不但能够有效地减缓膜污染, 而且还极大提升了出水水质. 增加电流密度, 以及在 pH 中性水质条件下, EC-UF 工艺中膜通量保持更高. $j = 20 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 、初始 pH = 7、初始电导率 = $1\ 000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, EC-UF 工艺对水中的腐殖酸 (humic acid, HA) 去除率为 97%, 平衡阶段归一化通量 J/J_0 达到 81%.

关键词: 电絮凝; 超滤; 滤饼层; 膜污染; 膜通量

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4255-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605040

Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation

ZHAO Kai^{1,2}, YANG Chun-feng¹, SUN Jing-qiu^{2,3}, LI Jing¹, HU Cheng-zhi^{2*}

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, the electro chemical parameters were regulated to control the floc morphology in order to mitigate membrane fouling. The main effects of current density, initial pH and conductivity on the floc characteristics and flux were studied, and the mechanisms of interaction between flocs with different morphology structures and ultrafiltration membranes were analyzed. The results showed that the key to mitigate the membrane fouling by electrocoagulation was to form a loose and porous cake layer on the membrane surface. The electrocoagulation-ultrafiltration (EC-UF) technology could not only effectively mitigate the membrane fouling, but also greatly enhance the water quality of the effluent. By increasing the current density and keeping water quality conditions at neutral pH, the EC-UF technology could maintain a higher flux. Under conditions of $j = 20 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, initial pH = 7 and initial conductivity = $1\ 000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, the removal rate of humic acid (HA) was 97%, and the normalized specific flux of J/J_0 was 81%.

Key words: electrocoagulation; ultrafiltration; cake layer; membrane fouling; membrane flux

超滤(UF)技术被广泛应用于饮用水处理和废水处理与回用等方面^[1,2],其对悬浮物、胶体物质($>0.1 \mu\text{m}$)、无机颗粒和致命的微生物都有很好的截留效果^[3,4].然而当超滤技术单独使用时,由于膜污染会引起通量下降和跨膜压差上升,缩短了超滤膜的使用寿命,使得运行费用和制水成本增加,限制了其发展^[1,5].目前有两种比较公认的膜污染机制:①粒径比较小的胶体,容易吸附在膜孔内或直接堵塞膜孔导致膜内污染[图1(a)和1(b)];②粒径相对较大的胶体沉积在膜表面形成滤饼层,增加过滤阻力导致膜外污染[图1(c)]^[6,7].虽然滤饼层造成外部污染,但是它也具有减缓膜污染的作用,因为它可以阻止粒径较小的胶体到达膜孔内,减少膜内污染^[8].国内外已经有大量的研究报道,混凝作为膜分离的预处理技术可以有效地减缓膜污

染^[9,10].电絮凝作为一种高效的水处理技术,具有操作简单、产泥量小、避免使用化学药品、易实现自动化和设备化控制等优点^[11,12].将电絮凝与膜分离技术组合不但可以形成设备化、自动化水处理装置,而且还可以减缓膜污染提高膜通量^[13].然而,EC过程中的絮体形态如何变化及其对膜污染的响应关系至今还不清楚.在众多污染物中造成膜污染最严重的就是天然有机物^[14],为此,本文以HA为污染物,研究了EC强化UF去除HA与减缓膜污染的效能,考察了在不同EC参数条件下(电流密度

收稿日期: 2016-05-06; 修订日期: 2016-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378490); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07402003-3)

作者简介: 赵凯(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市给排水理论与技术, E-mail: 834144572@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: czhu@cees.ac.cn

j 、初始 pH、初始电导率) 形成絮体的形貌结构特征, 并分析了不同的絮体形态对膜通量的影响机制。

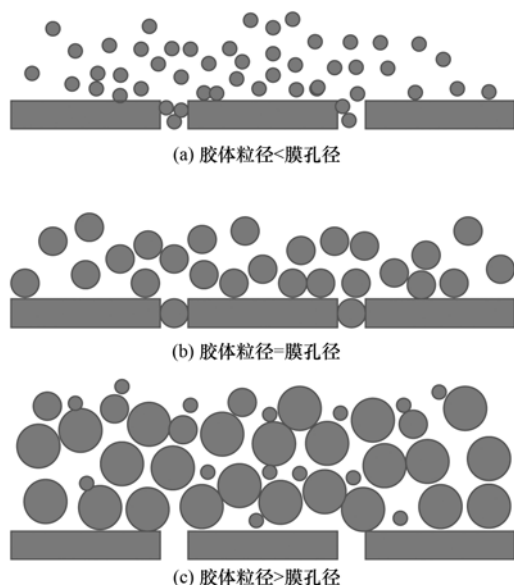


图 1 胶体污染机制

Fig. 1 Colloid pollution mechanism

1 材料与方 法

1.1 实验材料

极板与膜材料: 实验中阳极、阴极均采用铝板, 极板尺寸为 $115\text{ mm} \times 65\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (有效面积 68 cm^2)。中空纤维式超滤膜组件由天津膜天膜集团公司提供。超滤膜材质为聚偏氟乙烯 (PVDF), 平均膜孔径为 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 。

模拟实验废水: 实验中选用高岭土作为标准颗粒物, 称取适量高岭土, 以少量去离子水调和, 用 NaOH 调节 pH 值为 8 左右, 在高剪切条件下搅拌 0.5 h, 而后静置 24 h, 虹吸法取其上半部分制备成储备液。选用 HA 模拟 NOM, 称取适量 HA 样品加入 $\text{pH} = 12$ 的溶液中, 在磁力搅拌器上缓慢溶解 24 h, 然后用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤, 滤后液为 HA 储备液。向去离子水中加入高岭土、HA 储备液, 使高岭土、HA 浓度分别保持在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 溶液 pH 用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 和 HCl 进行调节, 向溶液中加入 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 作为缓冲物质, 用 NaCl 调节溶液电导率。实验所用药品均为国药分析纯。

1.2 实验装置

实验装置如图 2 所示。本实验采用自制有机玻璃槽 $140\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ (有效容积为 900 mL) 作为反应器, 极板间距为 20 mm 。实验中采用

DH1765-1 型程控直流稳压稳流电源 (35 V , 3 A); 采用磁力搅拌器对溶液进行搅拌, 以使电解液在反应器内分散均匀。实验模拟废水经泵进入 EC-UF 一体化反应器, 一部分水经膜分离流出, 另一部分因膜通量下降而逐渐滞留在反应器中的水经泵回流至原水池。

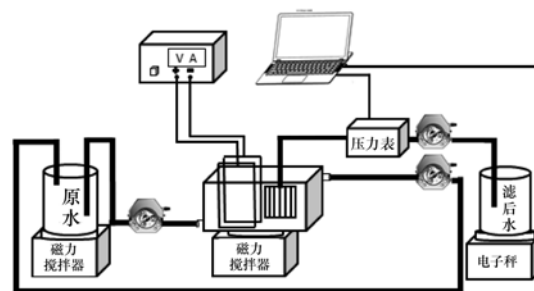


图 2 EC-UF 实验装置示意

Fig. 2 Schematic representation of EC-UF process

1.3 分析方法

pH 测定用 pH 测定仪 (720, Thermo Orion, USA), UV_{254} 测定用紫外/可见分光光度计 (U-3010, Hitachi High-Technologies Co, Japan), 电导率的测定用电导率仪 (METTLER TOLEDO, S230, China), HA 储备液用总有机碳分析仪 (TOC-VCPH, SHIMADZU, Japan) 定量其浓度, 高岭土储备液以重量法进行颗粒物浓度测定, 絮体粒径的测定用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, Malvern, UK), 实验在保持恒定跨膜压差 ($30\text{ kPa} \pm 0.3\text{ kPa}$) 的条件下以相对通量 J/J_0 表征膜污染程度, TMP 和电子秤的读数采用相关传感器与相应的数据采集软件来记录, 膜表面情况采用场发射扫描电镜与能谱 (SEM-EDS, JSM7401F, JEDL, Japan) 表征, 滤饼层表面孔的分布情况由软件 (Digital Micrograph) 进行测量。

2 结果与讨论

2.1 EC 强化 UF 效能

研究了 EC-UF 工艺与 UF 工艺对 HA 的去除效果和膜污染情况, 结果如图 3 所示。由图 3(a) 可知 EC-UF 工艺在 15 min 时, 在 EC 与 UF 协同作用下 HA 的去除率可达到 97% ; 而 UF 工艺对腐殖酸的去除仅靠膜本身的截留作用, 所以去除率比较低, 一直保持在 $25\% \sim 31\%$ 。在 EC-UF 工艺中由于阳极电解出的铝离子与腐殖酸结合生成粒径较大的絮体, 这些絮体沉积在膜表面形成疏松的滤饼层具有减缓膜污染的作用, 所以如图 3(b) 所示 EC-UF 工艺的膜通量在 2 min 左右便达到稳定且不再随着反

应时间衰减. 在 UF 工艺中, 溶液中的腐殖酸与高岭土粒径相对比较小, 在过滤的过程中容易吸附在膜孔内将膜孔堵塞或沉积于膜表面形成紧实的滤饼层增加过滤阻力, 所以在跨膜压差恒定的情况下膜通量随着反应时间一直在衰减^[15]. 综上可知, EC-UF 工艺不仅对腐殖酸的去除率高于 UF 工艺, 而且还有效减缓了膜污染.

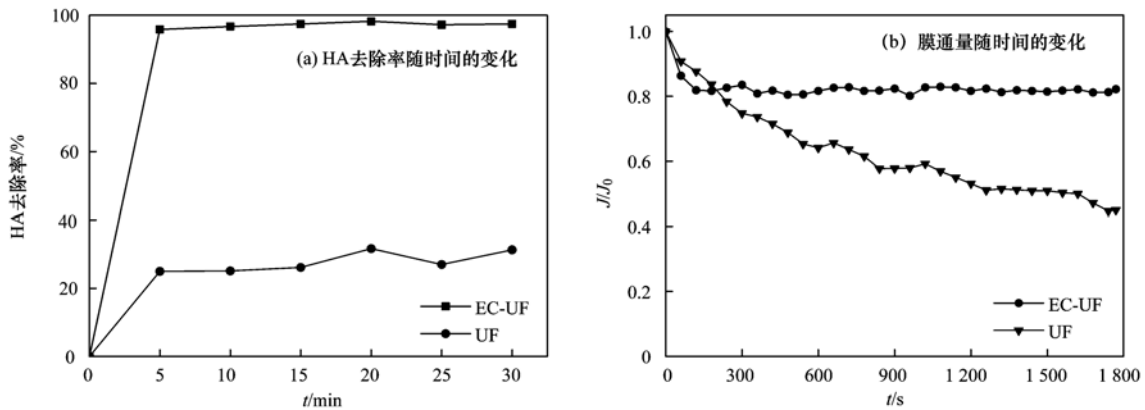
2.2 电流密度对膜通量的影响

分别选取电流密度为 2、10、20 A·m⁻², 考察电流密度对膜通量的影响, 结果如图 4. 从图 4 (a) 中可以看出电流密度越大, 膜通量的衰减越慢, 膜污染的减缓效果越好. 根据 Faraday 定律可知, 增加电流密度, 相当于单位时间内阳极电解出的铝离子增多, 阴极产生的氢氧根增多^[16], 在这样的环境下越有利于铝离子水解产物的生成, 从而增加了胶体之间的碰撞几率使得铝络合物通过吸附电中和、网捕卷

扫等絮凝作用与 HA 结合生成的絮体生长速度越快^[17] [图 4(b)]. 经过絮凝作用粒径大于膜孔径的絮体不但不会造成膜内污染, 而且会在膜表面形成疏松的滤饼层防止一些粒径较小的絮体进入膜孔造成膜内污染, 从而可以减缓膜污染保持良好的膜通量. 从图 5(a)~5(c) 可以发现随着电流密度的增大, 滤饼层表面的孔数量增多, 由软件 (Digital Micrograph) 对滤饼层表面孔的测量结果如图 5(d) 与表 1, 滤饼层表面孔的数量值与表面孔隙率随着电流密度的增大而增大, 进一步证实了电流密度越大形成的滤饼层越疏松多孔, 减缓膜污染效果越好.

2.3 pH 对膜通量的影响

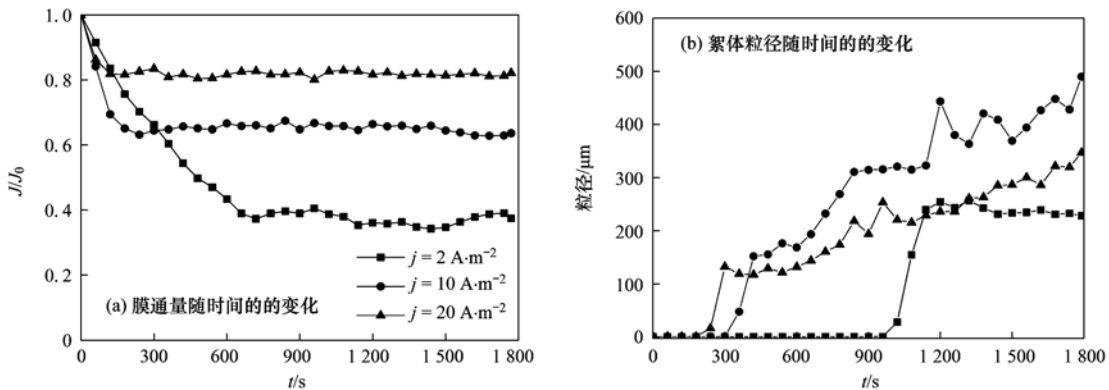
分别选取初始 pH 为 4、7、9, 考察初始 pH 对膜通量的影响, 结果如图 6. 由图 6(a) 所示, 在 pH = 4 的条件下, 10 min 之内保持着较高的膜通量但



$j = 20 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}, \text{pH}_0 = 7, \sigma_0 = 1000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$

图 3 EC-UF 工艺与 UF 工艺的对比

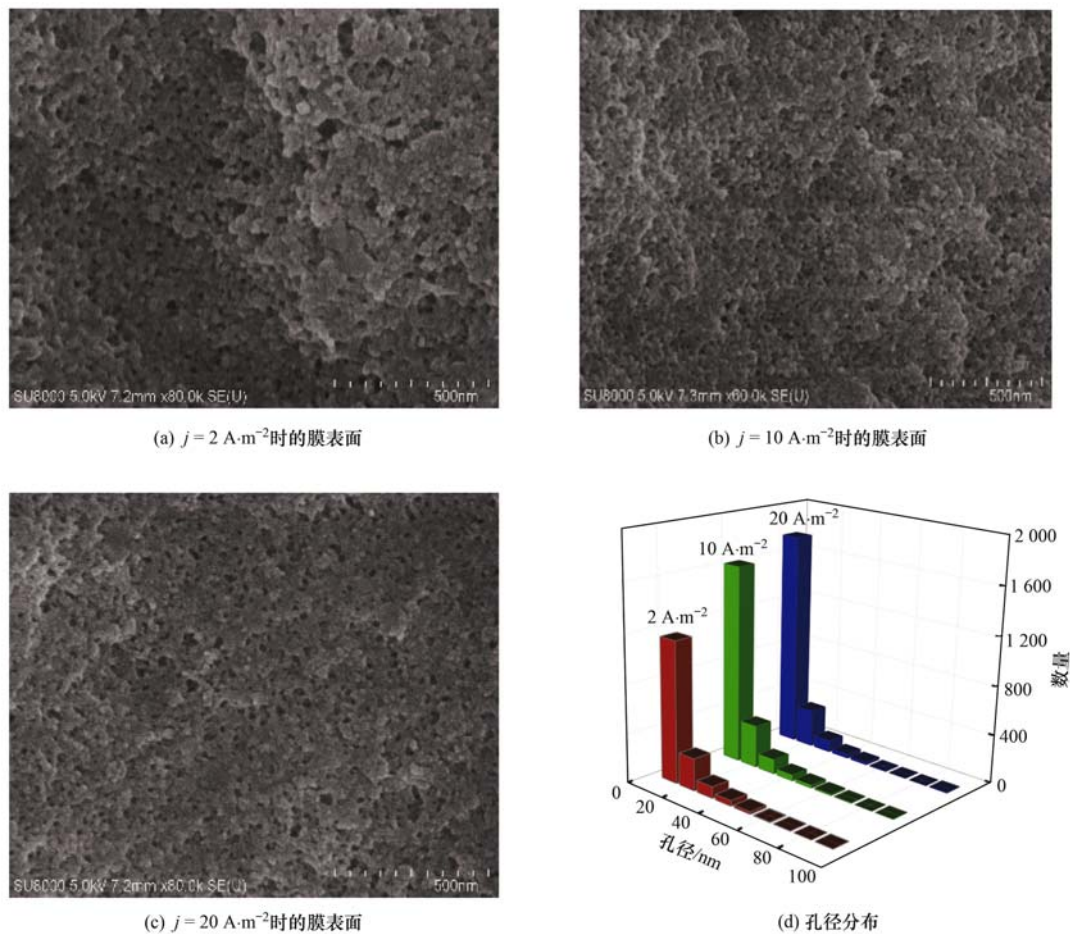
Fig. 3 Comparison of EC-UF technology and UF Technology



$\text{pH}_0 = 7, \sigma_0 = 1000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$

图 4 电流密度对膜通量和絮体粒径的影响

Fig. 4 Effect of current density on membrane flux and the size of the aggregates



$\text{pH}_0 = 7$, $\sigma_0 = 1\,000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 电解时间 = 30 min

图 5 电流密度对滤饼层的影响

Fig. 5 Effect of current density on cake layer

表 1 电流密度对滤饼层孔隙率的影响

Table 1 Effect of current density on porosity of cake layer

电流密度/ $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	2	10	20
孔隙率/%	25	33	40

1) $\text{pH}_0 = 7$, $\sigma_0 = 1\,000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 电解时间 = 30 min

随着反应时间的增加膜通量不断地在下降,最后稳定在初始通量的 38% 左右. $\text{pH} = 7$ 的膜通量相对于其它条件下的膜通量在达到稳定时衰减最弱,为膜初始通量的 64%; $\text{pH} = 9$ 稳定时的膜通量为膜初始通量的 48%. 由图 6(b) 可知,在 $\text{pH} = 4$ 的条件下,絮体粒径增长速度比较快,而且在 250 s 之后粒径趋于稳定. 这是因为在酸性条件下,HA 溶解度相对比较小,污染物自身粒径本来就相对比较大,而且在低 pH 值条件下,溶液中主要以带正电荷的铝单核物种 Al^{3+} 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 等为主,易与 HA 表面所带负电荷发生电中和作用从而减少静电排斥导致的障碍

使胶体颗粒脱稳,使铝与 HA 形成络合物的粒径有较高的增长速度,但是在这种情况形成的絮体比较紧实,所以才会出现在 250s 后,随着铝离子的增多但是絮体粒径增长比较缓慢^[18~20]. 正是由于酸性条件下絮体的这些特征,膜通量才会在 $\text{pH} = 4$ 时出现两个稳定时期. 第一个稳定期由于絮体增长速度快,短时间便在膜表面形成一层滤饼层,使絮体附着在滤饼层上减少了膜内污染,但是随着滤饼层的增厚而酸性条件下形成的絮体又比较紧实,所以随后形成滤饼层比较密实缝隙相对较少,使得膜过滤阻力增大造成膜通量下降,虽然最后又达到稳定期,但此时膜的外部污染已经很严重了. $\text{pH} = 7$ 时,溶液中的主要水解产物为无定形 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 由于其本身的溶解性小而且具有较大的比表面积,通过吸附、网捕卷扫絮凝作用形成较为疏松的絮体^[21],所以在膜表面形成比较疏松的滤饼层,达到减缓膜污染的效果. $\text{pH} = 9$ 时,由于溶液中存在大量的氢氧根水

解产物向 $Al(OH)_4^-$ 等负离子转化, 系统脱稳困难, 混凝效果较差, 所以絮体增长得比较缓慢^[22, 23], 形

成疏松滤饼层的时间比较长, 所以减缓膜污染的效果不是很好.

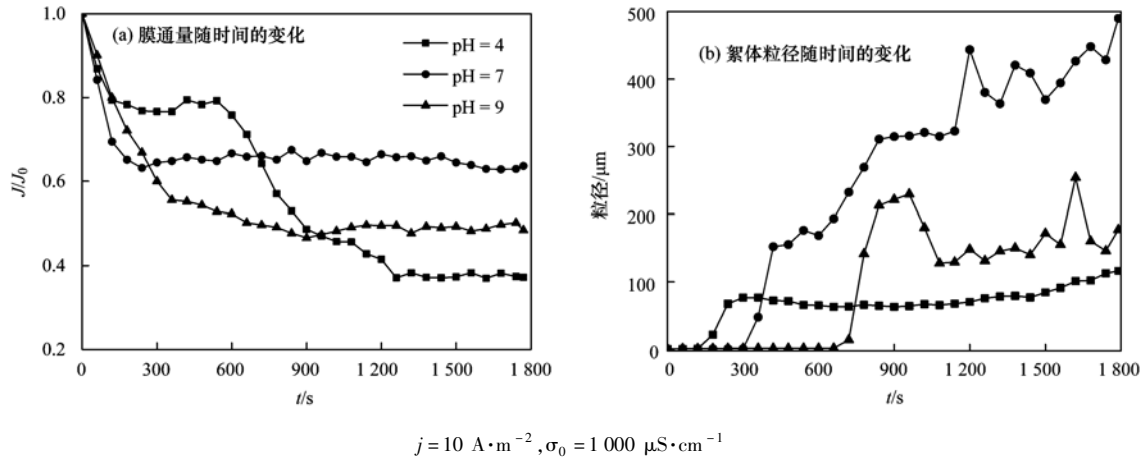


图 6 pH 对膜通量和絮体粒径的影响

Fig. 6 Effect of pH on membrane flux and the size of the aggregates

2.4 初始电导率对膜通量的影响

分别选取溶液初始电导率为 300、1000、2000 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 考察溶液电导率对膜通量的影响, 结果如图 7. 电导率的大小可以间接反映离子强度的大小, 而离子强度的不同又会影响膜通量^[24]. 由图 7 可知, 溶液初始电导率为 300、1000、2000 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 达到稳定时的膜通量分别为初始膜通量的 63%、

64.3%、61.3% 左右, 絮体粒径也都大约在 320 s 时开始增长, 表明膜通量、粒径开始增长的时间在不同溶液初始电导率条件下变化不大. 虽然在本实验研究条件下溶液初始电导率不和电流密度、初始 pH 一样可以对膜通量产生比较大的影响, 但适当的增加溶液电导率可以保证在电流密度不变的情况下有效地减少电能的消耗^[25].

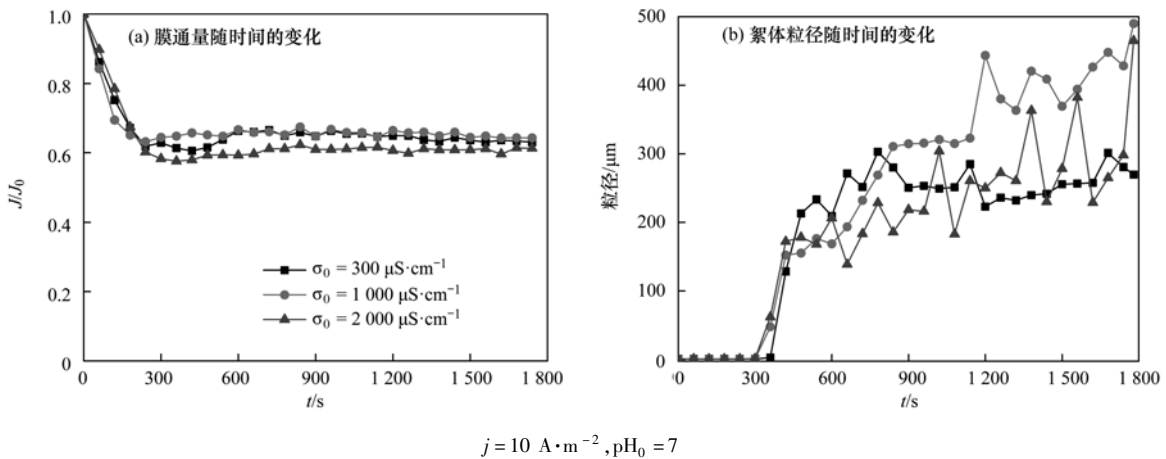


图 7 初始电导率对膜通量和絮体粒径的影响

Fig. 7 Effect of initial conductivity on membrane flux and the size of the aggregates

3 结论

(1) EC-UF 工艺在处理 HA 时不但可以有效减缓膜污染, 而且对 HA 的去除率可以达到 97%, 反应 30 min 相对于 UF 工艺膜通量和 HA 去除率分别提高约 35% 和 66%.

(2) 随着电流密度的增加絮体的增长速率加快, 膜表面形成的滤饼层越疏松多孔, 对 UF 膜污染

的减缓效果越好. pH 中性水质条件下膜通量更高, 改变溶液初始电导率对膜通量几乎没有影响.

(3) 在 $j = 20 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 、初始 pH = 7、初始电导率 = 1000 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 条件下, EC-UF 工艺的 HA 去除率达到 97%, 膜通量可以稳定在膜初始通量的 81%.

参考文献:

[1] Gao W, Liang H, Ma J, et al. Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review

- [J]. Desalination, 2011, **272**(1-3): 1-8.
- [2] Lin C F, Wu C H, Lai H T. Dissolved organic matter and arsenic removal with coupled chitosan/UF operation [J]. Separation and Purification Technology, 2008, **60**(3): 292-298.
- [3] Zularisam A W, Ismail A F, Salim R. Behaviours of natural organic matter in membrane filtration for surface water treatment — a review[J]. Desalination, 2006, **194**(1-3): 211-231.
- [4] Jucker C, Clark M M. Adsorption of aquatic humic substances on hydrophobic ultrafiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science, 1994, **97**: 37-52.
- [5] 史慧婷, 杨艳玲, 李星, 等. 腐殖酸对超滤膜污染特性的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2010, **26**(5): 536-540.
Shi H T, Yang Y L, Li X, *et al.* Study on characteristics of UF membrane fouling by humic acid [J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2010, **26**(5): 536-540.
- [6] Moshe B S, Avner A. Fouling mitigation by iron-based electroflocculation in microfiltration: mechanisms and energy minimization [J]. Water Research, 2010, **44**(13): 3973-3981.
- [7] Ma B W, Yu W Z, Liu H J, *et al.* Effect of low dosage of coagulant on the ultrafiltration membrane performance in feedwater treatment[J]. Water Research, 2014, **51**: 277-283.
- [8] Arora N, Davis R H. Yeast cake layers as secondary membranes in dead-end microfiltration of bovine serum albumin[J]. Journal of Membrane Science, 1994, **92**(3): 247-256.
- [9] 王晓昌, 王锦. 混凝-超滤去除腐殖酸的试验研究[J]. 中国给水排水, 2002, **18**(3): 18-22.
Wang X C, Wang J. Experimental study on the humic acid removal by means of coagulation-ultrafiltration[J]. China Water & Wastewater, 2002, **18**(3): 18-22.
- [10] Choi Y H, Kim H S, Kweon J H. Role of hydrophobic natural organic matter flocs on the fouling in coagulation-membrane processes[J]. Separation and Purification Technology, 2008, **62**(3): 529-534.
- [11] 曲久辉, 刘会娟. 水处理电化学原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 217-219.
- [12] Harif T, Khai M, Adin A. Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics[J]. Water Research, 2012, **46**(10): 3177-3188.
- [13] Chellam S, Sari M A. Aluminum electrocoagulation as pretreatment during microfiltration of surface water containing NOM: a review of fouling, NOM, DBP, and virus control[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **304**: 490-501.
- [14] Zularisam A W, Ismail A F, Salim M R, *et al.* The effects of natural organic matter (NOM) fractions on fouling characteristics and flux recovery of ultrafiltration membranes[J]. Desalination, 2007, **212**(1-3): 191-208.
- [15] 胡文. 腐殖酸溶液对超滤膜污染的原因研究[J]. 环境科学与管理, 2015, **40**(8): 84-88.
Hu W. Pollution of humic acid solution on ultrafiltration membrane[J]. Environmental Science and Management, 2015, **40**(8): 84-88.
- [16] Hu C Z, Wang S Q, Sun J Q, *et al.* An effective method for improving electrocoagulation process: optimization of Al₁₃ polymer formation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, **489**: 234-240.
- [17] Lee S Y, Gagnon G A. Growth and structure of flocs following electrocoagulation[J]. Separation and Purification Technology, 2016, **163**: 162-168.
- [18] Feng L J, Zhao S, Sun S L, *et al.* Effect of pH with different purified aluminum species on coagulation performance and membrane fouling in coagulation/ultrafiltration process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **300**: 67-74.
- [19] Ulu F, Barşet S, Kobya M, *et al.* Removal of humic substances by electrocoagulation (EC) process and characterization of floc size growth mechanism under optimum conditions[J]. Separation and Purification Technology, 2014, **133**: 246-253.
- [20] 金鹏康, 王晓昌. 腐殖酸絮凝体的形态学特征和混凝化学条件[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(S1): 23-29.
Jin P K, Wang X C. Morphological characteristics of Al-humic floc and coagulation chemistry [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, **21**(S1): 23-29.
- [21] Wang J, Guan J, Santiwong S R, *et al.* Effect of aggregate characteristics under different coagulation mechanisms on microfiltration membrane fouling[J]. Desalination, 2010, **258**(1-3): 19-27.
- [22] 吴珍, 张盼月, 曾光明, 等. 不同铝形态去除水中腐殖酸的混凝特性[J]. 环境科学. 2008, **29**(7): 1903-1907.
Wu Z, Zhang P Y, Zeng G M, *et al.* Coagulation characteristics of different Al species on humic acid removal from water [J]. Environmental Science, 2008, **29**(7): 1903-1907.
- [23] Zhang L Z, Mao J C, Zhao Q, *et al.* Effect of AlCl₃ concentration on nanoparticle removal by coagulation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, **38**: 103-109.
- [24] Li K, Huang T L, Qu F S, *et al.* Performance of adsorption pretreatment in mitigating humic acid fouling of ultrafiltration membrane under environmentally relevant ionic conditions [J]. Desalination, 2016, **377**: 91-98.
- [25] Daneshvar N, Oladegaragoze A, Djafarzadeh N. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **129**(1-3): 116-122.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggyery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行