

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

**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

中国国道和省道机动车尾气排放特征 ..... 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 ..... 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 ..... 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 ..... 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 ..... 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 ..... 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 ..... 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 ..... 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 ..... 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 ..... 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 ..... 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 ..... 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 ..... 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 ..... 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 ..... 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 ..... 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 ..... 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 ..... 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 ..... 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 ..... 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 ..... 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 ..... 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 ..... 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附  $Pb^{2+}$  的性能 ..... 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电催化矿化吡啶的影响与机制 ..... 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 ..... 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 ..... 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 ..... 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 ..... 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 ..... 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 ..... 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 ..... 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 ..... 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 ..... 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤  $CH_4$ 、 $N_2O$  排放的影响 ..... 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 ..... 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 ..... 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 ..... 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 ..... 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 ..... 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 ..... 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 ..... 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 ..... 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 ..... 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 ..... 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

*Pantoea* sp. IMH 介导土壤中砷的形态转化 ..... 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 ..... 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 ..... 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 ..... 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 ..... 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 ..... 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

# 活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制

苗雨<sup>1</sup>, 翟洪艳<sup>1\*</sup>, 于珊珊<sup>1</sup>, 张婧<sup>1</sup>, 史常香<sup>2</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津市城市河道水质生态净化技术工程中心, 天津 300350; 2. 酒泉卫星发射中心, 酒泉 732750)

**摘要:** 本文研究了粉末活性炭 (powder activated carbon, PAC) 吸附对藻类有机质 (algal organic matter, AOM) 及其典型含氮和非含氮消毒副产物 (disinfection by-products, DBPs) 的去除效能. 结果表明, AOM 主要含有一些小分子量、亲水性、低芳香度的有机质, 三维荧光光谱证实, PAC 吸附改变了 AOM 的组成, 明显降低了类腐殖物质含量, 但对芳香蛋白类物质去除能力有限. PAC 投加量为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 吸附时间 10 ~ 30 min 时, 对于  $3.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的胞内有机质 (intracellular organic matter, IOM) 和胞外有机质 (extracellular organic matter, EOM) 溶液, 溶解性有机碳去除率分别为 20.7% ~ 31.9% 和 12.6% ~ 19.0%. PAC 对 IOM 和 EOM 中卤代甲烷总生成量的最高去除率分别为 26.6% 和 35.8%; 卤代乙腈总生成量的最高去除率分别为 49.6% 和 53.6%, 其中二溴乙腈前体物的去除效果显著. PAC 对 EOM 氯化生成的 DBPs 的控制作用较好.

**关键词:** 吸附; 藻类有机质; 铜绿微囊藻; 粉末活性炭; 消毒副产物

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3738-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612169

## Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon

MIAO Yu<sup>1</sup>, ZHAI Hong-yan<sup>1\*</sup>, YU Shan-shan<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, SHI Chang-xiang<sup>2</sup>

(1. Tianjin Engineering Center of Urban River Eco-Purification Technology, School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China)

**Abstract:** The removal efficiencies of algal organic matter (AOM) and typical nitrogenous and non-nitrogenous disinfection by-products (DBPs) through adsorption with powder activated carbon (PAC) were investigated. Three-dimensional fluorescence spectroscopy confirmed that PAC adsorption changed the composition of AOM. PAC adsorption showed high removal efficiency for humus-like substances in AOM, but limited removal efficiency for aromatic protein-like substances. When the dosage of PAC was  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and the adsorption time ranged from 10 to 30 min, the removal rates of  $3.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  dissolved organic carbon were 20.7% - 31.9% for intracellular organic matter (IOM) and 12.6% - 19.0% for extracellular organic matter (EOM). The highest removal rates of trihalomethanes by PAC in the chlorination of IOM and EOM were 26.6% and 35.8%, respectively. The highest removal rates of haloacetonitriles were 49.6% and 53.6% in the chlorination of IOM and EOM. The removal of dibromoacetonitrile precursors by PAC was significant. In summary, the PAC had a higher efficiency in reducing the generation of DBPs in EOM chlorination than in IOM chlorination.

**Key words:** adsorption; algal organic matter; *Microcystis aeruginosa*; powder activated carbon; disinfection by-products

饮用水安全是与人类健康关系最密切的问题之一. 我国很多饮用水源水因污染普遍存在富营养化问题, 导致藻类大量繁殖, 藻细胞以及藻类分泌物等藻类有机物 (algal organic matter, AOM) 成为水中溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 的重要组成部分<sup>[1]</sup>. AOM 的胞内有机质 (intracellular organic matter, IOM) 和胞外有机质 (extracellular organic matter, EOM) 中均含有较高比例的有机氮和亲水性有机质<sup>[2,3]</sup>, 可以提高消毒过程中卤代甲烷 (trihalomethanes, THMs) 和卤代乙腈 (haloacetonitriles, HANs) 等消毒副产物 (disinfection by-products, DBPs) 的生成量, 尤其是含氮 DBPs<sup>[4,5]</sup>. 有研究发现, DBPs 具有强烈的致癌、致畸和致突变性<sup>[6]</sup>, 其中含氮 DBPs 细胞毒性、遗传毒性和“三

致”作用更强<sup>[7]</sup>.

控制 DBPs 生成的最有效方法之一是在消毒处理前去除水中的前体物. 研究发现传统的水厂处理工艺 (混凝-沉淀-过滤) 适于去除大分子物质如腐殖酸和一些疏水性有机物, 不能完全去除 AOM<sup>[8,9]</sup>, 甚至可能改变 AOM 的组成, 提高某些 DBPs 的生成量<sup>[10]</sup>. 臭氧或高锰酸钾预氧化技术会导致 IOM 的释放, 并使高分子量有机物转变为低分子量有机物, 生成新的 DBPs 前体物<sup>[11]</sup>. 活性炭对水体中低分子

收稿日期: 2016-12-19; 修订日期: 2017-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21207096); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401107); 天津大学自主创新基金项目 (2013XQ-0048)

作者简介: 苗雨 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水安全, E-mail: 513209305@qq.com

\* 通信作者, E-mail: zhaihy@tju.edu.cn

量有机物、疏水性和亲水性有机质以及可溶性微生物有较好的吸附效果<sup>[12]</sup>,在一定程度上可减少 DBPs 的前体物。溴离子是饮用水源中常见的离子,世界各地饮用水中溴离子浓度范围很宽,最高可达到约  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[13]</sup>,我国部分水源中溴离子浓度在  $10 \sim 249 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[14]</sup>。溴离子可以被常用消毒剂次氯酸盐氧化成次溴酸,进而生成溴代 DBPs,很多研究表明溴代 DBPs 的基因毒性和细胞毒性远远高于相应的氯代 DBPs<sup>[15,16]</sup>。目前关于高浓度溴离子存在条件下粉末活性炭 (powder activated carbon, PAC) 对 AOM 去除以及氯化生成 DBPs 的控制作用研究甚少。鉴于此,本文以富营养化饮用水源水中典型的藻类铜绿微囊藻为研究对象,考察了溴离子浓度为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  条件下 IOM 和 EOM 氯化生成 DBPs 特性以及 PAC 对其典型不含氮 DBPs [三氯甲烷 (chloroform, TCM)、一溴二氯甲烷 (bromodichloromethane, BDCM)、一氯二溴甲烷 (dibromochloromethane, DBCM) 和溴仿 (bromoform, TBM)] 和含氮 DBPs [二氯乙腈 (dichloroacetonitrile, DCAN)、溴氯乙腈 (bromochloroacetonitrile, BCAN) 和二溴乙腈 (dibromoacetonitrile, DBAN)] 控制作用展开研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

EPA510 三卤甲烷混标购自 O2SI 公司 (USA), EPA551B 标准品购自 Supelco 公司 (USA), 内标物 1,2-二溴丙烷标准品购自 O2SI 公司 (USA), 萃取剂甲基叔丁基醚 (色谱纯), 抗坏血酸 (优级纯), 其它试剂均为分析纯。

PAC 为 DARCO® G-60 水蒸汽活化活性炭, 亚甲基蓝吸附值为  $20 \text{ g}/100 \text{ g}$ , 密度为  $0.40 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,  $d_{50}$  为  $34 \text{ } \mu\text{m}$ , pH 值为 6。为去除原生产过程中有机物的残留,用超纯水反复清洗 PAC 直至溶液中无有机物溶出,再将其于  $105^\circ\text{C}$  烘干至恒重。傅里叶红外光谱法 (FTIR) 分析表明该种 PAC 表面含有酚羟基、羧基、羰基等含氧官能团。

铜绿微囊藻购自中国科学院武汉水生生物研究所国家淡水藻种库 (编号为 FACHB-905), 采用 BG-11 培养液进行培养, 培养条件为  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 光照强度  $2000 \text{ lx}$ , 光暗比为 12 h: 12 h。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 AOM 的提取

将稳定期藻细胞溶液接种于 2 个装有 250 mL

BG-11 培养基的 500 mL 锥形瓶中, 培养至对数生长期。采集 2 个锥形瓶中的藻溶液共 500 mL (藻细胞浓度为  $5.4 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$  左右), 全部用 50 mL 离心管  $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 8 min, 取上清液, 经  $0.8 \text{ } \mu\text{m}$  醋酸纤维膜过滤后, 得到 EOM 溶液<sup>[2]</sup>。将离心所得的藻细胞用超纯水清洗 3 遍后, 去除其表面吸附的胞外有机质等, 经再次离心得到藻细胞, 然后将该藻细胞用超纯水重新定容至总体积为 500 mL, 置于常温或  $-20^\circ\text{C}$  冰箱内反复冻融 3 次后用  $0.8 \text{ } \mu\text{m}$  醋酸纤维膜过滤, 得到 IOM 溶液<sup>[2]</sup>。提取的 IOM 和 EOM 溶液的溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 浓度分别为  $48.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $10.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

#### 1.2.2 PAC 吸附实验

IOM 和 EOM 溶液均稀释至 DOC 浓度为  $3.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 加入  $\text{NaHCO}_3$  溶液, 使碱度达到  $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (模拟自然水体的中等碱度), 然后用盐酸将 pH 值调至  $7.0 \pm 0.2$ , 溴离子浓度为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 该溶液作为模拟被藻污染的饮用水源水。取 150 mL 水样放入 250 mL 锥形瓶中, 加入一定量的 PAC 后, 置于恒温振荡培养箱中振荡, 转速  $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。一定吸附时间后, 水样经  $0.8 \text{ } \mu\text{m}$  醋酸纤维膜过滤后进行后续分析测试。参照实际水处理工艺中活性炭 15 ~ 30 min 的接触时间,  $10 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的投加剂量<sup>[17]</sup>, 设计本实验吸附时间分别为 10、20 和 30 min (此时 PAC 投加量为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 投加量分别为 10、20 和  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (此时吸附时间为 20 min)。

#### 1.2.3 氯消毒和水样前处理方法

取 PAC 吸附实验的过滤后溶液 100 mL, 加入  $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的磷酸盐缓冲溶液 0.4 mL (pH 为  $7.0 \pm 0.2$ ), 加入  $\text{NaOCl}$  溶液, 使氯投加量为  $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (以  $\text{Cl}_2$  计)。避光反应 24 h 后, 测定总氯和自由余氯, 然后加入抗坏血酸终止反应, 取平行样进行 DBPs 的萃取和测定, 测定的 DBPs 具体包括 TCM、BDCM、DBCM、TBM、DCAN、BCAN 和 DBAN。

DBPs 的萃取方法依照 USEPA 方法 551.1<sup>[18]</sup>, 即先加入 2.5 g 无水  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 振荡溶解后, 加入 3.0 mL 甲基叔丁基醚, 振荡 2 min, 静置 10 min。用滴管吸取上层有机相 1.5 mL, 氮吹至 0.2 mL。

### 1.3 分析方法

藻细胞数采用血球计数板计数; DOC 测定采用总有机碳分析仪 (TOC-VCPH, 日本岛津); 水中总有机氮 (total organic nitrogen, TON) 计算方法:  $\text{TON} = \text{TN} - \text{NO}_3^- - \text{NO}_2^- - \text{NH}_4^+$ ; 其中, TN 采用过硫酸

钾氧化-紫外分光光度法测定<sup>[19]</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N采用紫外分光光度法测定<sup>[19]</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法<sup>[19]</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用纳氏试剂光度法. UV<sub>254</sub>采用紫外/可见分光光度计 (UV-2550, 日本岛津), 比紫外吸收值 SUVA<sub>254</sub>为 UV<sub>254</sub>与 DOC 的比值, 自由余氯测定使用 HACH 总氯试剂 (HACH 21055-69). 三维荧光光谱 (EEM) 采用荧光光度计 (Perlin-Elmer LS55) 测定. 激发波长 λ<sub>Ex</sub>为 5 nm, 发射波长 λ<sub>Em</sub>为 5 nm; 波长范围: λ<sub>Ex</sub>为 200 ~ 400 nm, λ<sub>Em</sub>为 200 ~ 600 nm; 扫描速度为 1 200 nm·min<sup>-1</sup>. 所得数据采用 Origin 作图. 所有样品的 DOC 值均为 3.30 mg·L<sup>-1</sup>.

DBPs 采用气相色谱法 [Agilent6890N, 色谱柱 DB-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)] 测定. 色谱条件: 进样口温度为 200℃, 载气为 N<sub>2</sub>, 其流量为 20.0 mL·min<sup>-1</sup>; 色谱柱升温程序: 初始温度为 36℃, 保持 5 min, 然后以 10℃·min<sup>-1</sup> 升温至 70℃, 保持 3.5 min, 再以 20℃·min<sup>-1</sup> 升温至 200℃, 保持 3 min; 检测器 ECD 温度为 250℃. 进样体积为 1 μL.

#### 1.4 溴取代参数计算方法

溴离子的存在会导致 DBPs 由氯取代向溴取代的方向转化. 为评价溴在 DBPs 中的取代特性, 采用溴取代参数 (bromine substitution factor, BSF)<sup>[20]</sup> 对有机物的溴取代特性进行定量描述. BSF 为某种指定 DBPs 中, 溴代 DBPs 中溴原子浓度占该类 DBPs 中溴原子和氯原子浓度之和的比值, 值在 0 ~ 1 之间. 以下为 THMs-BSF 和 DHANs-BSF 的计算方法.

$$\text{THMs-BSF} = \frac{\sum_n^3 n \times [\text{CHCl}_{3-n}\text{Br}_n]}{3 \sum_{n=0}^3 \text{CHCl}_{(3-n)}\text{Br}_n} \quad (1)$$

$$\text{DHANs-BSF} = \frac{\sum_n^2 n \times [\text{C}_2\text{HCl}_{2-n}\text{Br}_n\text{N}]}{2 \sum_{n=0}^2 \text{C}_2\text{HCl}_{(2-n)}\text{Br}_n\text{N}} \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 PAC 对 AOM 的去除效果

AOM 的有机物组成和分子特性决定了其在水处理过程中的去除和迁移转化规律, 以及生成 DBPs 的能力, 同一种藻类的 IOM 和 EOM 在分子组成和性质方面存在不同<sup>[11,21]</sup>. 由表 1 可知, IOM 的 TON/DOC 为 0.102, 约是 EOM 的 1.4 倍, 并且高于一般天然有机质 (NOM) (~0.067)<sup>[22]</sup>, 说明 IOM 富含有机氮, 由此推测 IOM 比 NOM 更易生成含氮 DBPs.

本实验中 IOM 的 SUVA<sub>254</sub> 值远低于 NOM [4.79 L·(mg·m)<sup>-1</sup>; TOC 为 5 mg·L<sup>-1</sup>]<sup>[11]</sup>, Joo 等<sup>[23]</sup> 研究发现当水体 SUVA 值 < 2 ~ 3 L·(mg·m)<sup>-1</sup> 时, 水体中有机物主要包含亲水性和小分子量物质. 而且 IOM 的 SUVA<sub>254</sub> 值比 EOM 的低, 表明 IOM 比 EOM 含有较少的芳香族有机物、较多的亲水性和低分子量有机物.

如图 1 (a) 所示, IOM 的 DOC 去除率在 10 min 时为 31.9%, 随吸附时间延长, 去除率反而降低到 20.7% ~ 20.9%. UV<sub>254</sub> 去除率高, 在 71.4% ~ 75.0% 之间, 且吸附 10 min 就可以达到平衡, 不再随吸附时间变化. UV<sub>254</sub> 反映的主要是含有 C=C 和 C=O 双键的芳香族化合物<sup>[24]</sup>, 由此可见 PAC 对 UV<sub>254</sub> 所表征的极性较弱的芳香族化合物有较好的吸附效果. 此结果与刘冰等<sup>[25]</sup> 的结论类似. 此外 IOM 的 SUVA<sub>254</sub> 也有明显降低, 去除率在 58.0% ~ 68.5% 之间, 且接触 10 min 时就能达到较高的去除率. TON 是水中有机质的重要组成部分, 包括胺类、腈类、嘌呤类和吡啶类化合物, 可与氯或一氯胺反应生成有机氯胺, 是含氮和含碳 DBPs 的重要前体物<sup>[26]</sup>. TON 初始浓度是 0.30 mg·L<sup>-1</sup>, 10 ~ 20 min 去除率为 36.2% ~ 39.6%, 延长吸附时间到 30 min 时, 去除率升高至 46.9%. 适当延长吸附时间有利于 TON 的去除, 降低氯化生成典型含氮 DBPs 的风险. 实验表明, PAC 对 IOM 为快速吸附, 延长吸附时间存在解吸附现象. 有研究报道 IOM (*Microcystis aeruginosa*) 的 DOC 相对分子质量分布在 < 1 × 10<sup>3</sup> 区间的约占 28%<sup>[2,21]</sup>, 这部分有机物优先占据活性炭上的吸附位, 表现为快速吸附过程; 而 IOM 中相对分子质量分布在 > 100 × 10<sup>3</sup> 区间的约占 46.3%<sup>[2]</sup>, 此区间内的大分子有机物可能堵塞 PAC 的二级微孔造成孔阻效应<sup>[27]</sup>, 从而影响进一步地吸附作用并造成已有吸附质的解吸附现象.

如图 1 (b) 所示, 随着反应时间延长, EOM 的 DOC 和 UV<sub>254</sub> 去除率逐渐升高. 吸附时间延长至 30 min 时, DOC 去除率达到 19.0%; UV<sub>254</sub> 去除率升高到 43.8%; SUVA<sub>254</sub> 去除率在 30.1% 左右. 实验表明, 延长吸附时间有利于 PAC 对 EOM 的去除, 与 IOM 相比, PAC 对 EOM 的去除率普遍较低, 且吸附过程缓慢. 高乃云等<sup>[21]</sup> 研究表明 EOM (*Microcystis aeruginosa*) 的 DOC 分布主要集中在 1 × 10<sup>3</sup> ~ 100 × 10<sup>3</sup> 之间 (约占 90%), 小分子和大分子物质较少, 可能是造成 PAC 吸附过程缓慢的主要原因.

由图 2 所示, 提高 PAC 的投加量有利于 IOM 和

EOM 的去除. 当投加量提高到  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, IOM 的 DOC 去除率为 26.0%,  $\text{UV}_{254}$  去除率为 78.6%,  $\text{SUVA}_{254}$  去除率为 71.1%, TON 去除率为 40.2%; EOM 的 DOC 去除率为 20.7%,  $\text{UV}_{254}$  去除率为 45.8%,  $\text{SUVA}_{254}$  去除率在 31.3% 左右. 该去除率和文献[28]报道的近似.

为进一步研究 PAC 对 AOM 不同组分的吸附去除作用, 进行 IOM 和 EOM 吸附 ( $\text{DOC } 3.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 吸附时间 30 min, PAC 投加量  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 前后水样的三维荧光光谱分析. 三维荧光光谱的荧光峰位置可以反映有机质中类腐殖质、蛋白类、氨基酸类组分<sup>[29]</sup>. 如图 3(a) 所示, IOM 具有 4 个较明显的荧光峰, 分别是 2 个类蛋白峰 A 和 B ( $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$  为 280/330 nm 和 220/330 nm) 以及两个类腐殖质峰 C 和 D ( $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$  为 351/448 nm 和 268/450 nm). 经过 30

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  PAC 吸附 30 min 后, 发现类腐殖质物质得到较明显去除, 峰 A 和峰 B 所包含的可溶性生物代谢物、芳香蛋白类等物质的去除效果不显著. 如图 3(c) 所示, EOM 只有一个比较明显的荧光峰 A ( $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$  为 278/330 nm), 同样为类蛋白质峰; 同时还有 1 片强度低、宽阔的峰带 (峰 C 和 D,  $\lambda_{\text{Ex}} > 250 \text{ nm}$  和  $\lambda_{\text{Em}} > 350 \text{ nm}$ ), 属于类腐殖质峰. PAC 吸附后的 EEM 表明峰 C 和 D 所代表的类富里酸和类腐殖酸等物质得到了去除, 而类蛋白质等物质的去除效果不显著.

以上结果表明, AOM 经过 PAC 吸附处理后,  $\text{SUVA}_{254}$  的值发生较大变化, 水中一些类腐殖质物质、芳香类物质得到去除, 芳香蛋白类物质去除效果不显著. 而芳香蛋白类物质被证明可能是 AOM 中 DBPs 尤其是 THMs 最主要的前驱体<sup>[30]</sup>.

表 1 IOM 和 EOM 溶液的水质参数

Table 1 Water quality parameters of IOM and EOM solutions

项目	DOC $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TON $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{UV}_{254}$	$\text{SUVA}_{254}$ $/\text{L}\cdot(\text{mg}\cdot\text{m})^{-1}$	单位 TOC 自由胺值 (以 $\text{Cl}_2$ 计) $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
IOM	3.30	0.34	0.250	0.516	0.12
EOM	3.30	0.24	0.171	1.652	0.16

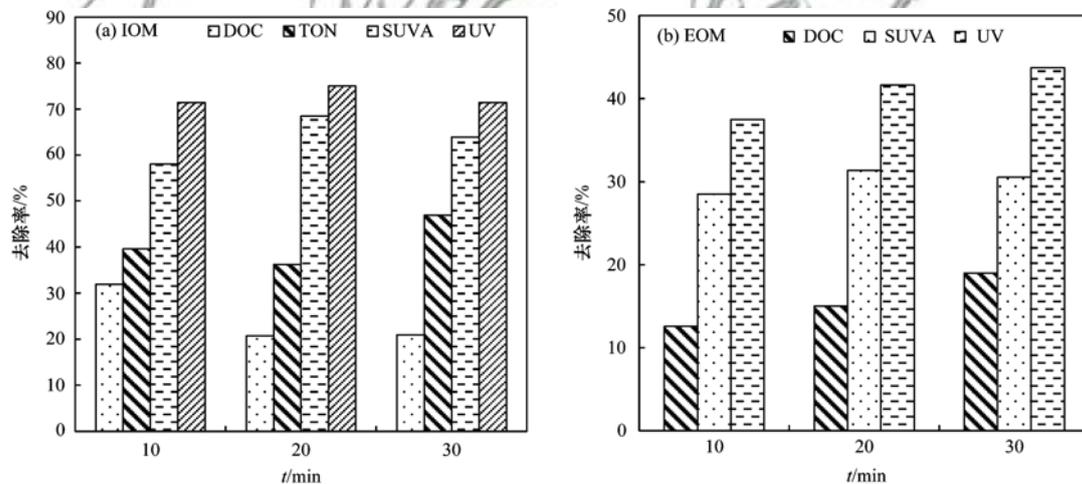


图 1 PAC 吸附时间对 AOM 的去除效果

Fig. 1 Removal efficiencies of AOM by PAC adsorption at different contact times

## 2.2 PAC 对 IOM 氯化生成 DBPs 的影响

本实验模拟的高浓度溴离子质量浓度为  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 氯化过程中有机物更容易与溴的氧化物形成溴代 DBPs<sup>[31]</sup>, 溴代 DBPs 成为 THMs 的主要组成部分. THMs 的总生成量随吸附时间延长而逐渐降低. 如图 4(a) 所示, 经 10、20 和 30 min 的 PAC 吸附处理, TCM 的生成量分别降低了 16.9%、24.6% 和 24.5%, BDCM 的生成量分别降低了 12.3%、18.0% 和 23.7%; DBCM 和 TBM 的去除率随吸附

时间的延长呈先下降后上升的趋势, 去除率分别为 7.7% ~ 14.4% 和 25.8% ~ 32.9%. 通常用单位浓度 DOC 的 DBPs 生成量表示 DBPs 的生成潜能. 经计算, 10 min 吸附后 4 种 THMs 的生成潜能约是原水的 1.1 ~ 1.3 倍, 延长吸附处理时间, 4 种 THMs 的生成潜能逐渐降低, 经 30 min 吸附处理的水样, 除 DBCM 外其余 3 种 THMs 的生成潜能均低于原水. 表明短时间的 ( $\leq 10 \text{ min}$ ) PAC 吸附虽然去除了一定的 DOC, 但是提高了 THMs 的生成潜能, 延长吸附时

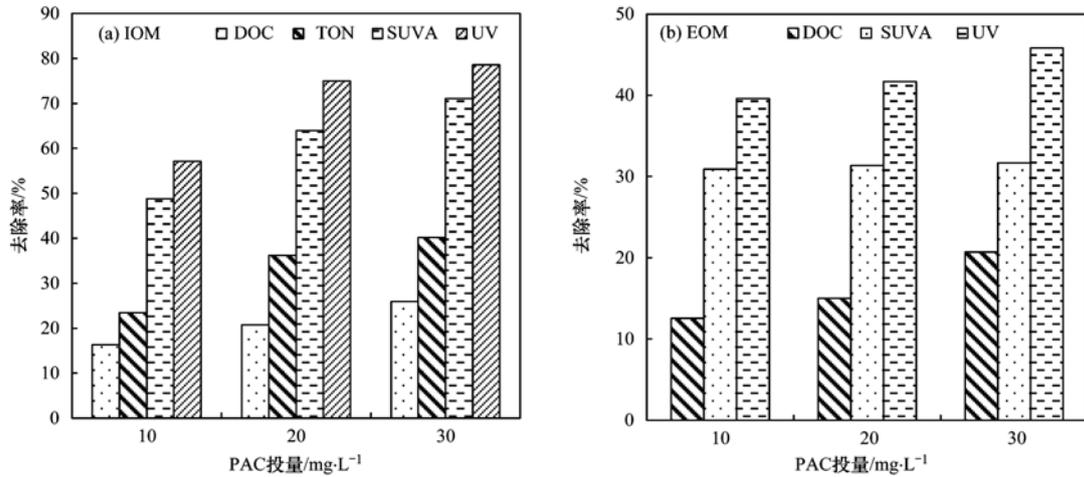
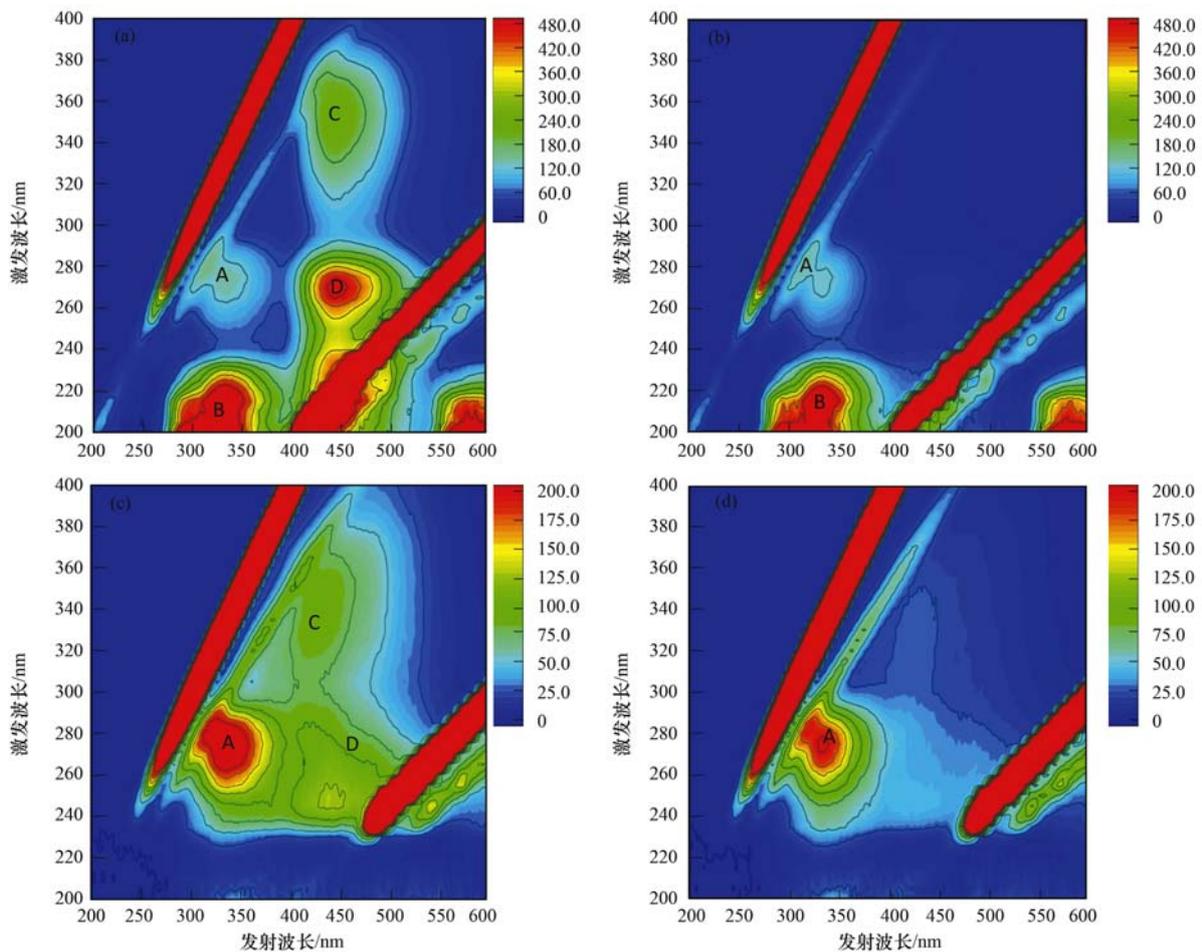


图2 PAC投加量对AOM的去除效果

Fig. 2 Removal efficiencies of AOM by PAC adsorption at different PAC dosags



(a)IOM 吸附前; (b)IOM 吸附后; (c)EOM 吸附前; (d)EOM 吸附后

图3 PAC吸附前后IOM和EOM的EEM特征光谱

Fig. 3 EEM characteristic spectra of IOM and EOM before and after PAC adsorption

间能提高 PAC 对 THMs 前体物的总体去除能力. 30 min 吸附后,TBM 在 4 种 THMs 中占比由 39.8% 降低至 35.3%, DBCM 占比由 32.9% 增加至 37.3%, 其余两种 THMs 变化不大. PAC 对 IOM 氯化生成

TBM 的削减效果略高于其他 3 种 THMs,说明 PAC 对 TBM 前体物的去除能力较高.

与 THMs 略有不同,DHANs 的总生成量在 PAC 吸附 20 min 时最低,与原水相比降低了 38.1%. 如

图 4(b) 所示, 吸附 10 min 时 DCAN 的去除率为 19.8%, 延长吸附时间至 20 min 和 30 min, 去除率反而下降为 18.9% 和 16.9%; BCAN 和 DBAN 在吸附 20 min 时去除效率最高, 分别为 14.8% 和 87.0%. 延长吸附时间并没有进一步降低 DHANs 的生成量. 吸附处理后 DCAN 和 BCAN 的生成潜能虽然随吸附时间的延长略有降低, 但仍高于原水; DBAN 的生成潜能约是原水的 20% ~ 30%. PAC 对 DBAN 前体物的去除能力较高, 20 min 吸附后, DBAN 在 3 种 DHANs 中占比可由 32.2% 降低至 6.8%, 而 BCAN 占比由 66.7% 上升至 91.8%, DCAN 基本不变.

THMs 的总生成量随 PAC 投加量的提高而逐渐降低. 如图 5(a) 所示, 投加量提高至  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, TCM、BDCM、DBCM 和 TBM 的去除率分别提高到 24.9%、28.5%、19.1% 和 32.2%. 提高 PAC 投加量, 虽有助于 THMs 生成量的减少, 但去除率均  $< 40\%$ . Kristiana 等<sup>[32]</sup> 认为 THMs 前体物的有效去除可能与 PAC 投加量关系较小, 而与 PAC 种类和水质影响较大. 此外 PAC 投加量对 THMs 生成潜能的削减作用不确定, DBCM 和 TBM 的生成潜能

随 PAC 投加量的提高略有降低, 而 TCM 和 BDCM 的生成潜能随 PAC 投加量的提高分别呈现逐渐上升和先上升后下降的趋势.

与 THMs 类似, 增加 PAC 投加量提高了 DHANs 的去除率. 如图 5(b) 所示, 投加量提高至  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, DCAN、BCAN 和 DBAN 的去除率分别提高到 19.8%、33.9% 和 83.3%. 本实验中 PAC 对 DBAN 前体物的去除能力显著, 去除率在 69.5% ~ 87.0%, 吸附处理后 DBAN 的生成潜能均低于原水. 但 Watson 等<sup>[33]</sup> 的实验结果表明, 混凝/活性炭吸附联合处理对 DBAN 前体物的去除效果并不理想, 只有 35% 的样品中 DBAN 的去除率能达到  $(36 \pm 17)\%$ . 去除效果的差异可能与活性炭种类、原水水质, 以及溴化 DBPs 比氯化 DBPs 更容易受到原水碱度、Br/DOC、DOC 和溴离子浓度等因素的影响有关.

### 2.3 PAC 对 EOM 氯化生成 DBPs 的影响

EOM 氯化生成更多的 THMs, 总生成量约是 IOM 的 1.3 倍, 其中 TCM 浓度明显提高, 约是 IOM 的 2.4 倍. EOM 氯化生成较少的 DHANs, 但 BCAN 浓度有所提高, 约是 IOM 的 1.2 倍, DCAN 和 DBAN 的浓度约是 IOM 的 50%. EOM 和 IOM 的 DHANs

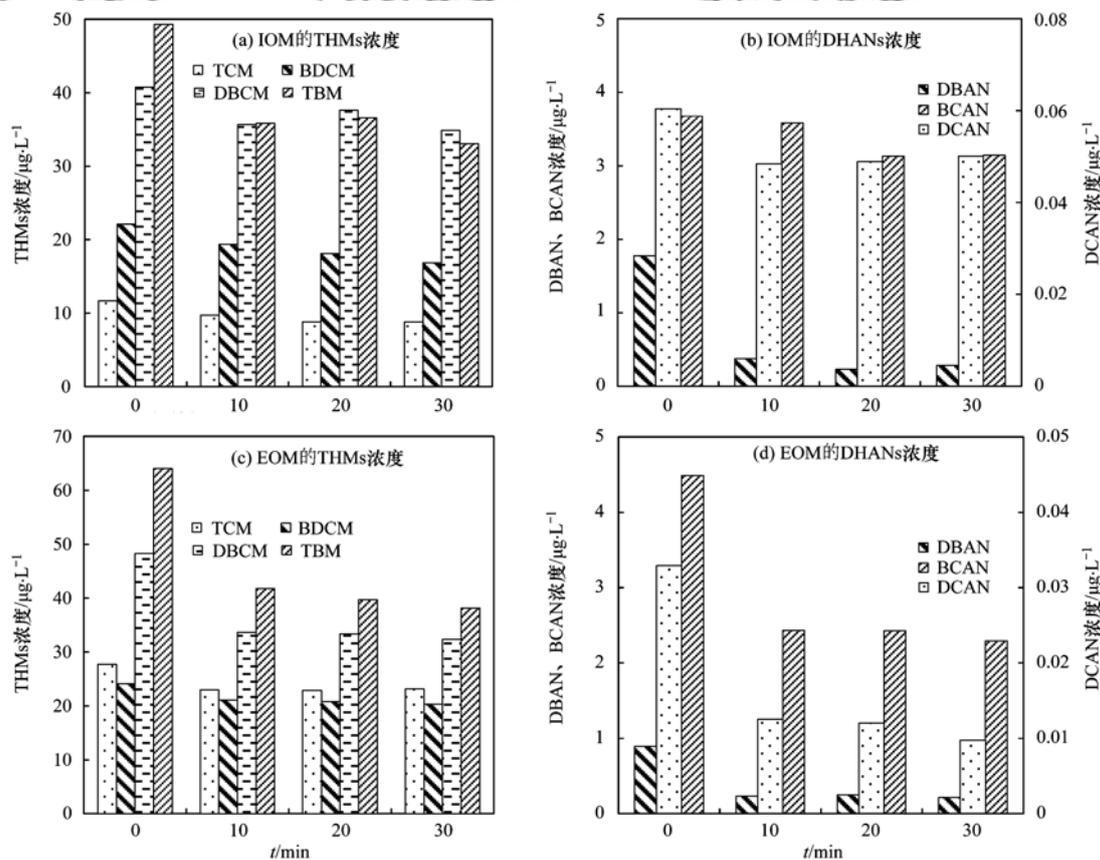


图 4 PAC 吸附时间对 AOM 氯化产生 DBPs 的种类的影响

Fig. 4 Effect of PAC adsorption time on the speciation of DBPs during chlorination of AOM

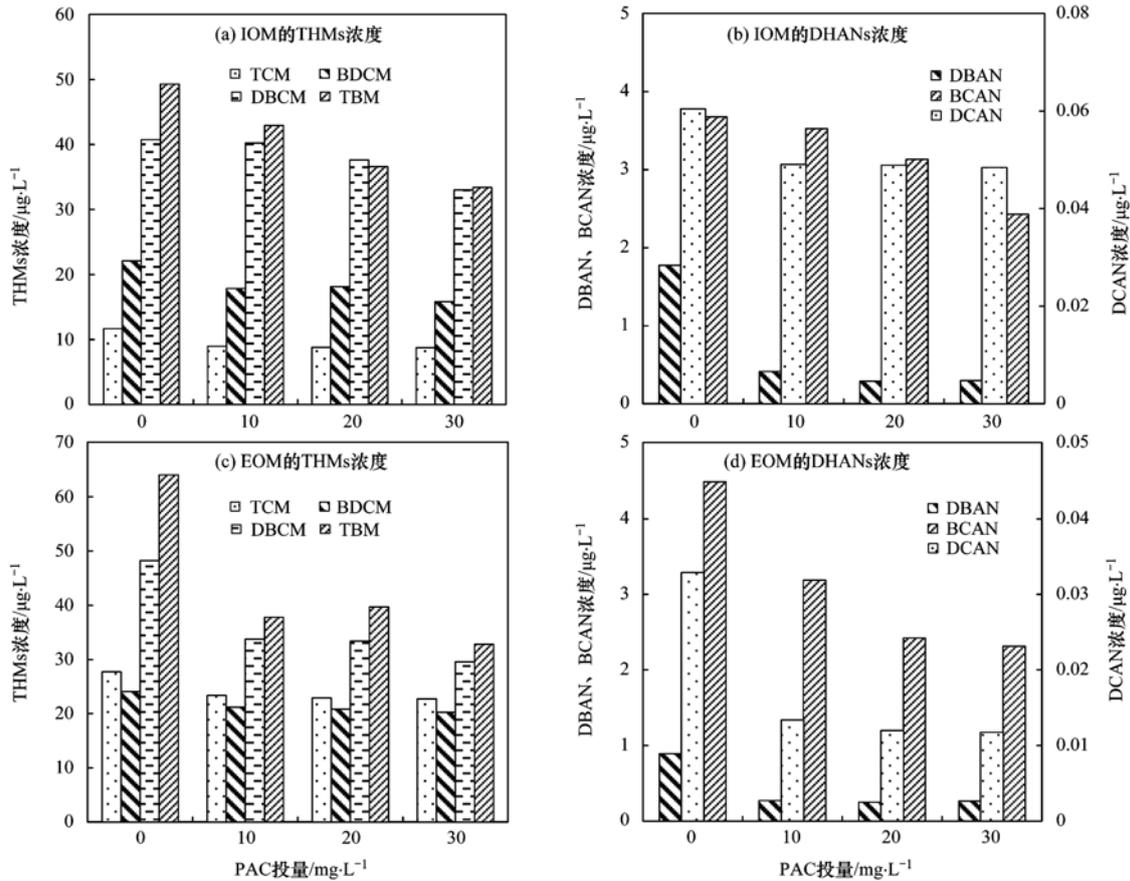


图5 PAC投加量对AOM氯化产生DBPs的种类的影响

Fig. 5 Effect of PAC dosage on the speciation of DBPs during chlorination of AOM

生成量均大于 NOM (TOC 为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 氯剂量为  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 反应时间为 24 h)<sup>[11]</sup>, 进一步说明 AOM 氯化后生成含氮 DBPs 的风险更大。

EOM 的 THMs 的总生成量随吸附时间延长而逐渐降低。如图 4(c) 所示, TCM 在吸附 20 min 时去除率最高, 为 17.5%; BDCM、DBCM 和 TBM 的去除率随吸附时间的延长逐渐提高, 30 min 吸附后去除率分别为 15.6%、33.0% 和 40.4%。延长吸附时间, THMs 的生成潜能并没有明显降低, 除 DBCM 外, 其余 3 种 THMs 的生成潜能略低于原水。PAC 对 EOM 中 THMs 前体物的去除效果高于 IOM。同 IOM 相似, PAC 对 TBM 的去除效果较显著, TBM 在 4 种 THMs 中占比由 39.0% 减少至 33.5%。与图 4(a) 对比看出, PAC 对 EOM 氯化生成的溴代 DBPs 的控制效果好于 IOM 生成的溴代 DBPs。

延长 PAC 吸附时间可以提高 EOM 溶液中 DHANs 的去除率, 30 min 吸附后, DCAN、BCAN 和 DBAN 的浓度分别减少了 70.4%、48.9% 和 76.3% [图 4(d)]。除 DBAN 外, PAC 对 EOM 氯化生成的其他 DHANs 的削减效果好于 IOM [图 4(b)]。延长

吸附时间也有利于降低 DHANs 的生成潜能。同 IOM 相似, PAC 对 EOM 的 DBAN 前体物的去除能力较高, 30 min 吸附处理后, DBAN 在 3 种 DHANs 中占比由 16.5% 降低至 8.4%, BCAN 占比由 82.9% 上升至 91.8%, DCAN 基本不变。

提高 PAC 投加量可以促进 THMs 总生成量的减少。PAC 投加量  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, TCM、BDCM、DBCM 和 TBM 去除率分别为 18.0%、15.9%、38.72% 和 48.8%。与 IOM 不同的是, 提高 PAC 投加量, TCM 和 BDCM 的生成潜能逐渐上升, 而 DBCM 和 TBM 的生成潜能呈先上升后下降的趋势。提高 PAC 的投加量也可以降低 DHANs 的总生成量, 其中 DBAN 的去除率维持在 70% 左右, PAC 的投加量为  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, DCAN 和 BCAN 的去除率分别提高到 64.2% 和 48.4%。

#### 2.4 PAC 对 THMs、DHANs 中溴取代参数的影响

由表 2 可知, 随着 PAC 吸附时间和投加量的增加, IOM 和 EOM 的 THMs-BSF 和 DHANs-BSF 值与未经 PAC 吸附的对照组相比普遍降低, 各别略有升高但幅度很小。IOM 中 DHAN-BSF 下降程度大于

THMs-BSF, EOM 中 THMs-BSF 的下降程度略大于 DHANs-BSF. 实验表明 PAC 吸附后不会增强溴离

子在 AOM 中的取代能力, 总体上溴代 DBPs 的生成能力不会增加.

表 2 PAC 对 THMs、DHANs 中溴取代参数的影响

Table 2 Effect of PAC on BSFs of THMs and DHANs

项目		PAC 吸附时间/min				PAC 投加量/mg·L <sup>-1</sup>			
		0	10	20	30	0	10	20	30
IOM	THMs-BSF	0.677	0.657	0.670	0.662	0.677	0.688	0.670	0.667
	DHANs-BSF	0.655	0.541	0.527	0.534	0.655	0.546	0.535	0.545
EOM	THMs-BSF	0.635	0.596	0.590	0.583	0.635	0.580	0.590	0.563
	DHANs-BSF	0.579	0.541	0.544	0.540	0.579	0.537	0.544	0.549

### 3 结论

(1) IOM 的 SUVA 值较低, EEM 光谱分析表明含有蛋白类、类腐殖质类组分; EOM 的蛋白类、类腐殖质类组分比 IOM 少. PAC 吸附改变了 AOM 的组成, 可以有效去除类腐殖质物质、芳香类物质, 但对蛋白类物质去除能力有限.

(2) PAC 投加量为 20 mg·L<sup>-1</sup> 且吸附 10 min 时 IOM 的 DOC 去除率为 20.7% ~ 31.9%, UV<sub>254</sub> 去除率为 71.4% ~ 75.0%, 延长吸附时间存在解吸附现象. 与 IOM 相比, PAC 对 EOM 的 DOC 和 UV<sub>254</sub> 去除率普遍较低, 且吸附过程缓慢.

(3) EOM 氯化后 THMs 的生成潜能较 IOM 稍大, 并且生成 TCM 较多; IOM 和 EOM 氯化生成的 DHANs 浓度基本一致, 除 BCAN 外, IOM 的 DHANs 生成潜能略大.

(4) 延长 PAC 吸附时间有利于 IOM 中 THMs 前体物的有效去除, 但没有进一步降低 DHANs 的生成量; 提高 PAC 投加量, THMs 和 DHANs 的去除率略有上升. 提高 PAC 吸附时间和投加量均可提高 EOM 中 THMs 和 DHANs 的去除率, PAC 对 EOM 氯化生成的 DBPs 的控制作用较好. PAC 吸附处理后不会提高溴代 DBPs 的生成能力.

#### 参考文献:

- [1] Tomlinson A, Drikas M, Brookes J D. The role of phytoplankton as pre-cursors for disinfection by-product formation upon chlorination[J]. *Water Research*, 2016, **102**: 229-240.
- [2] Zhou S Q, Zhu S M, Shao Y S, *et al.* Characteristics of C-, N-DBPs formation from algal organic matter; role of molecular weight fractions and impacts of pre-ozonation [J]. *Water Research*, 2015, **72**: 381-390.
- [3] Zamyadi A, Fan Y, Daly R I, *et al.* Chlorination of *Microcystis aeruginosa*; toxin release and oxidation, cellular chlorine demand and disinfection by-products formation [J]. *Water Research*, 2013, **47**(3): 1080-1090.
- [4] Yang X, Guo W H, Shen Q Q. Formation of disinfection byproducts from chlor(am)ination of algal organic matter[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **197**: 378-388.
- [5] Chu W H, Gao N Y, Deng Y, *et al.* Formation of nitrogenous disinfection by-products from pre-chloramination [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(7): 1187-1191.
- [6] Li R H, Gao B Y, Ma D F, *et al.* Effects of chlorination operating conditions on trihalomethane formation potential in polyaluminum chloride-polymer coagulated effluent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **285**: 103-108.
- [7] Korotta-Gamage S M, Sathasivan A. A review: potential and challenges of biologically activated carbon to remove natural organic matter in drinking water purification process [J]. *Chemosphere*, 2017, **167**: 120-138.
- [8] Chu W H, Gao N Y, Templeton M R, *et al.* Comparison of inclined plate sedimentation and dissolved air flotation for the minimisation of subsequent nitrogenous disinfection by-product formation [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(5): 647-651.
- [9] Yang X, Guo W H, Lee W. Formation of disinfection byproducts upon chlorine dioxide preoxidation followed by chlorination or chloramination of natural organic matter [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(11): 1477-1485.
- [10] 张婧, 翟洪艳, 季民. 混凝对藻源有机物的去除及其消毒副产物的控制 [J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(3): 56-60. Zhang J, Zhai H Y, Ji M. Removal of algal organic matter and control of disinfection by-products by coagulation [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(3): 56-60.
- [11] Fang J Y, Yang X, Ma J, *et al.* Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor(am)ination [J]. *Water Research*, 2010, **44**(20): 5897-5906.
- [12] Velten S, Knappe D R U, Traber J, *et al.* Characterization of natural organic matter adsorption in granular activated carbon adsorbers [J]. *Water Research*, 2011, **45**(13): 3951-3959.
- [13] Zhai H Y. Detection and formation of new polar brominated disinfection byproducts in disinfection of drinking waters [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and technology, 2011.
- [14] Zhang J Z, Yu J W, An W, *et al.* Characterization of disinfection byproduct formation potential in 13 source waters in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(2): 183-188.
- [15] Uyak V, Toroz I. Investigation of bromide ion effects on disinfection by-products formation and speciation in an Istanbul water supply [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(2): 445-451.
- [16] Richardson S D, Plewa M J, Wagner E D, *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water; a review and roadmap

- for research [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2007, **636**(1-3): 178-242.
- [17] 王丁明, 曹国凭, 贾云飞, 等. 活性炭吸附技术在水处理中的应用[J]. *北方环境*, 2011, **23**(11): 190-191.
- [18] EPA/600/R-95/131, *Methods for the determination of organic compounds in drinking water supplement III* [S].
- [19] 国家环境保护总局. *水和废水监测分析方法* [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Echigo S, Itoh S, Natsui T, *et al.* Contribution of brominated organic disinfection by-products to the mutagenicity of drinking water[J]. *Water Science & Technology*, 2004, **50**(5): 321-328.
- [21] 高乃云, 王昊, 黎雷, 等. 铜绿微囊藻细胞内外有机物特性及氯消毒副产物[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, **38**(9): 1314-1318.
- Gao N Y, Wang H, Li L, *et al.* Characteristics of intracellular and extra-cellular organic components of *Microcystis aeruginosa* and their byproducts formation potential during chlorination[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, **38**(9): 1314-1318.
- [22] Lee W, Westerhoff P, Esparza-Soto M. Occurrence and removal of dissolved organic nitrogen in US water treatment plants[J]. *Journal AWWA*, 2006, **98**(10): 102-110.
- [23] Joo S H, Mitch W A. Nitrile, aldehyde, and halomiroalkane formation during chlorination/chloramination of primary amines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(4): 1288-1296.
- [24] Lou J C, Tseng W B, Wu M C, *et al.* Removal of disinfection by-products in raw water using a biological powder-activated carbon system[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2012, **47**(10): 1478-1485.
- [25] 刘冰, 余国忠, 古励, 等. 混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1392-1401.
- Liu B, Yu G Z, Gu L, *et al.* Removal of DON in micro-polluted raw water by coagulation and adsorption using activated carbon [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1392-1401.
- [26] Chen B Y, Westerhoff P. Predicting disinfection by-product formation potential in water [J]. *Water Research*, 2010, **44**(13): 3755-3762.
- [27] 李政剑, 石宝友, 王东升. 不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4319-4324.
- Li Z J, Shi B Y, Wang D S. Comparative study on adsorption behaviors of natural organic matter by powered activated carbons with different particle sizes[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4319-4324.
- [28] Uyak V, Yavuz S, Toroz I, *et al.* Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption [J]. *Desalination*, 2007, **216**(1-3): 334-344.
- [29] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-Emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [30] 田川, 郭婷婷, 刘锐平, 等. 铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成: 氯化与溴化比较[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4282-4289.
- Tian C, Guo T T, Liu R P, *et al.* Formation of disinfection by-products by *Microcystis aeruginosa* intracellular organic matter: comparison between chlorination and bromination [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4282-4289.
- [31] Zhai H Y, Zhang X R, Zhu X H, *et al.* Formation of brominated disinfection byproducts during chloramination of drinking water: new polar species and overall kinetics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(5): 2579-2588.
- [32] Kristiana I, Joll C, Heitz A. Powdered activated carbon coupled with enhanced coagulation for natural organic matter removal and disinfection by-product control: application in a Western Australian water treatment plant [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(5): 661-667.
- [33] Watson K, Farré M J, Knight N. Comparing a silver-impregnated activated carbon with an unmodified activated carbon for disinfection by-product minimisation and precursor removal[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 672-684.

## CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China .....	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing .....	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels .....	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust .....	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014 .....	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing .....	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System .....	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province .....	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta .....	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus .....	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City .....	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations .....	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River .....	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	..... HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes .....	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas .....	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China .....	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills .....	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment .....	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions .....	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon .....	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb <sup>2+</sup> Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode .....	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode .....	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite .....	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Biochemical Method .....	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process .....	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge .....	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen .....	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge .....	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria .....	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems .....	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Lou Soil .....	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province .....	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil .....	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region .....	..... FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles .....	..... FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi .....	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China .....	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation .....	..... JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil .....	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice .....	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH .....	..... ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil .....	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI) .....	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge .....	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar .....	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance .....	..... HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)