

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

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

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张扬, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除

杨海燕^{1,2}, 王灿³, 鄢忠森², 李冬平¹, 赵焱¹, 瞿芳术², 梁恒², 徐叶琴¹, 李圭白^{2*}

(1. 广东粤海水务股份有限公司, 深圳 518021; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033)

摘要: 利用超滤实验以及 6 种粉末活性炭吸附东江水有机物的水质数据, 通过三维荧光光谱-平行因子分析 (EEM-PARAFAC), 考察东江水中造成不可逆膜污染的主要组分和活性炭吸附这些组分的效果; 随后进行活性炭对不可逆膜污染组分吸附效果与对应活性炭孔结构参数的相关性分析, 揭示活性炭的表面物理性质对不可逆膜污染物吸附的影响. EEM-PARAFAC 模型识别出东江水含有 2 个类腐殖质荧光组分 C1 和 C3, 以及 1 个类蛋白质 (类色氨酸) 荧光组分 C2, 其中 C2 为主要不可逆膜污染物. 同时, 所有活性炭对 3 种荧光组分均有较好的吸附效果, 其中对主要膜污染物 C2 的去除率可达 54.0% ~ 74.6%. 相关性分析发现, 活性炭对主要膜污染荧光组分 C2 吸附效果受活性炭微孔表面积的影响, 而活性炭对两种次要膜污染荧光组分 C1 和 C3 吸附效果受活性炭中大孔表面积和 BET 比表面积影响. 实验结果可为活性炭-超滤工艺处理东江水的活性炭选型提供技术指导.

关键词: 平行因子分析; 不可逆膜污染物; 活性炭; 吸附; 天然有机物

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1460-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609013

Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water

YANG Hai-yan^{1,2}, WANG Can³, YAN Zhong-sen², LI Dong-ping¹, ZHAO Yan¹, QU Fang-shu², LIANG Heng², XU Ye-qin¹, LI Gui-bai^{2*}

(1. Guangdong GDH Water Co., Ltd., Shenzhen 518021, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: Foulants responsible for hydraulic irreversible fouling in Dongjiang River water were identified by ultrafiltration process and their removal by powdered activated carbon (PAC) adsorption treatment was investigated using fluorescent excitation emission matrix and parallel factor analysis (EEM-PARAFAC). A correlation analysis was then carried out for samples between the maximum fluorescence intensities ($F_{\max}$) of three PARAFAC components after PAC adsorption and the surface properties of corresponding PAC samples. The results showed that two humic-like (C1 and C3) and one tryptophan-like fluorescent components were obtained through PARAFAC analysis, in which tryptophan-like component C2 was found to be the main substance in hydraulic irreversible foulants extracted from fouled membrane. Furthermore, the results of correlation analysis suggested that microspore area of PAC correlated with PAC adsorption of tryptophan-like fluorescent components, which played an important role in irreversible fouling. Both BET and mesopore + macropore area of PAC correlated with its adsorption of humic-like fluorescent components. The result provided support for selecting PAC in PAC-ultrafiltration hybrid process, which would be more effective for fouling control.

Key words: parallel factor analysis; irreversible foulants; activated carbon; adsorption; natural organic matter

超滤技术具有卓越的胶体和微生物截留性能, 能有效提高饮用水的生物安全性而被广泛应用于水库、湖泊、江河各类水体的市政给水工程^[1,2]. 然而, 膜污染特别是无法通过物理清洗去除的不可逆膜污染, 会严重增加超滤净水厂的制水成本和日常运行管理难度, 缩短膜使用寿命, 成为限制超滤技术推广应用的瓶颈^[3,4], 一直是超滤技术研究和应用的难点和热点.

学界关于引起膜污染的关键污染物仍有不同的

看法, 但普遍认为天然有机物, 特别是溶解性有机物是重要的膜污染物^[5]. 针对水体中溶解性有机物而进行的膜污染机制和控制研究有大量的报道^[5-8]. 其中包括利用活性炭对溶解性有机物有优异的吸附性能, 通过膜前预处理提高超滤出水水质, 强化饮用

收稿日期: 2016-09-01; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2015M581453)

作者简介: 杨海燕(1986~), 女, 博士, 主要研究方向为膜法水处理工艺, E-mail: karenyanghe@sina.com

* 通信作者, E-mail: liguibai@vip.163.com

水安全保障。然而,活性炭吸附工艺的膜污染控制效果一直存在争议。不少研究认为活性炭吸附有机污染物降低污染物负荷从而控制膜污染^[9~11],但同时也有研究发现活性炭吸附的有机物并不是引起膜污染的有机物,活性炭吸附的膜污染控制效果不明显^[12~14]。目前针对引起膜污染尤其是不可逆膜污染的有机物,探讨活性炭对其的吸附性能以及影响吸附效果因素的相关研究还比较少^[9],有必要进行更深入和系统地探讨。

本文以珠三角重要饮用水源东江水为实验原水,利用三维荧光技术结合平行因子分析,识别东江水中不可逆膜污染的荧光组分;同时考察不同活性炭对这些组分的吸附效果,并与相应活性炭的表面物理性质参数进行相关性分析,探讨活性炭对膜污染物吸附的关键影响因子,以期为活性炭-超滤工艺的活性炭选型,及进一步提高活性炭前处理膜污染控制效果提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验水源

实验原水取自广东东莞某净水厂水源,该水源位于珠江水系东江下游段(东莞市上游河段),引自东深供水莲湖至旗岭段供水管道。实验期间原水 pH 6.9~7.5,水温 27.4~33.1℃,浊度 4.5~33.2 NTU,UV₂₅₄ 0.029~0.056 cm⁻¹,高锰酸盐指数 1.7~3.2 mg·L⁻¹,氨氮 0.15~0.50 mg·L⁻¹。

1.2 活性炭及活性炭吸附实验

实验采用 6 种商用净水粉末活性炭作为吸附剂,考察活性炭对东江水溶解性有机物的吸附性能。商家所提供的活性炭基本性质如表 1 所示。为控制活性炭生产过程中有机物的残留和粒径等造成活性炭之间的差异,实验进行前,对活性炭进行筛分,取 100~200 目之间的样品,反复用去离子水清洗后于 105℃ 的烘箱内烘干备用。活性炭比表面积采用 NOVAtouchTM 吸附仪(美国)在 77 K 进行氮气吸附测定,分别采用 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 和

density functional theory (DFT) 模型计算样品的比表面积以及孔径分布。

采用批次实验,按 50 mg·L⁻¹ 活性炭浓度加入 100 mL 东江水中,在摇床(培英 DDHZ-300,中国)中振荡吸附 1 h (25℃) 后,通过 0.45 μm 尼龙膜过滤进行活性炭分离,测定吸附后的水样溶解性有机物浓度(DOC)、UV₂₅₄ 及三维荧光光谱,表征不同活性炭对东江水的吸附效果。

1.3 DOC、UV₂₅₄ 和三维荧光光谱测定

DOC 测定前,样品通过 0.45 μm 尼龙膜过滤,采用 multi N/C UV HS TOC 仪测定;UV₂₅₄ 采用 Wfz UV-2102C 型紫外可见分光光度计测量。

三维荧光光谱(EEM)采用日立 F7000 型荧光光谱仪在室温下测定。测定前水样经 0.45 μm 的尼龙膜过滤,pH 调节至中性;采用 1 cm 石英比色皿,激发波长(E_x)范围 220~450 nm,扫描间隔为 5 nm,发射波长(E_m)范围为 250~550 nm,扫描间隔为 1 nm,激发和发射缝宽度均为 5 nm,扫描速度为 2 400 nm·min⁻¹。测定结果扣除纯水 EEM 消除拉曼散射(Raman scatter)。

1.4 三维荧光光谱-平行因子分析

平行因子分析法(parallel factor analysis, PARAFAC)可实现对多组分混合物体系中不同成分的识别和比例计算^[15]。将 PARAFAC 和 EEM 结合可以将水中天然有机物分解为不同荧光性质相似的荧光组分,并定量这些荧光组分,可用于表征天然有机物性质和膜污染物鉴定^[16, 17]。本实验采用 Matlab® R2010b(Mathworks, 美国)处理荧光光谱数据。其中 PARAFAC 分析采用 Stedmon 等^[18]提供的 DOMFluor 工具箱,并采用折半法、一致性检验和残差分析来确定合适的因子数;利用 EEM-PARAFAC 得出的每种组分的最大荧光强度(F_{max}, R. U.)分析各荧光组分的相对浓度^[18]。

1.5 超滤实验及不可逆膜污染物分析

超滤实验在东莞某净水厂进行,装置如图 1 所

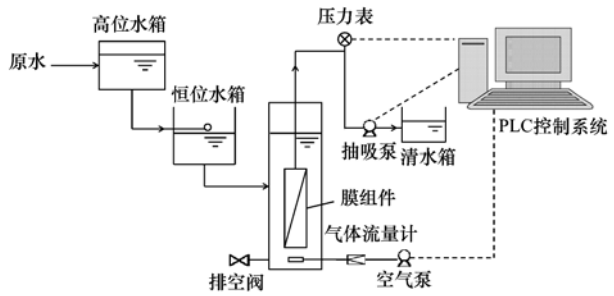


图 1 超滤实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of membrane ultrafiltration unit

表 1 粉末活性炭参数(生产商提供)

Table 1 Properties of PAC samples provided by manufacturers			
活性炭名称	碘值 /mg·g ⁻¹	亚甲基蓝值 /mg·g ⁻¹	水分 /%
A	800	157.5	4
B	900	195	1
C	600	64.5	2
Norit	1 100	240	2
N1	1 086	211	1.8
N2	805	105	1.5

示. 采用浸没式中空纤维超滤装置,膜丝为海南立升提供的 PVC 合金膜(膜孔径 0.01 μm ,膜内/外径 1.1/1.7 mm,长度 40 cm,膜面积 23.15 cm^2). 实验以恒定通量 35 $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 运行,每抽吸 1 h,进行气洗联合反洗 1 min,反洗水通量为 70 $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,气洗强度为 0.67 $\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ (以膜面积计算). 运行 15 个周期.

为表征超滤处理东江水过程的主要不可逆膜污染物,超滤实验结束后进行反冲洗,取出超滤膜丝,在 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液浸泡 12 h,把膜组件中物理清洗无法去除的不可逆膜污染物洗脱出来,调节清洗液 pH 至中性后测定其 DOC、UV₂₅₄ 和 EEM.

2 结果与讨论

2.1 东江水溶解性有机物的荧光组认识别

利用 PARFA 模型对本实验中超滤处理前后及活性炭吸附前后的东江水样的三维荧光光谱进行模拟,根据得到的一致性检验和残差分析,共识别出 3 个荧光组分(图 2),分别为 C1 [E_x/E_m , 255(320)/440 nm], C2(270~275/324 nm), C3 [<240 (295)/380~382 nm],包括 2 个类腐殖质(C1 和 C3)和 1 个类蛋白质组分,所有组分具有单一发射峰. 这些组分的光谱性征与其他文献用 PARAFAC 鉴别出的荧光组分相似^[16, 19~22],各组分的最大激发/发射波长、性质描述及文献结果对比如表 2 所示.

其中,C1 为短波类腐殖质,是天然水体中比较常见的荧光组分,主峰位于与类富里酸物质相关的区域Ⅲ(A 峰),次峰则位于与类腐殖酸物质相关的区域Ⅴ(M 峰)^[16, 21, 23]. C2 为类色氨酸物质,其主要游离或者结合在蛋白质中,来源于生物代谢作用^[20, 22]. C3 为长波类的腐殖质和短波类的腐殖质物质,与生物作用相关^[20]. 由平行因子模型得到的各组分最大荧光强度(F_{max})可用于反映各荧光组分

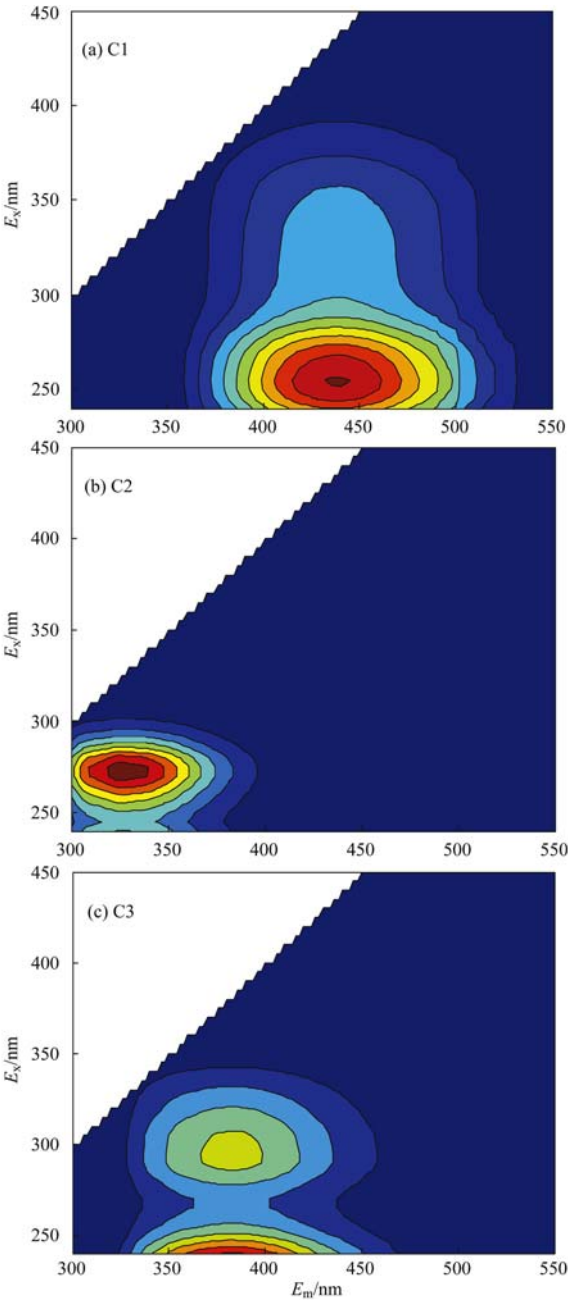


图 2 平行因子法解析得到的东江水中的荧光组分
Fig. 2 Contour plots of three fluorescent components in Dongjiang River water extracted from PARAFAC model

表 2 3 种荧光组分的光谱特性及其物质鉴定

Table 2 Spectral characteristics and description of three components identified			
本研究		其他研究组分鉴定及性质	文献
组分	E_x/E_m		
组分 1/C1	255(320)/440	组分 1,微生物源或海洋源腐殖质类有机物;240(310)/400~450	[16]
		组分 3,微生物源或海洋源腐殖质类有机物; <240 -260(295~380)/374-450	[21]
组分 2/C2	275/324	组分 1,类色氨酸有机物;275/330	[22]
		组分 7,类色氨酸有机物;270/306	[20]
组分 3/C3	<240 (295)/382	组分 3,微生物源或海洋源腐殖质类有机物 <240 -260(295~380)/374~450	[21]
		生物源类腐殖质有机物; <260 (305)/378	[19]

的相对浓度. 本实验中东江水中 C1 ~ C3 的 $F_{\max}$ 值分别为 (0.871 ± 0.012) 、 (0.640 ± 0.075) 和 (0.599 ± 0.031) R. U., 以 C1 类腐殖质物质的强度最高.

2.2 东江水不可逆膜污染物荧光特性

为研究东江水中不可逆膜污染物的组成, 进行了超滤处理东江水实验, 提取不可逆膜污染物进行分析. 超滤进出水及清洗液的 SUVA 值分别为 (2.37 ± 0.26) 、 (2.60 ± 0.59) 和 (1.34 ± 0.26) $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$, 清洗液的 SUVA 值比超滤进出水要低, 其有机物的芳香结构和共轭双键的程度比超滤进出水要低, 即腐殖质含量有所下降.

由于无法直接比较超滤进出水与清洗液的荧光组分强度, 采用各荧光组分的 $F_{\max}$ 占三荧光组分 $F_{\max}$ 的比例来反映水样的荧光组分构成, 进一步分析东江水中不可逆膜污染物荧光成分和性质. 图 3 显示了超滤进出水和清洗液中各荧光组分比例, 清洗液中 C1、C2 所占比例与超滤进出水存在显著差异 ($P < 0.05$). 其中, 清洗液中的 C2 类色氨酸物质的比例比超滤进出水的比例显著升高 ($> 50\%$); 而两类腐殖质荧光组分 C1 和 C3 在清洗液中的比例分别为 $(21.8 \pm 1.6)\%$ 和 $(23.2 \pm 5.1)\%$, 比超滤进出水中的比例有不同程度的下降. 东江水不可逆膜污染物中荧光组分含有类腐殖质类和类色氨酸物质, 且类色氨酸物质所占比例更高, 对不可逆膜污染的影响更大. Shao 等^[16] 在分析松花江水荧光组分与不可逆膜污染之间的相关性研究中也发现了类似的结果.

2.3 活性炭对东江水溶解性有机物及其荧光组分的吸附效果

2.3.1 活性炭对东江水溶解性有机物的吸附效果

本实验考察了 6 种商用粉末活性炭对东江水溶解性有机物的去除效果, 结果如表 3 所示. 经过 1 h 的吸附处理, 6 种活性炭都显示出对东江水 DOC 有较好的吸附效果. 从表 3 不难发现, 所有活性炭对 UV_{254} 的去除率都比 DOC 去除率高, 而 UV_{254} 反映的是含有苯环、共轭双键等大分子类腐殖质类有机物, 即这些活性炭更偏向于吸附有机物中的腐殖质类物质. 大部分研究认为活性炭由于表面性质会优先吸附非极性有机物, 对腐殖质类有机物吸附效果较好^[24, 25]. 而在本实验中, 经活性炭吸附后各水样的 SUVA 值均比原水的值要低, 活性炭吸附降低了水中腐殖质类有机物的含量.

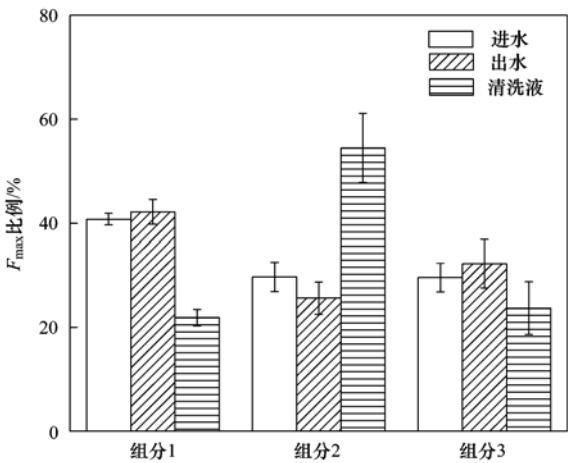


图 3 超滤进出水和化学清洗液不同荧光组分强度 $F_{\max}$ 的比例
Fig. 3 Percentages of three components $F_{\max}$ of the feed, permeate and washing solutions

活性炭由于生产原料、生产工艺的不同, 会导致其性质存在一定的差异性. 本实验中 6 种商用活性炭对同一水源东江水的 DOC 去除率从 22.1% (活性炭 N2) 到 51.8% (活性炭 Norit), 各活性炭吸附东江水 DOC 效果顺序为: Norit > B > A > N1 > C > N2, 其中活性炭 A、N1、C 之间的吸附效果没有显著性差异 ($P > 0.05$). 同时, 这些活性炭对 UV_{254} 的去除效果顺序与 DOC 去除效果顺序相同, 但吸附效果最差的活性炭 N2 与活性炭 A、N1、C 之间的吸附效果没有显著性差别 ($P > 0.05$). 这些活性炭中以活性炭 Norit 对东江水的 DOC 和 UV_{254} 去除效果最好.

表 3 不同活性炭对东江水溶解性有机物去除效果¹⁾

Table 3 Removal of dissolved organic matter in Dongjiang River water by different activated carbons

活性炭名称	DOC 去除率/%	UV_{254} 去除率/%	SUVA / $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$
原水	—	—	2.37 ± 0.26^a
A	36.1 ± 4.5^c	55.2 ± 11.3^{bc}	1.56 ± 0.29^b
B	43.0 ± 0.9^b	63.8 ± 13.8^b	1.41 ± 0.47^b
C	32.3 ± 4.5^c	47.5 ± 13.0^{bc}	1.54 ± 0.46^b
Norit	51.8 ± 1.7^a	80.6 ± 5.6^a	0.855 ± 0.252^c
N1	35.0 ± 2.4^c	51.1 ± 13.2^{bc}	1.68 ± 0.43^b
N2	22.1 ± 7.2^d	39.9 ± 3.9^c	1.91 ± 0.18^b

1) 不同小写字母表示 5% 水平上存在显著性差异, Games-Howell 和 S-K-N 检验

2.3.2 活性炭对东江水主要荧光组分的吸附效果

以活性炭吸附前后水样中荧光组分 $F_{\max}$ 来反映不同活性炭对东江水各荧光组分的吸附效果. 实验结果如图 4 所示, 活性炭吸附作用对各荧光组分的 $F_{\max}$ 均有不同程度的降低, 总体来讲, 这些活性炭对

C3 组分的去除效果最好,其次是 C1 组分,对 C2 组分的去除效果较差. 本实验的 6 种活性炭对组分 C1 去除率从 88.9% (活性炭 Norit) 到 46.2% (活性炭 C),对 C2 组分的去除率从 74.6% (活性炭 Norit) 到 54.0% (活性炭 C),对 C3 的去除率从 89.1% (活性炭 B) 到 69.5% (活性炭 N2).

对不同活性炭吸附荧光组分的结果进行单因素 ANOVA 方差分析发现,活性炭之间对 3 种荧光组分吸附效果均存在显著性差异 ($P < 0.05$),活性炭类型对这些荧光组分的吸附效果有显著影响. 其中,6 种活性炭对类腐殖质荧光组分 C1 和 C3 的 $F_{\max}$ 吸附效果顺序与其对总体溶解性有机物的吸附效果顺序一致,这些活性炭对荧光组分 C1 吸附后的 $F_{\max}$ 之间两两存在显著差异 ($P < 0.05$),而活性炭之间对荧光组分 C3 的吸附效果差异性显著性弱一些,如活性炭 B 与 Norit、A 与 N1 之间没有显著差异,即活性炭样品的差异对荧光组分 C1 和 C3 吸附效果都有影响且对荧光组分 C1 吸附影响可能更大. 此外,这些活性炭对 C2 类色氨酸荧光组分的吸附效果的顺序为 Norit < B < N1 < A < N2 < C,与其他两种荧光组分次序有所不同,活性炭 C 吸附后 C3 荧光强度

较 N2 强,活性炭 A 吸附后 C3 荧光强度较 N1 强,这与这些活性炭吸附溶解性有机物能力不同,但没有显著性差异. 活性炭对 3 种荧光组分吸附性能都受活性炭性质影响,但影响的程度和关键因素可能有所不同.

2.3.3 活性炭表面性质与其吸附东江水溶解性有机物效果的相关性分析

由于 6 种活性炭进行的吸附实验条件和吸附质(东江水)相同,这些活性炭表现出对东江水吸附溶解性有机物吸附效果的差异,主要是由活性炭自身性质差异引起的,活性炭孔结构是影响活性炭吸附效果的重要因素之一^[24, 26]. 为进一步分析影响活性炭对不同荧光组分,特别是对不可逆膜污染有重要贡献的类色氨酸物质吸附效果的关键因素,测定了实验中的 6 种活性炭的 BET 比表面积、孔径分布(以微孔表面积和中孔 + 大孔表面积反映活性炭孔径分布特点),并进行活性炭的孔结构参数与活性炭吸附荧光组分及 DOC 效果的相关性分析. 相关系数矩阵如表 4 所示,下文所提到的 DOC、UV₂₅₄、各荧光组分的 $F_{\max}$ 值均为活性炭吸附后的数值.

表 4 DOC、UV₂₅₄、荧光组分的 $F_{\max}$ 与活性炭表面孔结构的相关系数矩阵¹⁾

Table 4 Pearson correlation matrix of DOC concentration, UV₂₅₄, $F_{\max}$ of the three PARAFAC components and surface pore structure of activated carbon samples

	C1	C2	C3	DOC	UV ₂₅₄	S_{BET}	S_{micro}	S_{meso}
C1	1.00	0.899 *	0.976 **	0.986 **	0.986 **	-0.981 **	-0.903 *	-0.896 *
C2		1.00	0.955 *	0.884 *	0.867	-0.841	-0.927 *	-0.611
C3			1.00	0.955 *	0.940 *	-0.961 **	-0.968 **	-0.791
DOC				1.00	0.997 **	-0.951 *	-0.853	-0.891 *
UV ₂₅₄					1.00	-0.948 *	-0.830	-0.909 *
S_{BET}						1.00	0.919 *	0.914 *
S_{micro}							1.00	0.680
S_{meso}								1.00

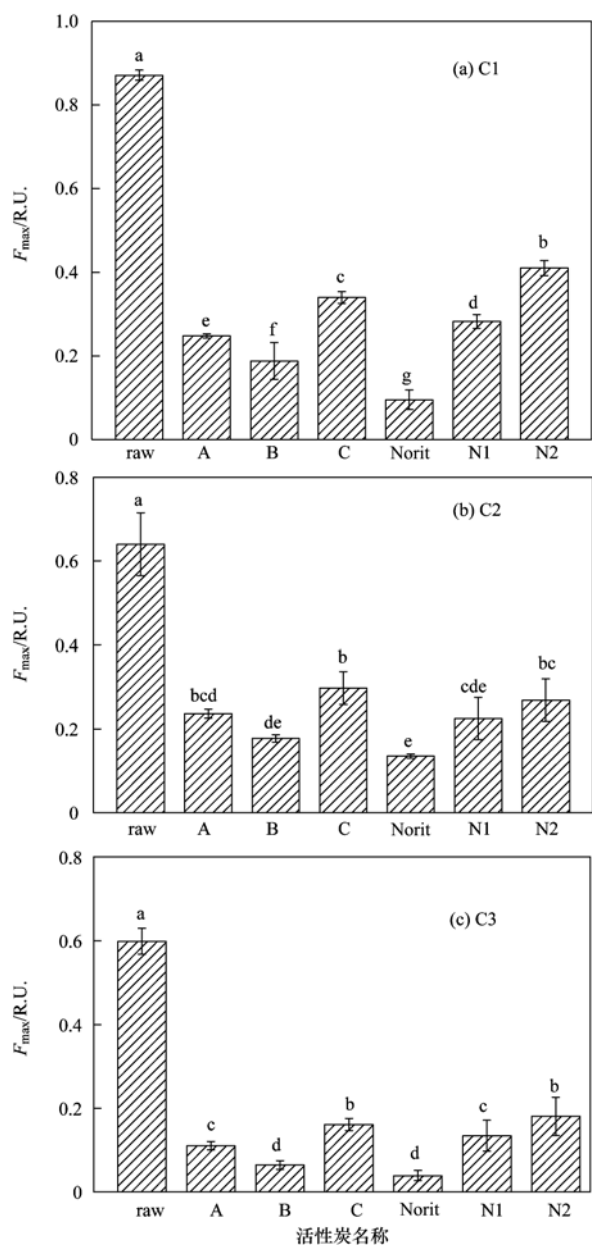
1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关

结果显示,水样中的类腐殖质组分 C1、C3 的 $F_{\max}$ 与 UV₂₅₄ 存在很好的正相关,主要因为 C1 和 C3 两种类腐殖质组分的芳香性较高. 与此同时,类色氨酸类组分 C2 与 UV₂₅₄ 不存在显著性相关,而其与 DOC 的相关系数也小于类腐殖质组分 C1、C2 与 DOC 的相关性. Shao 等^[16] 研究松花江水的荧光组分时也发现蛋白质类组分与 DOC 组分相关性没腐殖质类组分好,可能是由于蛋白质类组分在 DOM 中所占比例较少.

反映活性炭对水体总体有机物吸附性能的 DOC 和 UV₂₅₄ 与活性炭的 BET 比表面积(S_{BET})存在明显的负相关($P < 0.05$),活性炭的 S_{BET} 越大,活性炭对天然有机物的吸附性能越好. 而表征活性炭孔

分布的微孔表面积(S_{micro})和中孔 + 大孔表面积(S_{meso})中,DOC 和 UV₂₅₄ 与 S_{meso} 存在更好的负相关,但与微孔面积没有显著相关. 如表现出对 DOC 和 UV₂₅₄ 去除效果最优的活性炭 Norit,虽然测得其 S_{BET} 与活性炭 B 和 N1 较为接近,但其 S_{meso} 明显比其他 5 种活性炭样品大. 这表明,虽然活性炭的比表面积主要以微孔为主,但中孔及大孔结构以活性炭吸附天然有机物有更重要影响. Li 等^[9] 比较活性炭和中孔树脂对不同膜污染物吸附性能中也发现中孔对吸附天然有机物有重要影响.

更重要的是,作为主要不可逆膜污染物荧光组分的类色氨酸物质 C2,其 $F_{\max}$ 与 S_{micro} 相关性较好,即活性炭对 C2 类色氨酸物质的吸附性能与活性炭



不同小写字母表示 5% 水平上存在显著性差异

(Games-Howell 和 S-K-N 检验)

图 4 不同活性炭吸附前后东江水荧光组分最大荧光强度 $F_{\max}$

Fig. 4 The $F_{\max}$ of PARAFAC components of Dongjiang River water without and with different activated carbon adsorption treatments

的微孔结构相关,活性炭的微孔越丰富,活性炭对 C2 的吸附效果越好。游离的类色氨酸由于其分子量较小,较易通过中孔进入微孔,吸附到活性炭表面^[14]。另外两种次要膜污染物荧光组分 C1 和 C3 类腐殖质物质,其 $F_{\max}$ 值与 S_{BET} 有很好的相关性 ($R^2 > 0.92$),且 C1 的 $F_{\max}$ 与活性炭孔结构的 S_{micro} 和 S_{meso} 有显著相关性, C3 的 $F_{\max}$ 也与 S_{micro} 有很好的相关性。活性炭的比表面积和孔结构都对类腐殖质的吸附性能有影响,这与腐殖质物质分子量分布较广,

吸附到活性炭不同孔径内有关^[14]。

上述相关性分析表明,活性炭的比表面积与吸附东江水溶解性有机物效果有显著正相关,其中的中孔和大孔结构对其吸附效果有重要影响。对于不可逆膜污染物主要荧光组分 C2 类色氨酸物质,活性炭孔结构中的微孔对其吸附效果影响最大。另外,活性炭的比表面积及孔结构中的微孔对不可逆膜污染物中的次要荧光组分类腐殖质物质有重要的影响作用。基于上述分析,从活性炭吸附性能膜污染物的角度来说,选择比表面积和微孔结构丰富的活性炭更利于吸附类色氨酸(蛋白质类)物质,降低东江水中引起不可逆膜污染的污染负荷,有利于不可逆膜污染的控制。在活性炭-超滤工艺的复杂系统中,对于活性炭表面性质影响不可逆膜污染积累的过程,需要在今后的研究中结合活性炭-超滤膜污染实验、活性炭和超滤膜表面成分分析,来进一步验证和揭示活性炭吸附在活性炭-超滤工艺膜污染控制机制。

3 结论

(1) EEM-PARAFAC 分析识别出东江水溶解性有机物中含有 3 个不同荧光组分,分别为 2 个生物来源的类腐殖质荧光组分(C1 和 C3)以及 1 个生物来源的类色氨酸荧光组分(C2)。

(2)超滤处理东江水过程中,不可逆膜污染物的荧光组分以类色氨酸有机物 C2 为主 (> 50%),其次为两个腐殖质荧光组分 C1 和 C3。

(3)实验采用的 6 种粉末活性炭对东江水的 DOC、 UV_{254} 和 3 种荧光组分都有不同程度的吸附效果,活性炭之间的吸附效果存在显著性差异 ($P < 0.05$),其中活性炭 Norit 效果最好,对主要膜污染物荧光组分 C2 去除率达 74.6%。

(4)活性炭吸附两种类腐殖质荧光组分 C1 和 C3 与活性炭的 BET 比表面积、微孔结构显著相关,而活性炭吸附主要膜污染物类色氨酸组分 C2 只与活性炭微孔结构显著相关。

(5)采用活性炭吸附作为超滤处理东江水的预处理工艺控制不可逆膜污染时,建议选择比表面积大且微孔较为丰富的活性炭作为膜前吸附剂,降低引起不可逆膜污染的污染物负荷。

参考文献:

- [1] 李圭白,田家宇,齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水, 2010, 36(8): 11-15.
- Li G B, Tian J Y, Qi L. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of

- ultrafiltration[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, **36**(8): 11-15.
- [2] 李圭白, 梁恒. 创新与我国城市饮用水净化技术发展[J]. *给水排水*, 2015, **41**(11): 1-7.
- [3] 范小江, 张锡辉, 苏子杰, 等. 超滤技术在我国饮用水厂中的应用进展[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(22): 64-70.
Fan X J, Zhang X H, Su Z J, *et al.* Application of ultrafiltration technology in drinking water treatment plants in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(22): 64-70.
- [4] 洪云, 肖萍, 张伟军, 等. 浸没式超滤膜处理再生水过程中的膜污染与化学清洗[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(5): 2495-2500.
Hong Y, Xiao P, Zhang W J, *et al.* Membrane fouling and chemical cleaning for wastewater reclamation using submerged ultrafiltration membrane[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(5): 2495-2500.
- [5] 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.
- [6] 李伟英, 许晨, 张骏鹏, 等. 预处理工艺控制膜污染试验及其机理分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, **44**(5): 758-766.
Li W Y, Xu C, Zhang J P, *et al.* Experiment and mechanism analysis of pretreatment process control membrane fouling[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, **44**(5): 758-766.
- [7] 孙丽华, 俞天敏, 田海龙, 等. 典型有机物与超滤膜界面作用及膜污染机制研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 530-536.
Sun L H, Yu T M, Tian H L, *et al.* Interaction of typical organic matters on ultrafiltration membrane and the mechanism of membrane fouling[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 530-536.
- [8] Pramanik B K, Roddick F A, Fan L H. Effect of biological activated carbon pre-treatment to control organic fouling in the microfiltration of biologically treated secondary effluent [J]. *Water Research*, 2014, **63**: 147-157.
- [9] Li K, Liang H, Qu F S, *et al.* Control of natural organic matter fouling of ultrafiltration membrane by adsorption pretreatment: comparison of mesoporous adsorbent resin and powdered activated carbon[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, **471**: 94-102.
- [10] Liu Y W, Li X, Yang Y L, *et al.* Fouling control of PAC/UF process for treating algal-rich water [J]. *Desalination*, 2015, **355**: 75-82.
- [11] Campinas M, Rosa M J. Assessing PAC contribution to the NOM fouling control in PAC/UF systems[J]. *Water Research*, 2010, **44**(5): 1636-1644.
- [12] Thiruvengkatchari R, Shim W G, Lee J W, *et al.* A novel method of powdered activated carbon (PAC) pre-coated microfiltration (MF) hollow fiber hybrid membrane for domestic wastewater treatment [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, **274**(1-3): 24-33.
- [13] Lin C F, Huang Y J, Hao O J. Ultrafiltration processes for removing humic substances: effect of molecular weight fractions and PAC treatment[J]. *Water Research*, 1999, **33**(5): 1252-1264.
- [14] 张婧怡, 石宝友, 解建坤, 等. 活性炭物化性质对吸附天然水体中有机污染物的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 494-500.
- Zhang J Y, Shi B Y, Xie J K, *et al.* Effect of physico-chemical characteristics of activated carbon on the adsorption of organic pollutants in natural water[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 494-500.
- [15] 祝鹏, 华祖林, 李惠民. 湖泊水体三维荧光光谱的 PARAFAC 法在污染源解析中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(12): 3290-3294.
Zhu P, Hua Z L, Li H M. Application of parallel factor analysis method of the three-dimensional fluorescence spectra in source apportionment of pollutions in water environment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(12): 3290-3294.
- [16] Shao S L, Liang H, Qu F S, *et al.* Fluorescent natural organic matter fractions responsible for ultrafiltration membrane fouling: identification by adsorption pretreatment coupled with parallel factor analysis of excitation-emission matrices [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, **464**: 33-42.
- [17] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 475-482.
Feng W Y, Zhu Y R, Wu F C, *et al.* The fluorescent characteristics and sources of dissolved organic matter in water of Tai Lake, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 475-482.
- [18] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2008, **6**(11): 572-579.
- [19] Yamashita Y, Jaffé R. Characterizing the interactions between trace metals and dissolved organic matter using excitation-emission matrix and parallel factor analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(19): 7374-7379.
- [20] 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.
- [21] Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems: a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(4): 2006-2017.
- [22] Yu H R, Qu F S, Liang H, *et al.* Understanding ultrafiltration membrane fouling by extracellular organic matter of *Microcystis aeruginosa* using fluorescence excitation-emission matrix coupled with parallel factor analysis [J]. *Desalination*, 2014, **337**: 67-75.
- [23] 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.
- [24] Li L, Quinlivan P A, Knappe D R U. Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution [J]. *Carbon*, 2002, **40**(12): 2085-2100.
- [25] Nguyen S T, Roddick F A. Pre-treatments for removing colour from secondary effluent: effectiveness and influence on membrane fouling in subsequent microfiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, **103**: 313-320.
- [26] Dastgheib S A, Karanfil T, Cheng W. Tailoring activated carbons for enhanced removal of natural organic matter from natural waters[J]. *Carbon*, 2004, **42**(3): 547-557.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)