

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

## 冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 ..... 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM<sub>2.5</sub> 的影响 ..... 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM<sub>2.5</sub> 分布影响因素及交互效应 ..... 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 ..... 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 ..... 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 ..... 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 ..... 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 ..... 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 ..... 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 ..... 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 ..... 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 ..... 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 ..... 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 ..... 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 ..... 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 ..... 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 ..... 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 ..... 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 ..... 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 ..... 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 ..... 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 ..... 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 ..... 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 ..... 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 ..... 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 ..... 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 ..... 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 ..... 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 ..... 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 ..... 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 ..... 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 ..... 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 ..... 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 ..... 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 ..... 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 ..... 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 ..... 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 ..... 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 ..... 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 ..... 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 ..... 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 ..... 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 ..... 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 ..... 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 ..... 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 ..... 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 ..... 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

# 蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性

李梦雅<sup>1</sup>, 宋钰莹<sup>1</sup>, 张晓岚<sup>2</sup>, 黄海鸥<sup>1\*</sup>

(1. 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 北京市自来水集团有限责任公司技术研究院, 北京 100012)

**摘要:** 蛋白类有机质(pDOM)广泛存在于天然水体中,是非常重要的含氮消毒副产物前驱物. 近年来,其在饮用水处理过程中的去除和控制逐渐受到广泛关注. 本文以两个实际饮用水厂不同工段进出水为研究对象,通过高效尺寸排阻色谱联合紫外、荧光及有机碳检测器的分析方法,对水样中 pDOM 不同分子量组分的去除特性及变化规律进行探究. 同时,选取混凝和活性炭吸附两种水处理技术进行小试实验,进一步探究 pDOM 组分在常规处理单元的去除规律. 结果表明, pDOM 在不同水处理单元具有不同的去除特性,预氧化能够有效分解类色氨酸和类酪氨酸型高分子组分,且随着氧化剂氧化作用增强,更多的高分子组分被氧化分解为小分子,但一些分子量较大的脂肪族蛋白等组分则难以被氧化分解; 混凝沉淀对高分子组分有良好去除效果,尤其是类色氨酸型 pDOM,且混凝过程可能存在一定量 pDOM 组分的释放,多为小分子及疏水性组分; 活性炭过滤易去除分子量较低及疏水性较强的组分,但炭砂滤池长期运行可能存在微生物滋生,因此造成出水部分 pDOM 组分浓度增加; 紫外消毒在一定程度上提高了小分子组分的去除效率. 由于实际水厂运行过程中水质条件变化复杂且微生物活动不可控,故各处理单元对 pDOM 的去除并没有展现协同作用. 且相比于腐殖质类物质, pDOM 组分受水质变化影响较大,从整体工艺流程来看,去除效果有限. 因此在水厂未来运行中,应加强进出水中 pDOM 各组分的监测,及时对各处理单元运行参数进行调整,同时考虑结合臭氧-生物活性炭工艺,或增加纳滤等膜过滤单元,严格控制 pDOM 组分的去除.

**关键词:** 蛋白类有机质(pDOM); 高效尺寸排阻色谱; 饮用水处理; 混凝; 活性炭吸附

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3348-10 DOI: 10.13227/j.hjx.202010204

## Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants

LI Meng-ya<sup>1</sup>, SONG Yu-ying<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-lan<sup>2</sup>, HUANG Hai-ou<sup>1\*</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Technology Institute of Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing 100012, China)

**Abstract:** Protein-like dissolved organic matter (pDOM), which is ubiquitous in natural waters, is a critical precursor of nitrogenous disinfection byproducts. Recently, the control and elimination of pDOM have been a growing concern during drinking water treatment processes. In this study, a high-performance size exclusion chromatography system coupled with photo-diode array, fluorescence detector, and online organic carbon detector (HPSEC-PDA/FLD/OCD) was used to determine the removal behaviors of different-sized pDOM from two full-scale drinking water treatment plants (DWTPs). Coagulation and activated carbon adsorption were selected for bench-scale experiments to further assess the removal behavior of pDOM during conventional water treatment processes. The results showed that different-sized pDOM fractions exhibited different removal characteristics. Pre-oxidation can effectively remove some tyrosine-like and tryptophan-like components with high MW, and as the oxidization effect was enhanced, more high MW fractions decomposed into low MW ones. Conversely, some aliphatic pDOM fractions in high MW (e.g., aliphatic proteins) were not subject to pre-oxidation removal. The coagulation-sedimentation unit was efficient in removing high MW fractions, specifically tryptophan-like fractions. Additionally, some pDOM components may be released during coagulation. pDOM with low MW and high hydrophobicity were easily removed during activated carbon filtration. However, long-term operation of the activated carbon filter may breed microorganisms, resulting in the partial release of pDOM fractions. Moreover, UV disinfection processes promoted the degradation of low MW pDOM components. Due to the complex water quality and uncontrollable microbial activities, the aforementioned water treatment units did not exhibit a synergistic effect on pDOM removal. In comparison with humic-like substances, pDOM was susceptible to water quality changes, and its removal was limited in the surveyed DWTPs. Therefore, DWTPs must strengthen pDOM monitoring in influent and effluent and adjust the operating parameters of different treatment units in a timely manner. Moreover, the combination of advanced water treatment processes, such as ozone-biological activated carbon process and nanofiltration, should also be considered to strictly control pDOM component removal.

**Key words:** protein-like dissolved organic matter (pDOM); high performance size exclusion chromatography; drinking water treatment process; coagulation; activated carbon adsorption

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778055); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51920105012)

作者简介: 李梦雅(1994~),女,博士研究生,主要研究方向为水中天然有机质的表征及去除, E-mail: limengya\_lmy@163.com

\* 通信作者, E-mail: huanghaiou@bnu.edu.cn

溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM) 广泛存在于天然水体当中, 其组成复杂, 对饮用水处理工艺单元的运行效能和出水水质都具有重要影响<sup>[1-3]</sup>. 蛋白类溶解性有机物 (protein-like dissolved organic matter, pDOM) 是 DOM 的重要组成部分, 主要包括氨基酸、多肽、蛋白质和溶解性微生物副产物等. 有研究表明, pDOM 含有丰富的营养物质 (如碳和氮等营养元素), 能够促进供水管网中细菌等微生物的生长, 降低末梢水质<sup>[4-6]</sup>. 同时, 其还是含氮消毒副产物 (N-DBPs, 如卤代乙腈和二溴硝基苯酚等) 的重要前驱物. 相比于卤乙酸和三卤甲烷等常规消毒副产物 (DBPs), N-DBPs 具有更强的基因毒性和生物毒性<sup>[7-9]</sup>. 此外, DOM 各组分的分子量分布广泛, 而分子量和相应组分结构是判断其在饮用水厂不同处理单元去除效能和预测 DBPs 生成势的重要指标<sup>[10]</sup>. 因此, 不同分子量 pDOM 组分的控制和去除, 对于饮用水处理过程至关重要.

近年来, 随着人们对饮用水水质要求的不断提高, 饮用水处理技术得到了长足发展, 如强化混凝、吸附、化学氧化和膜过滤等<sup>[11-14]</sup>. 目前, 强化混凝、活性炭吸附和预氧化等工艺单元已逐步应用于城市饮用水厂<sup>[15,16]</sup>, 不同工艺单元对水源水中 DOM 各组分的去除效果和机制各不相同. 但现有研究大多关注腐殖质类或大分子生物聚合物等组分, 且水厂日常检测指标和监测手段没有包含对不同分子量组分 pDOM 的分析表征. 因此, 深入探究 pDOM 各组分在实际饮用水处理工艺中的去除特性和迁移转化规律, 对饮用水厂工艺的优化和革新具有重要意义. 为此, 本文以中国北方两个不同工艺饮用水厂为研究对象, 通过采集不同工段实际进水和模拟单元处理过程, 结合高效尺寸排阻色谱联合光电二极管阵列检测器、荧光检测器和有机碳检测器 (HPSEC-PDA/FLD/OCD) 的分析方法, 对不同分子量组分的 pDOM 在水厂处理工艺中的去除规律开展研究, 初步揭示各组分在实际饮用水处理过程中的迁移转化

规律和去除现状, 以期为实现实际水处理过程中 pDOM 的分析检测提供方法参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 水样采集

考虑到进厂原水和运行工艺流程的不同, 本研究主要选取我国北方两个饮用水处理厂. 两水厂进水水源均为南水北调水. 水样采集时间为 2019 年 6~8 月, 其中各工段进出水为当日采集. 水样采集后均过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜 (尼龙, 津腾), 置于棕色试剂瓶中于 4 $^{\circ}\text{C}$  保存, 用于模拟实验及分析测定. 两饮用水厂工艺流程图及采样点分布如图 1 和图 2 所示, 主要工段运行参数详见表 1, 各水样编号及基本水质参数详见表 2. 其中, 水样的总有机碳浓度, 通过总有机碳分析仪 (TOC-L, 岛津, 日本) 进行分析测定; 紫外-可见光谱指标  $\text{UV}_{254}$ , 通过哈希 DR6000 紫外-可见分光光度计进行分析测定.



图 1 饮用水处理厂 1 (水厂 1) 工艺流程及采样点示意

Fig. 1 Treatment train of DWTP 1 and sampling locations



图 2 饮用水处理厂 2 (水厂 2) 工艺流程及采样点示意

Fig. 2 Treatment train of DWTP 2 and sampling locations

表 1 主要工艺单元运行参数

Table 1 Operating parameters of major treatment units

水厂编号	工艺单元	投加药剂	投加量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1	预氯化氧化	次氯酸钠	2.0
	混凝	聚合氯化铝	0.2~40.0
2	预氯化氧化	次氯酸钠	3.0
		臭氧	0.3
	混凝	三氯化铁 聚合氯化铝	30.0 13.0

表 2 水厂 1 和水厂 2 各工段进出水水质

Table 2 Major characteristics of water samples from DWTP-1 and DWTP-2

水源	代号	水质指标					
		pH	$\text{UV}_{254}$ $/\text{cm}^{-1}$	$\text{SUVA}_{254}$ $/\text{L}\cdot(\text{mg}\cdot\text{m})^{-1}$	$\text{DOC}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	电导率 $/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	
水厂 1	进水	JCW	7.71	0.043	1.06	4.04	271
	预氧化出水	JC1	7.99	0.025	0.79	3.16	284
	混凝沉淀出水	JC2	7.63	0.024	1.02	2.36	287
	砂滤出水	JC3	7.54	0.022	0.85	2.60	282
	炭滤出水	JC4	7.53	0.017	0.67	2.54	295
水厂 2	进水	SNW	7.75	0.038	1.25	3.04	256
	预氧化出水	SN1	7.71	0.025	0.85	2.92	255
	混凝沉淀出水	SN2	7.73	0.016	0.64	2.51	283
	炭砂过滤出水	SN3	7.67	0.024	1.44	1.67	284
	紫外消毒出水	SN4	7.60	0.027	1.57	1.72	275

## 1.2 水样分析方法

### 1.2.1 三维荧光光谱分析

样品的三维荧光(EEM)光谱图由日立 F-4600 荧光分光光度计进行测定,本实验所用激发波长扫描范围为 200 ~ 500 nm,间隔 10 nm,发射波长扫描范围为 290 ~ 600 nm,间隔为 2 nm.

### 1.2.2 HPSEC-PDA/FLD/OCD 色谱分析

本研究选用高效尺寸排阻色谱(HPSEC, LC-20AT, 岛津, 日本)联合光电二极管阵列检测器(PDA, SPD-M20A, 岛津, 日本), 荧光检测器(FLD, RF-20A, 岛津, 日本)和有机碳检测器(OCD, Sievers 900 portable TOC analyzer, General Electric, 美国)的分析方法. 采用 TSK Gel 4000PW<sub>XL</sub> 和 TSK Gel 2500PW<sub>XL</sub> 双色谱柱串联模式, 流动相为 3.93 g·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O 和 1.46 g·L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 的混合溶液, pH 为 6.85<sup>[17]</sup>. 标准物质采用相对分子量范围为 200 ~ 10 000 的聚乙二醇. 所测色谱图中, 保留时间对应相对分子量小于 1 000 为小分子区, 1 000 ~ 10 000 为中分子区, 大于 10 000 为高分子区, 同时以乙二醇(相对分子质量为 62.07)的出峰时间(39.9 min)为边界时间, 保留时间超出此时间的组分即认为与色谱柱发生了明显的疏水性作用<sup>[18,19]</sup>, 划分为延滞区, 定义为疏水性组分.

由于在天然水体的 EEM 荧光光谱图中, 蛋白质类有机质的信号主要分为类色氨酸型(tryptophan-like, 发射波长大约在 325 ~ 381 nm)和类酪氨酸型(tyrosine-like, 发射波长大约在 290 ~ 321 nm)两种<sup>[20,21]</sup>, 故本研究根据所测水样在此波长范围的 EEM 信号峰值确定两蛋白类组分的 HPSEC-FLD 激发发射波长, 两者荧光信号分别表示为 F-Trp 和 F-Tyr. 同时, 测定腐殖质类荧光信号(用 F-HS 表示)作为对比分析. PDA 扫描范围为 200 ~ 600

nm.

### 1.3 采集原水中 pDOM 组分的去除实验

本研究以 JCW 原水为代表, 对所采集原水中 pDOM 组分在水厂常见处理单元混凝及活性炭吸附过程中的去除效能进行实验室小试探究.

#### 1.3.1 混凝

本实验所用混凝剂选取聚合氯化铝(PACl)和三氯化铁(FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)两种, 量取 400 mL 水样于 500 mL 烧杯中, 置于六联搅拌器上, 加入浓度梯度为 0 ~ 110 mg·L<sup>-1</sup> 的混凝剂, 300 r·min<sup>-1</sup> 快速搅拌 1 min, 70 r·min<sup>-1</sup> 慢速搅拌 15 min, 沉降 30 min. 取上清液经 0.45 μm 滤膜过滤, 待测.

#### 1.3.2 活性炭吸附

活性炭粉末(PAC)经超纯水洗涤浸泡后干燥至恒重, 为模拟实际水厂运行单元活性炭对 pDOM 的去除效果, 设定 PAC 投加量为 20 mg·L<sup>-1</sup>, 反应时间为 6 h, 出水经 0.45 μm 滤膜过滤, 待测.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水厂进水水质对比

为了便于讨论, 本研究将水样所测 HPSEC-PDA/FLD/OCD 色谱图中 DOC、F-Trp、F-Tyr、F-HS 和 UV<sub>254</sub> 对应的信号峰分别以  $P_{\text{DOC}}$ 、 $P_{\text{F-Trp}}$ 、 $P_{\text{F-Tyr}}$ 、 $P_{\text{F-HS}}$  和  $P_{\text{UV254}}$  来表示. 图 3 为两水厂进水的组分分布, 结合表 1 的基本水质指标可得, 水厂 2 的进水 SNW 具有更低的 DOC 浓度和更高的 SUVA<sub>254</sub> 值, 说明该水样中 DOM 含量相对较低, 且芳香性较强. 同时, 该进水 DOM 相对分子量分布范围较窄, 为 94 ~ 768 546, pDOM 小分子和疏水性组分相对含量较高, 尤其是类酪氨酸型 pDOM 的相对丰度达到 49.8% (图 4), 浓度最高为 0.84 mg·L<sup>-1</sup>. 与水厂 2 相比, 水厂 1 进水 JCW 中 DOM 含量相对较高, 相对

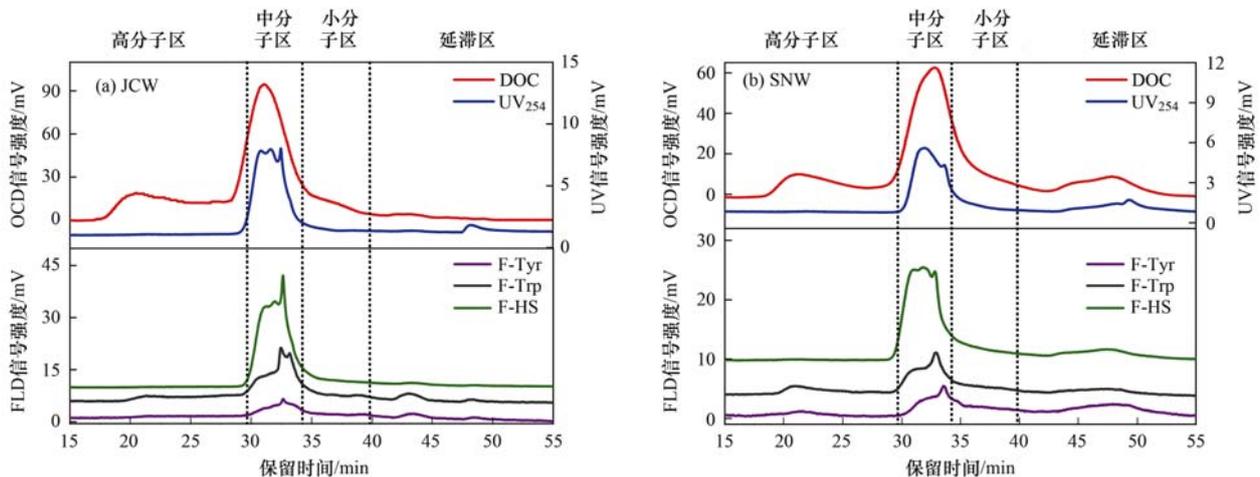


图 3 水厂 1 和水厂 2 进水中各有机组分的 HPSEC-PDA/FLD/OCD 色谱图

Fig. 3 HPSEC-PDA/FLD/OCD chromatograms of JCW and SNW

分子质量分布范围较宽, 对应为 90 ~ 780 277, 且中、高分子组分含量相对较高. 其中, 类色氨酸型 pDOM

的中、高分子组分相对丰度可达 79.7% (图 4), 浓度最高为  $3.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

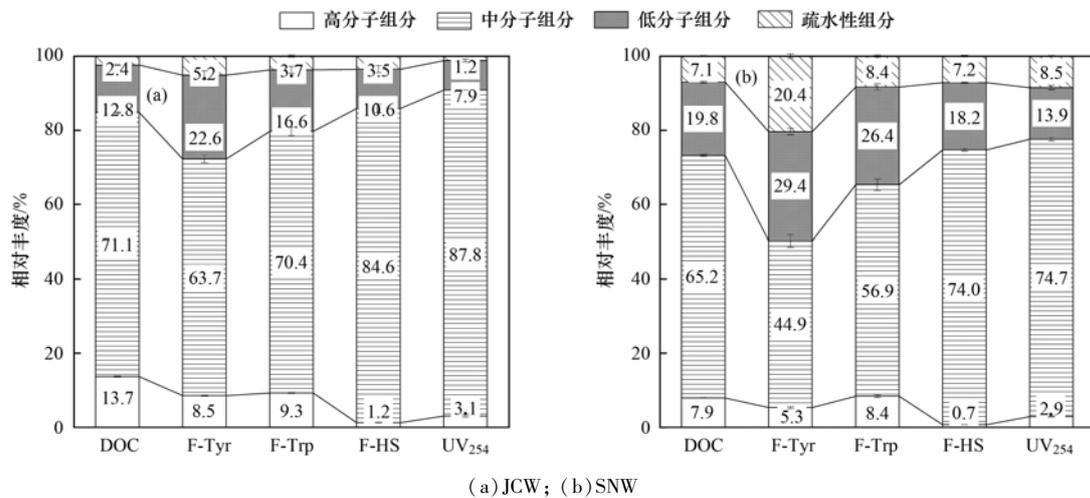


图 4 水厂 1 和水厂 2 进水中不同分子量 pDOM 组分的相对丰度  
Fig. 4 Relative abundance of different-sized pDOM in JCW and SNW

## 2.2 不同分子量组分 pDOM 在饮用水厂的去除特性

图 5 和图 6 分别反映了两饮用水厂各工段进出水 pDOM 组分的分子量分布和去除率变化情况. 不同工段 pDOM 各组分去除特性具体分析如下.

### 2.2.1 预氧化单元

两水厂采用不同的预氧化方式, 其中, 水厂 1 为单独加氯氧化, 而水厂 2 则采用加氯氧化和臭氧氧化相结合的方式. 因此, 经预氧化单元后, 两水厂出水的 pDOM 组分存在一定差异. 在水厂 1 出水中, 类色氨酸和类酪氨酸型 pDOM 的中、高分子组分含量明显降低, 对应去除率分别为 27.2% ~ 55.5% 和 26.9% ~ 62.3% [图 6(a)]; 出水 pDOM 各组分分子量增大, 对应  $P_{\text{DOC}}$ 、 $P_{\text{F-Trp}}$  和  $P_{\text{F-Tyr}}$  在中、高区域相对分子量分布由 2 230 ~ 788 197 升至 2 661 ~ 969 500 [图 5(a)]. 此外, 小分子区域信号峰没有明显变化, 但  $P_{\text{F-Trp}}$  的延展峰信号增强, 去除率为 -23.3% [图 6(a)], 表明预氯化氧化后类色氨酸型小分子 pDOM (如氨基酸或多肽等) 含量增多. 已有研究显示, 经预氯化氧化后, 饮用水厂中的高分子有机氮组分 (相对分子量 > 5 000) 含量显著下降, 而小分子有机氮组分 (相对分子量 < 3 000) 含量上升<sup>[15, 22]</sup>, 这与本研究的结果基本一致.

预氧化后水厂 2 进水中的中、高分子 pDOM 组分含量也出现明显下降, 其中, 类酪氨酸和类色氨酸型 pDOM 组分去除率分别为 38.9% ~ 42.9% 和 32.8% ~ 58.8% [图 6(e)]. pDOM 相对分子量分布向高分子方向趋近, 对应升高为 3 034 ~ 1 040 519 [图 5(b)]. 但不同于水厂 1, 水厂 2 进水中的小分子和疏水性组分含量也有所下降, 尤其是类酪氨酸型 pDOM, 两种组分去除率高达 46.0% 和 70.0%. 表

明水厂 2 中预氧化单元对类酪氨酸型 pDOM 有较好的去除效果, 而对类色氨酸型 pDOM 去除效果相对较差. 对比水厂 1, 由于水厂 2 在预氧化阶段添加了臭氧, 使得氧化剂氧化效率增强, 因此 pDOM 各组分氧化效率升高, 总去除率较高, 尤其是类酪氨酸类组分, 总去除率为 53.5% [图 7(b)]. 但对比 DOC 数据可知, 高分子组分的整体矿化度较低, 去除率甚至出现负值, 原因可能是由于氧化剂氧化性的增强, 引起较多藻类或微生物细胞被破坏, 造成一些分子量较高的多糖或具有直链结构的蛋白等物质的溶出, 不易被完全氧化分解<sup>[23]</sup>. 而水厂 1 仅加氯氧化, 由于氯的氧化效果有限, 大分子的类色氨酸及类酪氨酸型 pDOM 组分在一定程度上分解为小分子物质, 因此出水中小分子 pDOM 组分含量增多. 故总体而言, 水厂 2 预氧化去除 pDOM 效果相对较好.

### 2.2.2 混凝沉淀单元

作为预氧化的后续水处理单元, 两水厂均采用了混凝沉淀工艺, 水厂 1 仅投加铝盐一种混凝剂, 而水厂 2 同时投加铝盐和铁盐两种混凝剂. 从出水水质看, 混凝沉淀后两水厂 pDOM 高分子组分均得到良好去除, 对应的去除率分别为 38.1% ~ 53.6% 和 58.7% ~ 70.8% [图 6(b) 和 6(f)]. 同时, 中分子区域信号峰值均向低分子方向移动, 对应相对分子量分别下降为 1 286 ~ 4 047 (水厂 1) 和 1 339 ~ 2 088 (水厂 2) (图 5). 另外, 水厂 1 出水中的中、小分子组分也有一定程度去除, pDOM 各组分总去除率相对较高, 为 40.3% ~ 58.8% [图 7(a)], 出水 pDOM 浓度不超过  $1.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 而水厂 2 的出水中, 类色氨酸和类酪氨酸型 pDOM 的中、小分子及疏水性组分信号均增强, 且 DOC 在小分子及延滞区的信号也

出现一定程度的增加(图 5),去除率为负值(图 6),出水 pDOM 浓度最高为  $1.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 值得注意的是,水厂 1 出水中的中、类色氨酸型 pDOM 的疏水性组分去除率也为负值,这表明在混凝沉淀过程中,部分有机质含量增高,尤其是类色氨酸型组分. 考虑到水厂实际运行过程中水质条件变化的复杂性,一方面可能是由于实际水体中的藻类或微生物细胞结构在混凝过程中被破坏,造成有机质的释放,使得相关组分的信号增强. 另一方面可能是混凝剂的投加造成了一定量杂质的引入(如具有芳香结构或共轭结构的有机物),使得其在较低荧光激发发射波段产生信号,引起小分子区及疏水性组分区域信号增强<sup>[24]</sup>. 由于水厂 2 进水 SNW 高分子组分相对丰度较低[图 4(b)]且同时投加铝盐和铁盐两种混凝剂,杂质引入度增加,因此相比于水厂 1,其 pDOM 在混凝沉淀工段整体去除效果有限.

### 2.2.3 砂滤-炭滤单元

对于砂滤和炭滤单元,两水厂采取了不同的运行方式. 水厂 1 采用单独的砂滤池和炭滤池,而水厂 2 采用一体式的炭砂滤池. 从出水水质看,水厂 1 砂滤出水中 pDOM 分子量分布没有明显变化,但各检测器信号响应明显增强,尤其是类色氨酸和类酪氨酸型 pDOM 的小分子和疏水性组分上升显著,去除率分别为  $-94.1\%$ 、 $-27.0\%$  和  $-42.9\%$ 、 $-68.6\%$  [图 6(c)]. 经后续炭滤池后,水中 pDOM 中分子组分相对分子量增大,范围升至  $2\,595 \sim 3\,946$ ,对应区域信号强度也有所增加 [图 5(a)],而去除率相比上一单元下降了  $1.5\% \sim 15.1\%$ . 但炭滤出水中 pDOM 的小分子和疏水性组分信号明显降低,去除率为  $8.4\% \sim 26.7\%$  [图 6(d)],出水 pDOM 浓度不

超过  $2.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 在水厂 2 中,炭砂滤池出水的中分子 pDOM 组分相对分子量降低,且分布范围变窄,对应为  $1\,260 \sim 3\,340$ . 同时,其他区域没有明显信号峰出现,中、小分子及延滞区信号强度明显降低 [图 5(b)]. 尤其是类色氨酸型 pDOM 的小分子及疏水性组分,其去除率分别为  $69.4\%$  和  $69.8\%$ . 而类酪氨酸型 pDOM 的中、高分子组分则出现浓度升高现象,去除率分别为  $-39.7\%$  和  $-14.8\%$  [图 6(g)],pDOM 出水浓度最高为  $1.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

以上结果表明,在两个水厂中,活性炭过滤对 pDOM 的小分子及疏水性组分,尤其是类色氨酸型组分有较好的去除效果. 与此同时,两水厂无论是单一炭滤池、砂滤池还是一体式的炭砂滤池,出水均存在部分 pDOM 组分浓度上升,有些组分浓度甚至超过进水浓度的情况. 出现这种情况的原因可能是由于在长期运行条件下,砂滤层或炭滤层存在微生物生长<sup>[25]</sup>,释放出 pDOM 组分,造成出水中部分 pDOM 含量升高.

### 2.2.4 紫外消毒单元

不同于水厂 1,在最终加氯消毒之前,水厂 2 还设有紫外消毒单元,由图 5(b) 可见,水中有机物经紫外消毒后分子量分布与炭砂过滤出水分布范围基本一致,没有发生显著变化. 如图 6(h),紫外消毒对小分子组分的去除率有所提升,对应类酪氨酸和类色氨酸型 pDOM 的去除率分别为  $23.9\%$  和  $7.1\%$ . 这一结果表明,紫外消毒能去除少量小分子 pDOM 组分,特别是类酪氨酸、类色氨酸型氨基酸、多肽和微生物副产物等.

综上所述,两水厂各处理单元对进水 pDOM 组分均有一定去除效果. 但从整体工艺流程来看,分子

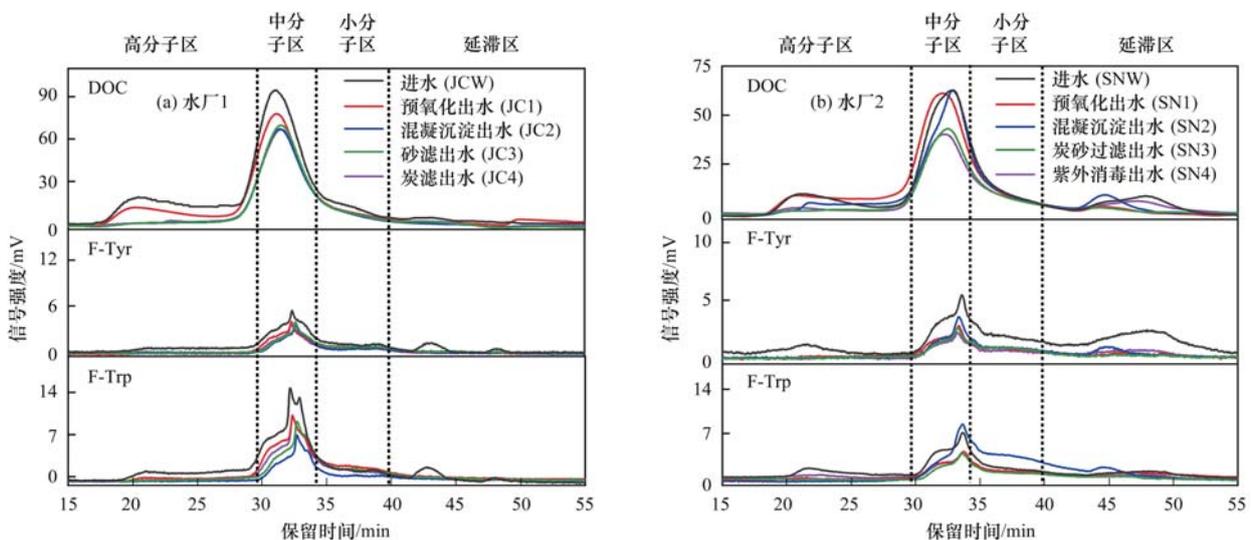


图 5 水厂 1 和水厂 2 不同工段进出水 HPSEC-PDA/FLD/OCD 色谱图

Fig. 5 HPSEC-PDA/FLD/OCD chromatograms of studied waters in DWTP-1 and DWTP-2

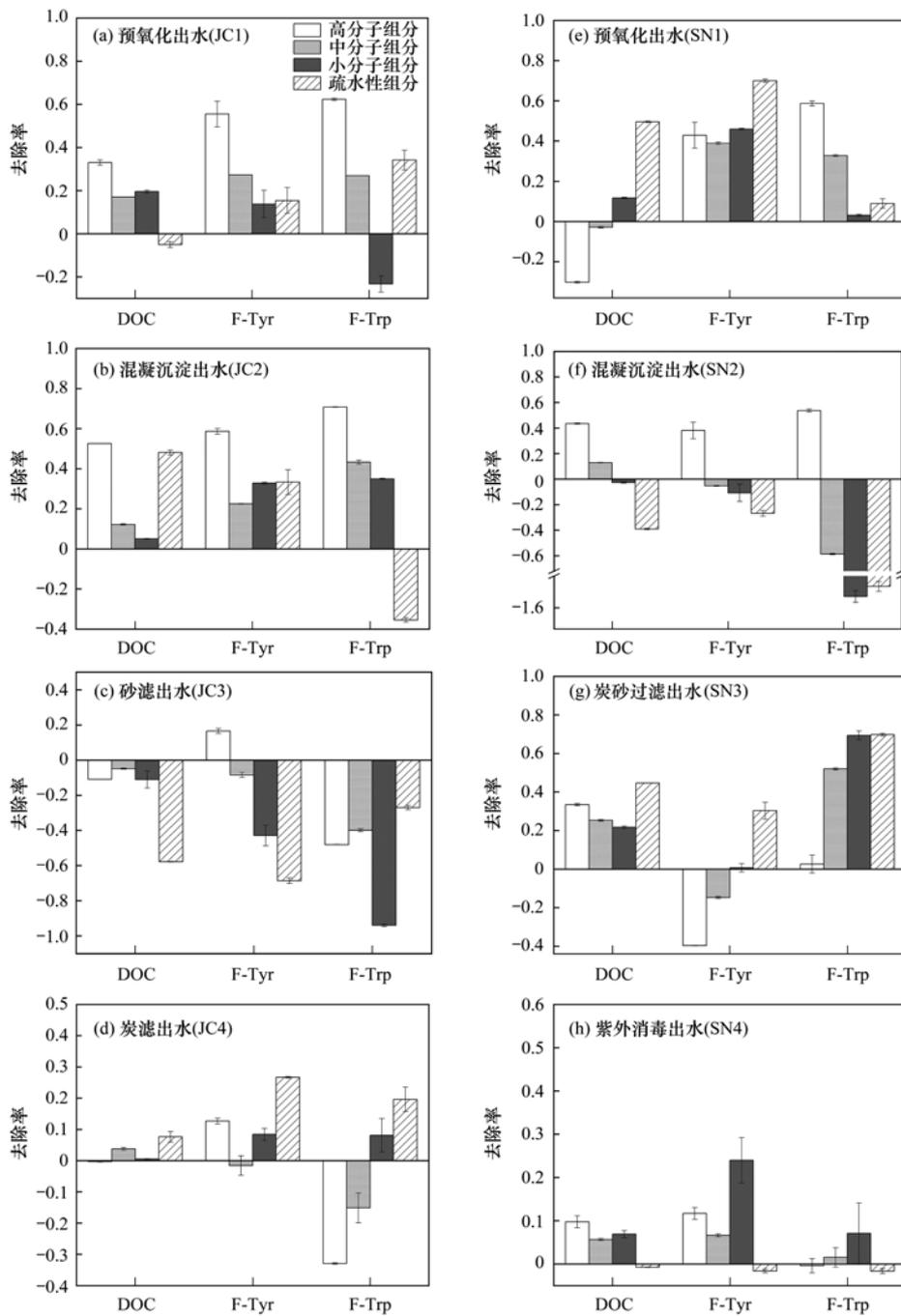


图6 水厂1和水厂2不同工段的pDOM各组分去除率

Fig. 6 Removal rate of different-sized pDOM in studied water samples from DWTP-1 and DWTP-2

量相对较低的pDOM组分去除效果有限,甚至部分单元还出现pDOM组分析出的现象。pDOM各组分在实际水厂运行工段受环境影响较为明显,尤其是类色氨酸型组分,因此,各单元处理工艺在整体上并没有显现协同作用,pDOM总体去除效果相对较差;而腐殖质类组分在各工段去除差异相对较小,总体去除率相对较高(图7)。因此,未来水厂应加强对进出水中pDOM组分的去除和监测。

### 2.3 小试条件下pDOM各组分在混凝和活性炭吸附中的去除规律

通过对实际饮用水厂不同处理单元pDOM各

组分去除特性的探究,表明不同处理单元对pDOM有一定去除效果,但不同分子量组分在各工艺单元去除存在一定差异。考虑到实际水厂运行过程中水质变化等因素的影响,为了进一步验证pDOM不同分子量组分在常规处理单元的去除特性,本研究选取混凝和活性炭吸附两种常规水处理技术,在实验室控制条件下,对JCW地表水进行小试实验。

#### 2.3.1 pDOM各组分在混凝过程中的去除规律

根据烧杯实验结果确定PACl和FeCl<sub>3</sub>的最佳投加量分别为35 mg·L<sup>-1</sup>和82 mg·L<sup>-1</sup>。图8和图9分别为JCW混凝前后的HPSEC-PDA/FLD/OCD色

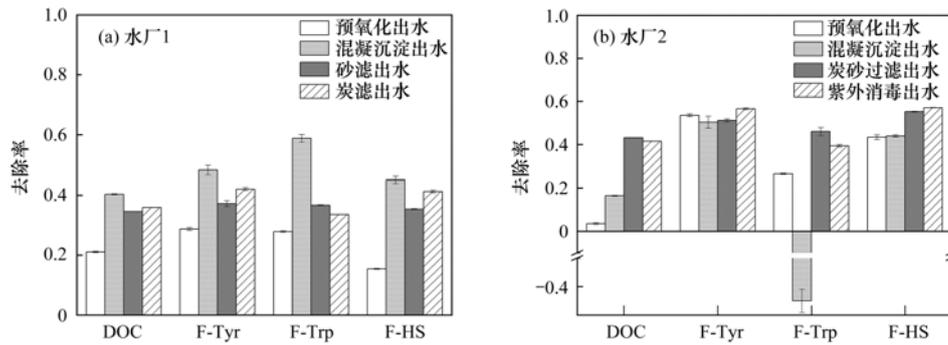


图7 水厂1和水厂2各工段水DOM各组分总去除率

Fig. 7 Total removal rate of DOM in studied water samples from DWTP-1 and DWTP-2

谱图及各组分的去除率. 将色谱图中 DOC、F-Trp 和 F-Tyr 对应的信号峰分别以  $P_{DOC}$ 、 $P_{F-Trp}$  和  $P_{F-Tyr}$  表示. 总体来看, 两种混凝剂对 pDOM 的分子量较高组分展现了良好的去除效果, 处理后  $P_{DOC}$ 、 $P_{F-Trp}$  和  $P_{F-Tyr}$  均向小分子方向趋近(图8), 对应相对分子量分布范围为 74 ~ 1 105 518 (PAC) 和 70 ~ 894 252 ( $FeCl_3$ ). 尤其是类色氨酸型中、高分子组分去除效率较高, 分别为 57.7% 和 81.3%. 但小分子组分和疏水性组分的去除效率较低, 且与实际水厂混凝单元出水相类似, 两组分区域信号增强, 出现不同于原水的信号峰, 去除率甚至出现负值(图9). 经 PAC 和  $FeCl_3$  混凝后 pDOM 浓度分别最高为  $2.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 表明混凝后有小分子及疏水性有机质释放到水中. 考虑到实际地表水样成分复杂, 可能是部分藻类或微生物细胞等在混凝过程中遭到破坏, 从而释放一定量 pDOM.

2.3.2 pDOM 各组分在活性炭吸附中的去除规律

如图10所示, JCW 经 PAC 处理后, 中分子区和高分子区的信号峰向大分子方向趋近, 对应相对分子量分布范围为 2 556 ~ 1 916 916, 小分子区和延滞区信号明显降低, 去除率较高, 尤其是类色氨酸型小分子组分, 去除率为 55.3%, 处理后 pDOM 浓度不

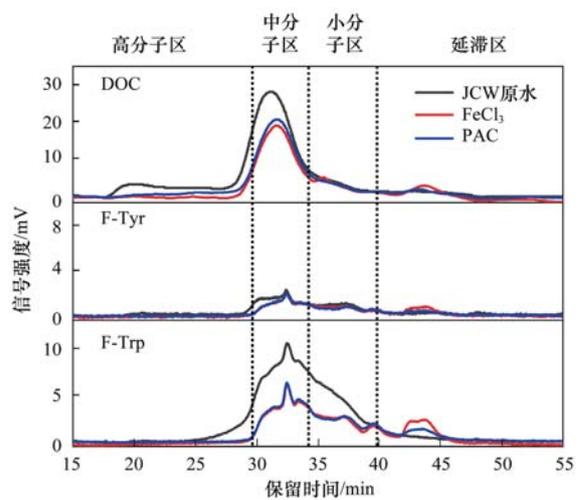


图8 JCW 混凝前后 HPSEC-PDA/FLD/OCD 色谱图

Fig. 8 HPSEC-PDA/FLD/OCD chromatograms of JCW before and after coagulation

超过  $2.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 而分子量相对较高的组分去除效果较差. 因实验所选用粉末活性炭平均粒径 1.9 nm, 主要为微孔结构 (<2 nm), 中孔和大孔占比极小, 所以其对小分子 pDOM 组分展现较好吸附性能, 而分子量较高的 pDOM 组分则较难被吸附, 去除效果有限. 且有研究表明, PAC 为憎水性的吸附剂, 因此能实现对水样中疏水性组分较好地去除

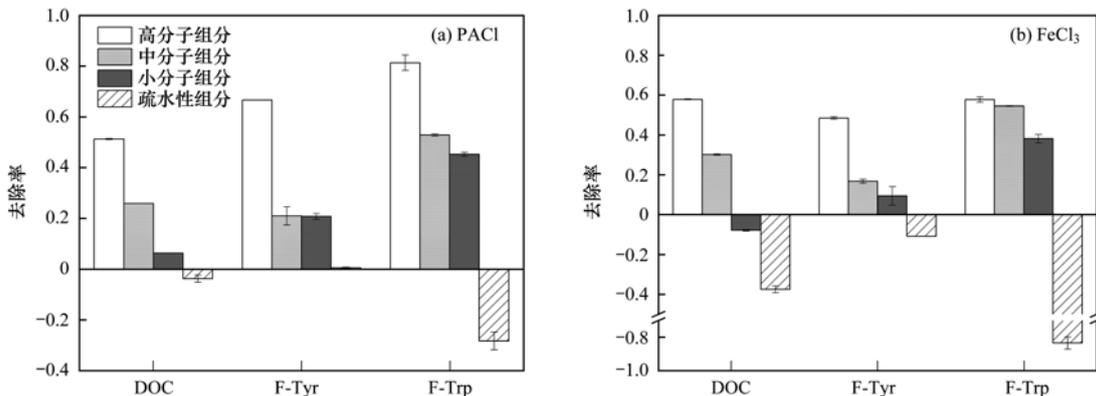


图9 JCW 混凝后 pDOM 各组分去除率

Fig. 9 Removal rate of different-sized pDOM in JCW after coagulation

除<sup>[26]</sup>. 但不同于水厂结果, 在实验室条件下, 经 PAC 处理后的出水并没有出现 pDOM 组分增多现象, pDOM 各组分均有一定程度去除. 这主要是由于水厂中滤池长期运行, 存在微生物滋生并释放 pDOM 组分的现象. 曾洁等<sup>[27]</sup>通过中试实验模拟炭砂滤池运行, 发现出水中总细菌数上升, 主要是因为活性炭是适合微生物挂膜生长的载体, 随着运行时间增长, 活性炭层上的生物膜会老化脱落进入水中, 增大出水总细菌数. 葛英亮<sup>[28]</sup>通过对炭滤单元微生物群落结构进行分析, 发现炭滤出水中微生物群落结构复杂, 种类丰富, 会增加水处理过程中的微生物泄漏风险. 以上研究结果与本研究的相一致.

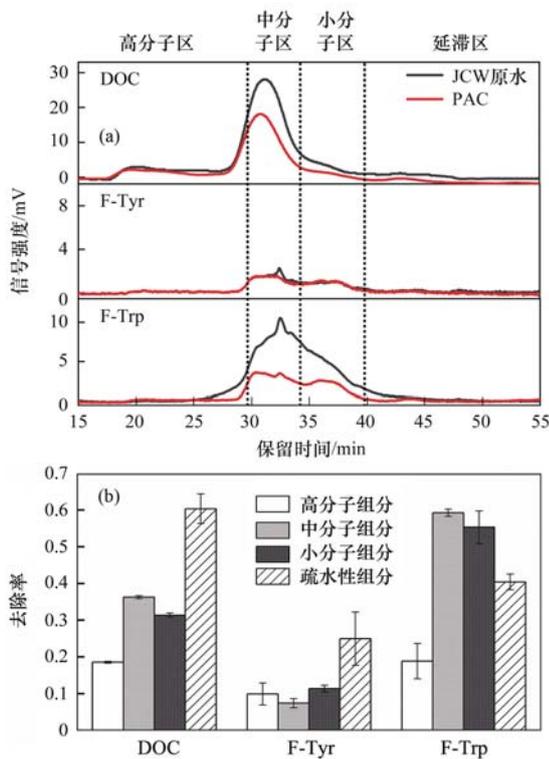


图 10 JCW 活性炭吸附前后 HPSEC-PDA/FLD/OCD 色谱图和各组分去除率

Fig. 10 HPSEC-PDA/FLD/OCD chromatograms and removal rate of JCW before and after PAC adsorption

综上所述, 混凝更易去除地表水中分子量较高的 pDOM 组分, 尤其是类色氨酸和类酪氨酸型蛋白及微生物副产物等. 同时, 混凝过程中存在部分 pDOM 组分的释放, 考虑到地表水组分的复杂性, 可能是由于混凝过程中藻类或微生物等发生细胞破坏, 细胞壁及胞内蛋白类物质释放进入混凝出水. 活性炭吸附对 pDOM 各组分都有一定去除效果, 特别是类色氨酸型小分子及疏水性组分, 但不同于实验室实验, 在水厂长期运行情况下, 由于微生物滋生, 炭滤池存在部分 pDOM 组分释出现象.

### 3 展望

由于实际水厂运行过程中水质变化复杂, 常规水处理工艺对 pDOM 去除效果不稳定, 因此有必要采用深度处理工艺, 强化 pDOM 去除. 已有研究表明臭氧-生物活性炭工艺能有效去除分子量较低、非极性的亲水性含氮消毒副产物前驱物, 从而降低饮用水厂中二氯乙腈、三氯硝基甲烷等典型含氮消毒副产物的生成势<sup>[29]</sup>. 同时, 纳滤、超低压反渗透等膜过滤技术也可以实现小分子有机物的高效去除<sup>[30]</sup>, 其中纳滤对 pDOM 各组分的去除率均在 75% 以上<sup>[31]</sup>. 因此, 未来水厂可以考虑结合臭氧-生物活性炭工艺, 或增加纳滤等膜过滤单元, 但具体工艺参数及相应 pDOM 组分去除效果及规律, 还有待后续进一步研究.

### 4 结论

(1) 实际饮用水厂中不同处理单元对 pDOM 组分的去除特性不同: 预氧化单元能够实现一定量高分子 pDOM 组分的氧化分解, 并且随着氧化剂氧化性的增强, 小分子 pDOM 组分氧化效率提升, 但对于分子量较大的多糖、脂肪族类蛋白组分, 预氧化处理效果较差, 矿化度较低; 混凝沉淀更易去除分子量较高的 pDOM 组分, 尤其是类色氨酸型高分子组分; 活性炭过滤对分子量较低、疏水性较强的组分去除效果较好; 紫外消毒在一定程度上提高了小分子 pDOM 的去除.

(2) 由于实际水厂运行过程水质变化的复杂性和微生物的不可控性, 水厂各运行单元对 pDOM 的去除没有展现出协同作用. 从整体工艺流程看, 相比于腐殖质类物质, pDOM 各组分在处理过程中受水质条件变化和微生物影响较为明显, 去除效率有限, 尤其是类色氨酸型组分.

(3) 对比小试结果可得, 混凝过程可能会造成部分藻类或微生物等细胞的破坏产生一定量 pDOM, 多为小分子或疏水性组分; 而活性炭吸附对 pDOM 各组分都有一定去除效果, 尤其是分子量较低, 疏水性较强组分, 水厂炭砂过滤出水 pDOM 组分升高, 可能是由于滤池长期运行存在微生物滋生, 造成 pDOM 组分释放.

(4) HPSEC-PDA/FLD/OCD 系统能够快速、准确地实现对实际水体中 pDOM 各组分的分离和表征, 为水厂日常消毒副产物前驱物的监测和检测提供参考.

#### 参考文献:

[1] Hu H Y, Du Y, Wu Q Y, et al. Differences in dissolved organic

- matter between reclaimed water source and drinking water source [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 133-142.
- [ 2 ] Leenheer J A. Systematic approaches to comprehensive analyses of natural organic matter[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, **3**: 1-130.
- [ 3 ] 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 等. 基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4576-4583.  
Zhang B C, Zhang X L, Qin L L, *et al.* Control of coagulant dosing for humic substances based on ultraviolet spectrum analysis [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4576-4583.
- [ 4 ] Weinrich L A, Jjemba P K, Giraldo E, *et al.* Implications of organic carbon in the deterioration of water quality in reclaimed water distribution systems[J]. *Water Research*, 2010, **44**(18): 5367-5375.
- [ 5 ] 魏莱, 邹立, 杨阳, 等. 芦苇和海洋微藻有色溶解有机物的吸收和荧光光谱特征分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, **47**(6): 25-33.  
Wei L, Zou L, Yang Y, *et al.* Absorption and fluorescence spectra characterization of chromophoric dissolved organic matter from reeds and marine microalgae [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(6): 25-33.
- [ 6 ] 王晓丹, 赵新华. 配水管网细菌活性影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 622-628.  
Wang X D, Zhao X H. Influencing factors of bacterial activity in water distribution networks[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 622-628.
- [ 7 ] Yu Y, Reckhow D A. Formation and occurrence of *N-Chloro-2, 2-dichloroacetamide*, a previously overlooked nitrogenous disinfection byproduct in chlorinated drinking waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(3): 1488-1497.
- [ 8 ] 丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 等. 饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1662-1667.  
Ding C S, Meng Z, Xu Y Y, *et al.* Formation mechanism of the disinfection by-product 1, 1-dichloroacetone in drinking water [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1662-1667.
- [ 9 ] 张秋秋, 潘申龄, 张昱, 等. 我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2747-2753.  
Zhang Q Q, Pan S L, Zhang Y, *et al.* Estimation of health risk and enaction of safety standards of N-nitrosodimethylamine (NDMA) in drinking waters in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2747-2753.
- [ 10 ] Wünsch U J, Acar E, Koch B P, *et al.* The molecular fingerprint of fluorescent natural organic matter offers insight into biogeochemical sources and diagenetic state [J]. *Analytical Chemistry*, 2018, **90**(24): 14188-14197.
- [ 11 ] Cai M H, Wu Y P, Ji W X, *et al.* Characterizing property and treatability of dissolved effluent organic matter using size exclusion chromatography with an array of absorbance, fluorescence, organic nitrogen and organic carbon detectors[J]. *Chemosphere*, 2020, **243**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125321.
- [ 12 ] Partlan E, Ren Y R, Apul O G, *et al.* Adsorption kinetics of synthetic organic contaminants onto superfine powdered activated carbon [J]. *Chemosphere*, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126628.
- [ 13 ] Tabla-Hernandez J, Hernandez-Ramirez A G, Martinez-Tavera E, *et al.* Impacts on water quality by in situ induced ozone-oxygen oxidation in a polluted urban reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **735**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139364.
- [ 14 ] 董秉直, 高昊喏, 胡孟柳. 臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2732-2739.  
Dong B Z, Gao H Y, Hu M L. Effects and mechanism of the combination of ozone-PAC as a pretreatment for the reduction of membrane fouling[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2732-2739.
- [ 15 ] Li Y, Xu H, He C, *et al.* Transformation and fate of dissolved organic nitrogen in drinking water supply system; a full scale case study from Yixing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **673**: 435-444.
- [ 16 ] Yang F, Shi B Y, Gu J N, *et al.* Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a drinking water distribution system[J]. *Water Research*, 2012, **46**(16): 5423-5433.
- [ 17 ] Huber S A, Balz A, Abert M, *et al.* Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography-organic carbon detection-organic nitrogen detection (LC-OCD-OND)[J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 879-885.
- [ 18 ] Sakihama N, Ohmori H, Sugimoto N, *et al.* Toyoppearl HW-65C: ammonium sulfate as a new column chromatographic adsorbent for enzyme purification [J]. *The Journal of Biochemistry*, 1983, **93**(1): 129-134.
- [ 19 ] 饶平凡, 刘树滔, 张蓉真, 等. 色氨酸在 TOYOPEARL HW-40S 凝胶填料上非理想排阻行为的研究[J]. *色谱*, 1997, **15**(3): 193-196.  
Rao P F, Liu S T, Zhang R Z, *et al.* Deviation of size-exclusion chromatographic behavior of tryptophan on TOYOPEARL HW-40S column[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 1997, **15**(3): 193-196.
- [ 20 ] Henderson R K, Baker A, Murphy K R, *et al.* Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems; a review [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 863-881.
- [ 21 ] Yamashita Y, Tanoue E. Chemical characterization of protein-like fluorophores in DOM in relation to aromatic amino acids[J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3-4): 255-271.
- [ 22 ] 赵宗宇. 氯及高锰酸钾预氧化处理含蓝藻水过程可同化有机碳的变化规律[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [ 23 ] Huang G C, Ng T W, Chen H, *et al.* Formation of assimilable organic carbon (AOC) during drinking water disinfection; a microbiological prospect of disinfection byproducts [J]. *Environment International*, 2020, **135**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105389.
- [ 24 ] Zhu G, Liu J, Ma J, *et al.* Interference of the polyacrylamide coagulant in the fluorescence analysis of dissolved organic matter during water treatment [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, **18**: 1433-1440.
- [ 25 ] 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 等. 饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3604-3611.  
Hu W C, Zhao C, Wang Q J, *et al.* Metabolic functional analysis of dominant microbial communities in the rapid sand filters for drinking water[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3604-3611.
- [ 26 ] 张靖怡. 活性炭对天然水体中低浓度有机污染物的吸附特性以及目标有机物与 NOM 的竞争吸附研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [ 27 ] 曾洁, 陈正福, 吴尚书, 等. 炭砂滤池对农村饮用水中浊度

- 及细菌的去除效果[J]. 环境工程学报, 2020, **14**(10): 2736-2741.
- Zeng J, Chen Z F, Wu S S, *et al.* Removal effect of turbidity and bacteria in rural drinking water by GAC-sand filter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(10): 2736-2741.
- [28] 葛英亮. 净水工艺单元微生物群落结构及其生物风险研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [29] Zhang S S, Lin T, Chen H, *et al.* Precursors of typical nitrogenous disinfection byproducts: characteristics, removal, and toxicity formation potential [J]. Science of the Total Environment, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140566.
- [30] 张正磊, 张俸志, 周伟伟, 等. 纳滤工艺深度净化微污染源水厂出水中试研究[J]. 中国给水排水, 2019, **35**(15): 37-42.
- Zhang Z L, Zhang F Z, Zhou W W, *et al.* Advanced purification of effluent from micro-polluted source water waterworks by nanofiltration[J]. China Water & Wastewater, 2019, **35**(15): 37-42.
- [31] 李梦雅. 水中类蛋白类天然有机质表征及去除特性研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2020.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn))进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:  
**期刊:** 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.  
**图书:** 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.  
**会议文集:** 作者. 论文名[A]. 见(In); 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.  
**学位论文:** 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.  
**报告:** 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.  
**专利:** 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: [hjxx@cees.ac.cn](mailto:hjxx@cees.ac.cn); 网址: [www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn)

## CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission .....	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i>	(3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM <sub>2.5</sub> Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period .....	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i>	(3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM <sub>2.5</sub> in the Yangtze River Delta Based on Grids .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong	(3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration .....	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i>	(3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China .....	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i>	(3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China .....	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i>	(3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides .....	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i>	(3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang	(3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake .....	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i>	(3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer .....	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City .....	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i>	(3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland .....	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou .....	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i>	(3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan .....	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i>	(3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface .....	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i>	(3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N in Agricultural Region of Qingdao .....	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i>	(3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i>	(3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season .....	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i>	(3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments .....	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i>	(3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland .....	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i>	(3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay .....	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i>	(3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment .....	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i>	(3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China .....	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i>	(3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed .....	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong	(3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles .....	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i>	(3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents .....	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i>	(3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants .....	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i>	(3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant .....	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia	(3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge .....	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i>	(3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants .....	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i>	(3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR .....	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i>	(3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source .....	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i>	(3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System .....	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i>	(3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration .....	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors .....	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i>	(3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure .....	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i>	(3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent .....	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i>	(3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 .....	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i>	(3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i>	(3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions .....	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i>	(3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil .....	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i>	(3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i>	(3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil .....	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province .....	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong	(3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen .....	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i>	(3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil .....	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i>	(3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials .....	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i>	(3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau .....	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i>	(3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain .....	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i>	(3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost .....	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i>	(3565)