

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈革, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建国, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建国, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志成, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

夏季闽江 CDOM 的空间分布与降解特征

程琼¹, 庄婉娥², 王辉¹, 陈苇¹, 杨丽阳^{1*}

(1. 福州大学环境与资源学院, 福州 350116; 2. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002)

摘要: 利用三维荧光光谱-平行因子分析技术(EEMs-PARAFAC)以及微生物和光降解实验等方法, 分析夏季闽江下游-河口区有色溶解有机质(CDOM)的组成、分布及其降解特征。结果表明, 闽江下游-河口区 CDOM 存在三类荧光组分: 类腐殖质、类酪氨酸和类色氨酸; 类腐殖质是河段 CDOM 的主要荧光组分, 在河口区随着盐度增加主要的荧光组分逐渐变为类蛋白质。CDOM 的丰度变化呈现出明显的空间分布格局: 河段 CDOM 的吸收系数 $a(280)$ 较低, 进入市区后有所增加, 到了郊区呈现下降的趋势, 而在河口区迅速下降; 保守估计福州市区对闽江 CDOM 的贡献为 8%。河段 $a(280)$ 易被微生物降解和光降解, 降解率分别为 $(28 \pm 8)\%$ 和 $(44 \pm 7)\%$, 其生物可利用性和光化学活性远高于受海源 CDOM 影响的河口区; 类腐殖质、类酪氨酸和类色氨酸荧光组分在河段具有较高的光化学活性, 降解率分别为 $(75 \pm 0.5)\%$ 、 $(58 \pm 21)\%$ 和 $(73 \pm 3)\%$, 但不易被微生物降解, 而且在 28 d 微生物培养后出现类腐殖质的累积。

关键词: 闽江; 有色溶解有机质(CDOM); 三维荧光光谱-平行因子分析; 微生物降解; 光降解

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0157-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806012

Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer

CHENG Qiong¹, ZHUANG Wan-e², WANG Hui¹, CHEN Wei¹, YANG Li-yang^{1*}

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The composition, distribution, and degradation of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the lower reach and estuary of the Minjiang River were analyzed using fluorescence excitation-emission matrices-parallel factor analysis (EEMs-PARAFAC) and microbial and photochemical degradation experiments. The results show that there are three types of fluorescence components in the study area: humic-like, tyrosine-like, and tryptophan-like. The humic-like components are the main components in the river zone, while the protein-like components become dominant with increasing salinity in the estuary. The change of the CDOM abundance shows a notable spatial distribution pattern. The absorption coefficient $a(280)$ of CDOM is lower in the river, increases after entering the urban area, shows a decreasing trend in the suburbs, and rapidly declines in the estuary. A conservative estimate of the contribution of the Fuzhou urban area to the CDOM of the Minjiang River is 8%. The $a(280)$ in the river is susceptible to microbial and photochemical degradation and the degradation percentages are $(28 \pm 8)\%$ and $(44 \pm 7)\%$, respectively. The bioavailability and photochemical reactivity of $a(280)$ are much higher in the river than in the estuary. The humic-like, tyrosine-like, and tryptophan-like components show a higher photochemical reactivity in the river, with degradation percentages of $(75 \pm 0.5)\%$, $(58 \pm 21)\%$, and $(73 \pm 3)\%$, respectively. The fluorescent components are not labile with respect to microbial degradation and humic-like components are accumulated after 28 days of microbial culture.

Key words: Minjiang River; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); EEMs-PARAFAC; microbial degradation; photodegradation

天然水体的溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是生物圈中最大的有机碳库,在全球碳循环中扮演着重要的角色,并对水生系统营养盐循环和污染物转化以及生态系统功能产生重要影响^[1-4]。有色溶解有机质(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)是 DOM 中能够吸收紫外光和可见光的一类重要物质,含有腐殖酸、富里酸、氨基酸和芳烃化合物等^[5]。国内外的研究表明淡水生态系统 DOM 的芳香性高于海洋生态系统,且浮游植物、土地利用类型、微生物和营养盐等影响 DOM 的时空分布^[6-9]。CDOM 在河流中的光降解和微生物降解是去除河流 CDOM 的重要过程,影响着河流水体的环

境质量。有研究表明将近 50% 的 CDOM 可经光化学降解而被消耗^[10, 11],而微生物可以把活泼 DOM 组分转化为惰性组分并长期储存起来,并且营养盐浓度、DOM 自身浓度/活性、微生物群落种类等会影响 DOM 的生物可利用性^[1-4]。三维荧光光谱(EEMs)结合平行因子(PARAFAC)作为 DOM 表征的先进技术,运用该技术分析 CDOM 的荧光特征,定性、定量地指示 CDOM 的

收稿日期: 2018-06-02; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41606094); 福州大学引进人才基金项目(510183)

作者简介: 程琼(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境化学, E-mail: 1767456288@qq.com

* 通信作者, E-mail: yangly@fzu.edu.cn

组成、分布和降解特征,对研究 DOM 的生物地球化学循环具有重要的意义^[12~14].

闽江是福建省最大河流,多年平均径流量为 $6.1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[15],位列全国第八,是东南沿海陆源物质入海的重要通道,对邻近的台湾海峡的生物地球化学与生态系统有着重要影响.同时,闽江流域面积为 $60\,992 \text{ km}^2$ ^[15],下游流经省会城市福州,是流域工农业生产和人民生活用水的主要水源,研究其水环境问题对保障水安全具有重要价值.因此,本文对闽江下游-河口区夏季 CDOM 样品进行分析,探讨 CDOM 的组成、分布及其降解特征,以期对闽

江河流-近海系统生物地球化学和生态环境研究提供科学数据.

1 材料与方法

1.1 样品的采样与预处理

2017 年 7 月 8 日和 10 日,在闽江下游-河口区的 17 个站位采集表层水样(图 1, M01 ~ M17). 采集的水样与大量冰块一起低温保存于保温箱中,带回实验室立即用灼烧过的 $0.7 \mu\text{m}$ 孔径 GF/F 膜过滤水样,滤液置于棕色玻璃瓶中冷藏保存,次日测定荧光和吸收光谱.



图 1 闽江下游-河口区采样站位示意

Fig. 1 Sampling locations in the lower Minjiang River Estuary

1.2 降解实验

1.2.1 微生物降解实验

将 16 个站位(除 M03 站位)过滤后的水样分装在 60 mL 棕色玻璃瓶中,室温避光培养,保持瓶内系统与空气相通,在 28 d 后测定样品的光谱特征;特别地,对 M01、M06、M10 和 M17 站位,分别在 0、3、7、14、28 d 测定样品的光谱特征,每组设 3 个平行样.

1.2.2 光降解实验

M01、M06、M10 和 M17 站位冷冻保存的滤液解冻后用孔径为 $0.2 \mu\text{m}$ 的聚碳酸酯滤膜过滤,滤液分装在 100 mL 的石英管中用封口膜密封,其中一部分用锡纸包裹作为避光对照组.石英管置于水中,白天经太阳光照射,夜晚冷藏保存,并分别于 0、1、3 d 测定样品的光谱特征,每组设 3 个平行样.

1.3 样品的测定

1.3.1 紫外-可见吸收光谱分析

采用紫外-可见分光光度计(天美 UV2600, 中国)测定样品的吸收特征.以 Milli-Q 水为空白,用 10 cm 光程的石英比色皿,在 240 ~ 800 nm 范围内扫描吸收光谱,测量精度为 ± 0.001 .以 280 nm 处的吸收系数 $a(280)$ 表示 CDOM 的相对丰度,以

275 ~ 295 nm 处的光谱斜率 $S_{275 \sim 295}$ 表征 CDOM 的化学组成特征.

1.3.2 三维荧光光谱-平行因子分析

利用荧光分光光度计(Agilent Cary Eclipse, 美国)扫描过滤后样品的 EEMs,激发波长(E_x)为 240 ~ 450 nm,步长 5 nm;发射波长(E_m)为 280 ~ 600 nm,步长 1 nm.测得的样品 EEMs 扣除当天扫描的 Milli-Q 水信号,并以样品的吸光度校正内过滤效应,再运用 PARAFAC 进行解谱,识别 CDOM 样品中存在的各种荧光组分、分析各荧光组分的荧光强度与相对比例.

2 结果与讨论

2.1 夏季闽江下游-河口区 CDOM 的空间分布

2.1.1 CDOM 的荧光组分特征

利用 PARAFAC 对 158 个 CDOM 样品的 EEMs 进行分析,共识别出 4 个荧光组分(图 2),所有组分都具有单一的发射峰,除组分 C2 的其他 3 个组分都有 2 个激发峰.这些组分的荧光特征与其他研究中利用 PARAFAC 鉴别的荧光组分相似^[12~14, 16~18],各组分的峰位置、性质描述及与文献结果的对比见表 1.

组分 C1 (≤240, 325/442 nm)、C3 (265, 405/488 nm) 是典型的类腐殖质荧光组分. C1 的长波激发荧光峰(325/442 nm)位于传统的 C 峰区域, 而短波激发荧光峰(≤240/442 nm)与 A 峰接近. 该组分代表了陆地来源的腐殖质组分. C3 的发射峰波长较传统的 A 峰、C 峰都长, 长波激发峰(405/488 nm)与传统的 C 峰相近, 但其激发发射波长都更

长, 说明可能含有高分子量和高芳香度基团.
组分 C2 (275/299 nm) 和 C4 (≤240, 290/344 nm) 为典型的类蛋白质组分, C2 的荧光峰位置与传统 B 峰一致, 说明 C2 主要为类酪氨酸基团. C4 的两个荧光峰的位置与色氨酸单体的荧光峰(220 ~ 230, 270 ~ 280/340 ~ 350 nm)相近, 说明 C4 主要为类色氨酸荧光基团.

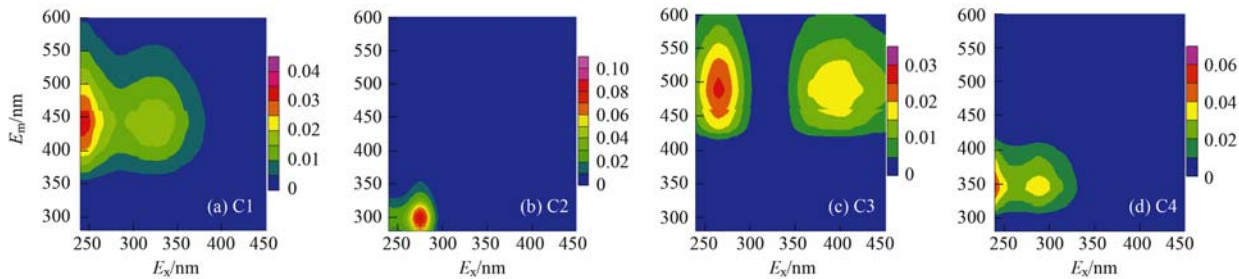


图2 PARAFAC 模型识别的 4 个荧光组分的光谱特征

Fig. 2 Spectral characteristics of the four fluorescent components identified with the PARAFAC model

表 1 荧光组分 C1、C2、C3 和 C4 的最大激发波长和最大发射波长

Table 1 Excitation and emission maxima of the fluorescent components C1, C2, C3, and C4

荧光组分及其峰位置	传统荧光峰	其他研究中对应的 PARAFAC 组分	性质描述
C1: ≤240, 325/442 nm	A 峰和 C 峰的组合	<250, 360/440 nm ^[13] ; 345/433 nm ^[14]	类腐殖质
C2: 275/299 nm	B 峰	275/304 nm ^[13]	类酪氨酸
C3: 265, 405/488 nm	A 峰和 C 峰的组合	<250, 385/504 nm ^[13] ; 275, 390/475 nm ^[14] ; 260, 370/490 nm ^[16]	类腐殖质
C4: ≤240, 290/344 nm	T 峰	280/344 nm ^[13] ; 280/318 nm ^[14]	类色氨酸

2.1.2 DOM 各荧光组分的空间分布与河口行为

对 4 个荧光组分的荧光强度进行相关性分析(表 2). 发现组分 C1 和 C3 之间存在显著的相关性($r=0.981$, $P<0.01$), 表明 2 个类腐殖质的来源具有相似性. 同时另外 2 个组分 C2 和 C4 间相关性较弱, 说明 2 个类蛋白质的特征以及来源各不相同, 因此可以将闽江下游的荧光组分分为 3 种类型: 类腐殖质、类酪氨酸和类色氨酸.

表 2 荧光组分 C1、C2、C3 和 C4 荧光强度的相关性¹⁾

Table 2 Correlations between the fluorescence intensities of the fluorescent components C1, C2, C3, and C4

	C1	C2	C3
C2	-0.109		
C3	0.981 **	0.072	
C4	0.590 **	0.555 **	0.611 **

1) ** 表示 $P<0.01$

类腐殖质组分的荧光强度为 0.09 ~ 0.48RU, 平均值为 0.40RU, 在进入市区后(即 M03 站位以后)升高 11%, 而后基本保持不变, 至河口区(即 M12 站位以后)开始快速下降[图 3(a)]. 河口区类腐殖质与盐度显著相关($r=-0.978$, $P<0.01$), 表明其在河口区呈保守行为[图 3(b)], 主要来源为陆源输入.

类酪氨酸组分的荧光强度为 0.03 ~ 0.50RU, 平均值为 0.13RU[图 3(a)]. 类酪氨酸的荧光强度在河段的变化无明显规律[图 3(b)]. 在河口区类酪氨酸与盐度无显著相关, 但在盐度 > 3 后随盐度的增加呈上升趋势[图 3(b)], 最终高于类腐殖质的荧光强度, 可能与海洋浮游生物生产的贡献有关^[19].

类色氨酸组分的荧光强度为 0.03 ~ 0.44RU, 平均值为 0.15RU. 类色氨酸荧光强度的空间分布与类酪氨酸类似, 在河段的变化无明显规律[图 3(a)]. 在河口区, 类色氨酸与盐度无显著相关($r=-0.537$, $P>0.05$), 但在盐度 > 1‰ 后随盐度的增加呈下降趋势[图 3(b)], 这说明陆源输入的类色氨酸高于海洋自生的.

整体上类腐殖质的荧光强度在三类荧光组分中所占比例最大, 各个站位类腐殖质的平均比例为 61%, 说明类腐殖质是闽江下游水体 CDOM 荧光物质的主要组分. 这与 Baker^[20]对河流 CDOM 的研究结果类似, 即河流中类腐殖质荧光强度要显著大于类蛋白质荧光强度. 类腐殖质的荧光强度在市区河段升高 11%, 而类蛋白质的荧光强度在市区和郊区河段基本保持不变, 表明人为活动影响着 CDOM 的类腐殖质组分, 而对类蛋白质组分的影响不显著.

而在河口区盐度 $>15‰$ 的站位, 两类类蛋白质组分的比例随盐度的增加而增加, 反映出河口区随着盐度的增加 CDOM 的荧光组分从以类腐殖质为主转变为以类蛋白质为主, 这与九龙江河口^[21]和波罗的海^[19]的观测结果一致. M12 站位类蛋白质组分突然增加, 而类腐殖质组分无明显变化, 可能与该站位存在人为污水排放有关.

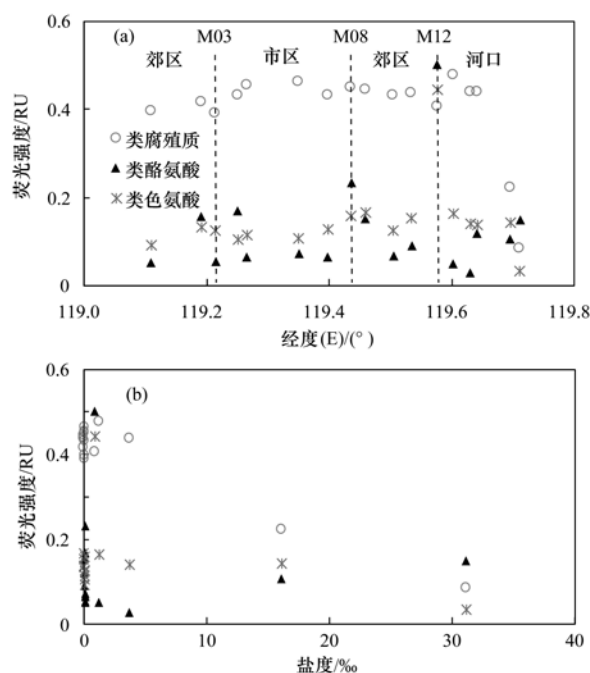


图3 3类荧光组分的荧光强度随经度和盐度的变化

Fig. 3 Changes in the fluorescence intensities of the three types of fluorescent components with longitude and salinity

2.1.3 CDOM 的吸收特征及其空间分布

图4是 $a(280)$ 和 $S_{275-295}$ 随经度的变化, 反映了 $a(280)$ 和 $S_{275-295}$ 的空间分布特征. CDOM 的吸收系数 $a(280)$ 能反映水体中 CDOM 的相对含量^[22]. $a(280)$ 的变化范围是 $2.1 \sim 13.4 \text{ m}^{-1}$. $a(280)$ 在 M01 ~ M03 站位较低, 平均值为 11.7 m^{-1} ; 进入市区后有所升高, 变化范围为 $11.6 \sim 13.4 \text{ m}^{-1}$; 在下游郊区河段(即 M08 站位以后), $a(280)$ 随着经度的增加开始降低, 变化范围为 $10.8 \sim 13.4 \text{ m}^{-1}$; 而在河口区快速下降(图4). 河口区 $a(280)$ 与盐度呈显著负相关($r = -0.959$, $P < 0.01$), 表明 CDOM 在河口区呈保守行为.

吸收光谱斜率 $S_{275-295}$ 反映了 CDOM 相对分子质量大小, 该值越大表示相对分子质量越小^[22]. $S_{275-295}$ 的变化范围为 $0.0096 \sim 0.0165 \text{ nm}^{-1}$, 其空间变化与 $a(280)$ 有所不同, 在河段 M01 ~ M08 站位基本保持不变, 平均值为 $(0.0100 \pm 0.0003) \text{ nm}^{-1}$; 进入郊区河段后, $S_{275-295}$ 随着经度逐渐上升, 表明小分子组分比例增加; 而在河口区 $S_{275-295}$

迅速增加(图4). 河口区 $S_{275-295}$ 与盐度显著相关($r = 0.928$, $P < 0.01$). 这说明进入郊区后随着人为干扰减少, 大分子 CDOM 降解为小分子组分, 且海洋自生源的 CDOM 平均分子质量低于闽江下游陆源 CDOM 的平均分子质量, 从而增加河口区小分子 CDOM 的比例, 这与九龙江口等河口区的研究结果一致^[23, 24].

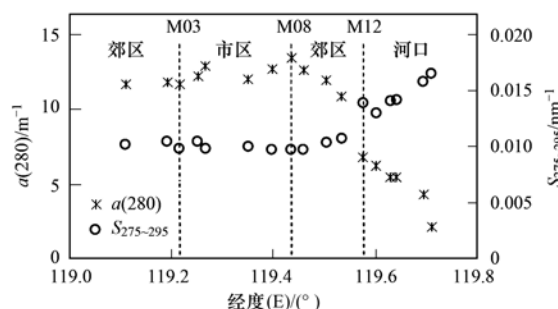


图4 CDOM 吸收系数 $a(280)$ 和光谱斜率 $S_{275-295}$ 随经度的变化

Fig. 4 Changes in the CDOM absorption coefficient $a(280)$ and spectral slope $S_{275-295}$ with longitude

河流 CDOM 的来源主要包括: 植物和土壤淋溶、人为排放、自生源和颗粒物的解吸等; 河流 CDOM 的去除主要是微生物降解和光降解、以及颗粒物的吸附等. 福州市的林草覆盖面积占 8.76% , 远低于上游南平市 (23.5%), 植物淋溶输入较少; 而建筑用地面积占 16.11% , 大于南平市 (8.13%)^[25], 即下游水体受到的人为影响较大. 水体进入市区后 $a(280)$ 增加 8% , 显示福州市区对闽江下游水体 CDOM 的贡献. 这只是保守估计, 因为通过微生物降解实验和光降解实验发现, 闽江下游水体微生物降解率和光降解率很高. 到郊区后, 由于人为污染输入较小, 在微生物和光照的作用下, CDOM 含量开始降低. 在河口区海水的混入稀释了水体 CDOM 含量, 导致 CDOM 快速下降, 到近海站位 M17 达到最低. 下游河段水体类腐殖质和两类类蛋白质组分基本保持不变, 表明福州市区对闽江下游水体 CDOM 非荧光组分的贡献较大.

2.2 微生物降解和光降解过程中 CDOM 的变化

2.2.1 微生物降解

图5反映微生物降解实验中 CDOM 的吸收系数 $a(280)$ 和 3 类荧光组分的变化. 河段站位 (M01 ~ M11) CDOM 的吸收系数 $a(280)$ 在培养 28 d 后降低 $18\% \sim 41\%$ [图 5(a)], 反映了 CDOM 在微生物的作用下发生降解, 平均降解率为 $(28 \pm 8)\%$. 而在河口区, 培养 28 d 后 $a(280)$ 并无明显变化, 平均降解率为 1% [图 5(a)]. 河段站位的 $a(280)$ 在培养期间呈现不断下降的趋势, 并在 $3 \sim 14 \text{ d}$ 的降

解速率最大, 而河口站位(M17)在 28 d 内均无明显变化. 这表明河段 CDOM 的生物可利用性高于河口区, 一方面可能是由于可降解组分在河段被降解去除, 另一方面可能是由于河口区 CDOM 的分子量普遍低于河段陆源 CDOM, 而高分子量 CDOM 组分会优先被微生物降解^[26].

CDOM 的 3 类荧光组分在培养过程中的变化与

$a(280)$ 不尽相同. 总体上类腐殖质在培养 28 d 后含量增加, 而两类类蛋白质组分在部分站位会发生降解[图 5(b)]. 这表明闽江下游-河口区 CDOM 在微生物的作用下会出现类腐殖质的累积. 有研究表明 DOM 的微生物降解受分子量和有机组成影响, 糖类和类蛋白, 特别是高分子量的组分, 会优先被微生物降解, 而类腐殖质则会发生积聚^[26].

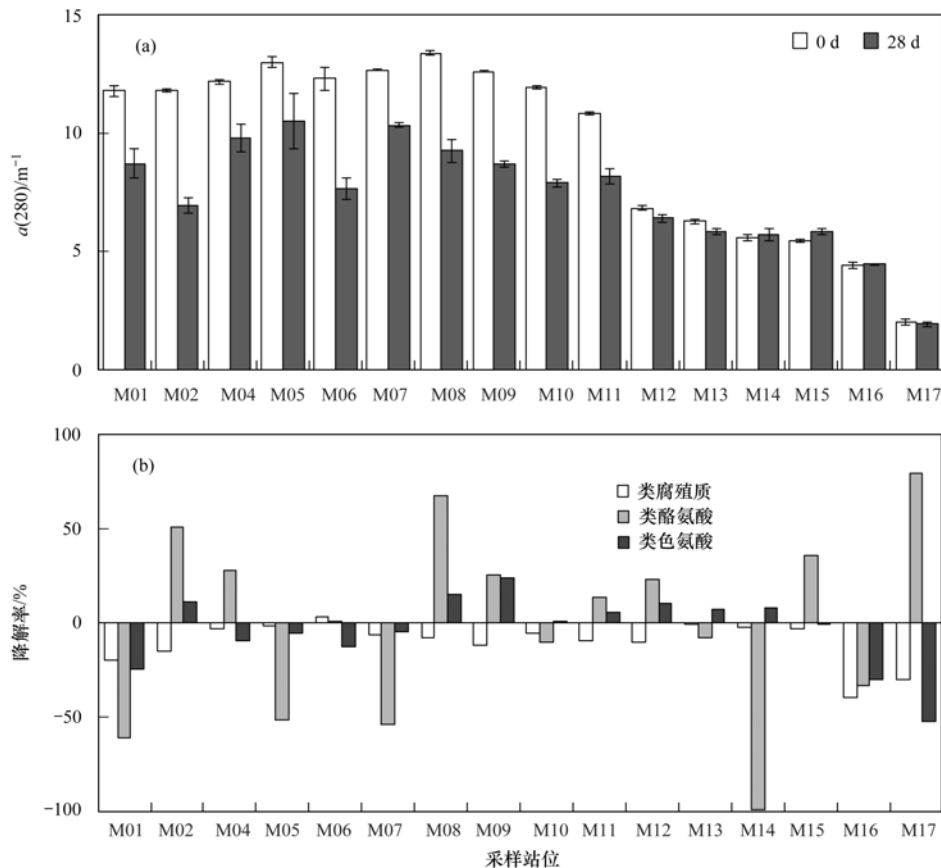


图 5 CDOM 吸收系数 $a(280)$ 与荧光组分的荧光强度在微生物降解实验中的变化

Fig. 5 Changes in the CDOM absorption coefficient $a(280)$ and fluorescence intensities of fluorescent components in the microbial degradation experiment

2.2.2 光降解

图 6 给出了 4 个站位 CDOM 的吸收系数 $a(280)$ 和荧光组分在光降解过程中的变化. 河段站位(M01、M06 和 M10)的吸收系数 $a(280)$ 随着辐照时间的增加呈现不断下降的趋势, 反映了水体 CDOM 在太阳辐射的作用下发生降解[图 6(a)], 平均降解率达到 $(44 \pm 7)\%$. 通过一级降解动力学方程: $c_t = c_0 e^{-kt}$, 拟合得到 3 个站位 $a(280)$ 的光化学降解动力学常数 k 分别为 0.26、0.27 和 0.17 d^{-1} , 而对照组(避光)在误差允许的范围内几乎没有变化, 充分证明了实验组 $a(280)$ 的下降确是由太阳辐射引起的. 河口站位(M17)随辐照时间的增加并无明显变化, 照射 3 d 后的降解率仅为 4%, 远低于河段站位. 河段 3 个站位是陆源淡水样品, 而河口 M17 站位盐度为 31.15‰, 属于近海样品, 表

明陆源 CDOM 的光反应活性高于海源 CDOM, 这与长江口^[27]、珠江口^[28]以及九龙江口^[29]的观测结果一致. 陆源 CDOM 的芳香性高于海洋生态系统^[2], 含有的大分子芳香性物质较多, 其光降解程度也更高. 相较微生物降解, 闽江河段 CDOM 的 3 d 光降解率 $(44 \pm 7)\%$ 高于 28 d 微生物降解率 $(28 \pm 8)\%$.

河段站位 CDOM 的 3 类荧光组分的光降解过程与 $a(280)$ 类似, 随辐照时间增加而呈现降低的趋势[图 6(b)~6(d)]. 其中类腐殖质的降解尤为显著, 平均降解率达到了 $(75 \pm 0.5)\%$, 一级降解动力学常数分别是 0.66, 0.58 和 0.67 d^{-1} . 而类酪氨酸的光降解程度最低, 平均降解率为 $(58 \pm 21)\%$, 光降解动力学常数分别是 0.42, 0.15 和 0.49 d^{-1} . 类色氨酸平均降解率为 $(73 \pm 3)\%$, 降解

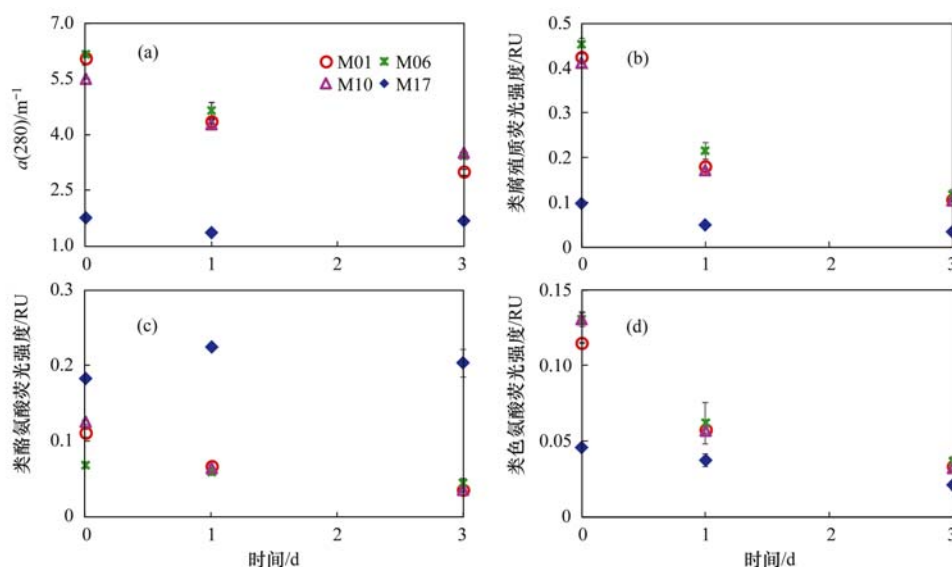


图6 CDOM吸收系数 $a(280)$ 和荧光组分的荧光强度随辐照时间的变化

Fig. 6 Changes in the CDOM absorption coefficient $a(280)$ and fluorescence intensities of fluorescent components with irradiation time

动力学常数分别是 0.49、0.56 和 0.65 d^{-1} , 与类腐殖质的光化学降解程度相近. 河口 M17 站位的 3 类荧光组分无法拟合一级动力学方程, 其中类腐殖质和类色氨酸的降解率分别为 64% 和 55%, 而类酪氨酸在误差范围内无明显变化. 同样地, 对照组的荧光组分在辐照实验过程中保持不变. 这些研究结果表明, 闽江 CDOM 的荧光组分具有很高的光降解活性, 且类腐殖质与类色氨酸的活性高于类酪氨酸, 河段各组分的活性高于河口区, 光化学反应在闽江河-海界面 DOM 的生物地球化学中不可忽视.

3 结论

(1) EEMs-PARAFAC 识别出闽江下游-河口区 CDOM 的 3 类荧光组分: 类腐殖质, 类酪氨酸和类色氨酸. 类腐殖质是河段 CDOM 的主要荧光组分, 而在河口区类腐殖质和类色氨酸的荧光强度与盐度负相关, 类酪氨酸则随盐度的增加呈上升趋势, 并在近海站位 (M17) 高于类腐殖质. 因此, 随着盐度的增加 CDOM 的荧光组分从以类腐殖质为主转变为以类蛋白质为主.

(2) 闽江下游-河口区 CDOM 的含量和化学组成呈现显著的空间变化. CDOM 的吸收系数 $a(280)$ 在流经福州市区后增加, 而在郊区河段开始下降, 并在河口区迅速下降, 其中福州市区对 CDOM 含量的贡献率为 8%. CDOM 吸收光谱斜率 $S_{275-295}$ 在河段基本保持不变, 而在河口区迅速增加, 说明 CDOM 的平均分子量随盐度升高而降低, 主要受控于海洋自生源和陆源有机质的混合、以及大分子组分在河段被降解为小分子组分.

(3) 河段 CDOM 的微生物降解活性和光降解活

性均高于河口区 CDOM. 各荧光组分在微生物和光照的作用下, 存在显著差异: 类腐殖质荧光强度经微生物培养后增加, 而在光降解后显著减少; 类酪氨酸和类色氨酸荧光强度经微生物培养后部分站位降低而部分站位升高, 光降解后显著减少. 这说明在微生物作用下, 类腐殖质组分会发生累积; 而在光照作用下, 3 类荧光组分均会减少.

参考文献:

- [1] Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, *et al.* Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8** (8): 593-599.
- [2] Hood E, Fellman J, Spencer R G M, *et al.* Glaciers as a source of ancient and labile organic matter to the marine environment [J]. *Nature*, 2009, **462** (7276): 1044-1047.
- [3] Arrieta J M, Mayol E, Hansman R L, *et al.* Ocean chemistry. Dilution limits dissolved organic carbon utilization in the deep ocean[J]. *Science*, 2015, **348** (6232): 331-333.
- [4] Jiao N Z, Legendre L, Robinson C, *et al.* Comment on "Dilution limits dissolved organic carbon utilization in the deep ocean" [J]. *Science*, 2015, **350** (6267): 1483.
- [5] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77** (1): 23-41.
- [6] Massicotte P, Asmala E, Stedmon C, *et al.* Global distribution of dissolved organic matter along the aquatic continuum: across rivers, lakes and oceans[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 180-191.
- [7] Twardowski M S, Donaghay P L. Separating in situ and terrigenous sources of absorption by dissolved materials in coastal waters[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, **106** (C2): 2545-2560.
- [8] Kahru M, Mitchell B G. Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived chlorophyll and colored dissolved organic matter concentration in the California Current [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, **106** (C2): 2517-2529.

- [9] Jaffé R, McKnight D, Maie N, *et al.* Spatial and temporal variations in DOM composition in ecosystems: the importance of long-term monitoring of optical properties [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, **113** (G4): G04032.
- [10] Vodacek A, Blough N V, Degrandpre M D, *et al.* Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: terrestrial inputs and photooxidation [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 674-686.
- [11] Nelson N B, Siegel D A, Michaels A F. Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, **45**(6): 931-957.
- [12] 郭卫东, 黄建平, 洪华生, 等. 河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1419-1427.
- Guo W D, Huang J P, Hong H S, *et al.* Resolving excitation emission matrix spectroscopy of estuarine CDOM with parallel factor analysis and its application in organic pollution monitoring [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1419-1427.
- [13] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697.
- [14] Yamashita Y, Jaffé R, Maie N, *et al.* Assessing the dynamics of dissolved organic matter (DOM) in coastal environments by excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEM - PARAFAC) [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(5): 1900-1908.
- [15] 张章新. 闽江流域水文特性分析[J]. *水文*, 2000, **20**(6): 55-58.
- Zhang Z X. Analysis of hydrological characteristics of Minjiang River Basin [J]. *Hydrology*, 2000, **20**(6): 55-58.
- [16] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2008, **108**(1-2): 40-58.
- [17] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [18] Balcarczyk K L, Jones J B Jr, Jaffé R, *et al.* Stream dissolved organic matter bioavailability and composition in watersheds underlain with discontinuous permafrost [J]. *Biogeochemistry*, 2009, **94**(3): 255-270.
- [19] Kowalczyk P, Stoń-Egiert J, Cooper W J, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Baltic Sea by excitation emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2005, **96**(3-4): 273-292.
- [20] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(7): 1377-1382.
- [21] 韩宇超, 郭卫东. 九龙江河口有色溶解有机物的三维荧光光谱特征[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 641-647.
- Han Y C, Guo W D. The fluorescence excitation emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the Jiulong River Estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(3): 641-647.
- [22] Derrien M, Yang L Y, Hur J. Lipid biomarkers and spectroscopic indices for identifying organic matter sources in aquatic environments: a review [J]. *Water Research*, 2017, **112**: 58-71.
- [23] Guo W D, Stedmon C A, Han Y C, *et al.* The conservative and non-conservative behavior of chromophoric dissolved organic matter in Chinese estuarine waters [J]. *Marine Chemistry*, 2007, **107**(3): 357-366.
- [24] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [25] 福建省测绘地理信息局. 福建省第一次全国地理国情普查公报 [EB/OL]. http://www.fjbsm.gov.cn/res_root/upload/document/20171213/489b8f33461c430e9efce57508068717.pdf, 2017-12.
- [26] Xu H C, Guo L D. Intriguing changes in molecular size and composition of dissolved organic matter induced by microbial degradation and self-assembly [J]. *Water Research*, 2018, **135**: 187-194.
- [27] 孙欣, 宋贵生, Xie H X. 长江口溶解有机物光漂白和光矿化表观量子产率 [J]. *海洋学报*, 2016, **38**(4): 120-129.
- Sun X, Song G S, Xie H X. The apparent quantum yields of dissolved organic matter photobleaching and photomineralization in the Changjiang River Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, **38**(4): 120-129.
- [28] 王福利, 郭卫东. 秋季南海珠江口和北部湾溶解有机物的光降解 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(3): 606-613.
- Wang F L, Guo W D. Photodegradation of DOM in the Pearl River Estuary and the Beibu Gulf of the South China Sea in autumn [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(3): 606-613.
- [29] Guo W D, Yang L Y, Yu X X, *et al.* Photo-production of dissolved inorganic carbon from dissolved organic matter in contrasting coastal waters in the southwestern Taiwan Strait, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(7): 1181-1188.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i>	(1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i>	(11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i>	(24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i>	(33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i>	(55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i>	(76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i>	(86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i>	(104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i>	(114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i>	(121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i>	(126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i>	(149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i>	(157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i>	(164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue	(192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i>	(200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i>	(211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i>	(219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i>	(228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan	(239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i>	(256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i>	(263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i>	(273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i>	(281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i>	(293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Maifanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i>	(300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i>	(310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i>	(318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i>	(336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i>	(360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i>	(369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i>	(376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i>	(383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i>	(392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i>	(412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i>	(421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i>	(437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping	(445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong	(461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i>	(480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i>	(488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i>	(496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i>	(504)