

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                      |                                                                            |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 餐饮行业细颗粒物(PM <sub>2.5</sub> )排放测算方法:以上海市为例            | 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)                            |
| 上海夏季PM <sub>2.5</sub> 中有机物的组分特征、空间分布和来源              | 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)                 |
| 北京南郊区PM <sub>2.5</sub> 中水溶性无机盐季节变化及来源分析              | 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)                                                        |
| 基于样方法的天津市春季道路扬尘PM <sub>10</sub> 中水溶性离子特征及来源解析        | 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)                                              |
| 广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析                                  | 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)                                |
| 基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径                         | 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)                                  |
| 区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用                               | 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)                                                       |
| 典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征                                    | 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)                                      |
| 多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究                                  | 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)                                                       |
| 氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源                                | 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)                                              |
| 白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价                                 | 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)                               |
| 太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义                                 | 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)                                              |
| 长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点                               | 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)                                                   |
| 桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征                                    | 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)                                     |
| 青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性                        | 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)                                    |
| 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性                               | 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)                                             |
| 溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析                            | 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)                                |
| 三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析                         | 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117) |
| 澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析                          | 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)                                               |
| 蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征                             | 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)                               |
| 两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响                               | 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)                                                |
| 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量                               | 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)                                      |
| 岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征                                  | 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)                                         |
| 农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析                               | 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)                                                  |
| 不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响                      | 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)                                      |
| 真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质                                 | 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)                                                 |
| 石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G                               | 夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)                                         |
| 载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制                               | 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)                                                    |
| DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验                 | 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)                                                         |
| 污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征                                    | 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)                                             |
| 低温污水前置强化混凝                                           | 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)                                                       |
| 印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性                                | 谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)                                         |
| 生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR                          | 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)                                                   |
| 两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化                                 | 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)                                   |
| 铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较                              | 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)                                                   |
| 热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响                                | 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)                                          |
| 曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响                                   | 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)                                           |
| 中国城市污泥中汞含量的时空分布特征                                    | 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)                                           |
| 夏季太湖湖/藻型湖区N <sub>2</sub> O生成与迁移特征及其影响因素              | 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)                                         |
| 太湖藻型湖区CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub> 排放特征及其影响因素分析  | 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)                                         |
| 内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O特征 | 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)                                       |
| 黄土高原成龄苹果园生态系统CO <sub>2</sub> 通量特征                    | 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)                                        |
| 生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响                                 | 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)                                  |
| 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响                               | 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)                                                 |
| ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征                         | 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)                                               |
| 不同排海方式城市尾水微生物扩散规律                                    | 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)                                             |
| 旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例                     | 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)                                              |
| 不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析                                    | 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)                                    |
| 生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响                                 | 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)                                |
| 铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征                             | 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)                                |
| 湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构                                | 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)                                    |
| 反硝化菌群的蔡代谢与反硝化偶联机制                                    | 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)                                                  |
| 广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价                                   | 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)                                      |
| 三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响                                 | 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)                                          |
| 水稻不同生长时期不同组织中抗砷内生菌的筛选与鉴定                             | 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)                                                       |
| 汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征                                 | 李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)                                           |
| 华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价                             | 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)                                                |
| 基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM <sub>2.5</sub> 健康效应            | 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)                                             |
| 中国PM <sub>2.5</sub> 污染空间分布的社会经济影响因素分析                | 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)                                                   |
| 《环境科学》征订启事(2094)                                     |                                                                            |
| 《环境科学》征稿简则(2164)                                     |                                                                            |
| 信息(2183, 2411, 2445)                                 |                                                                            |

# 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性

梁梦琦<sup>1</sup>, 邵美玲<sup>1</sup>, 曹昌丽<sup>2,3</sup>, 纵亚男<sup>1,3</sup>, 唐剑锋<sup>2,3\*</sup>

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 安徽省高校生物环境与生态安全省级重点实验室, 芜湖 241000; 2. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 3. 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 宁波 315830)

**摘要:** 溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)在水体环境中广泛存在, 对重金属在水环境中的环境行为有重要影响. 本研究为探讨 DOM 与重金属的相关性, 以宁波市城郊流域樟溪和城镇流域芦江为例, 利用三维荧光技术分析不同城镇化梯度下河流水体溶解性有机质(DOM)的结构组成特征, 分析 DOM 各项参数与重金属之间的相关性. 结果表明, 城镇化程度较高的河流水体具有较高的 DOC、有色溶解性有机质(CDOM)和荧光溶解性有机质(FDOM)浓度; 城郊流域与城镇流域水体中 DOM 均含有 4 个荧光峰, 类富里酸荧光峰 A 和 C 以及类蛋白荧光峰 B 和 T, 且城镇流域水体荧光峰 B 和 T 的强度显著高于城郊流域, DOM 腐殖化程度与芳香性也具有同样的趋势; 城镇流域水体中重金属 As、Cu 和 Mn 浓度显著高于城郊流域. DOM 与重金属的相关性结果表明, 城镇河流中 DOM 与 Cu、Cr、Mn、As、Zn 和 Pb 都存在显著的正相关关系, 而城郊河流中 DOM 只与 Mn、Pb 和 Cu 呈显著正相关, 与其它重金属相关性不明显. 总之, 城镇化水平影响河流水体中 CDOM 的浓度和性质, 而 CDOM 浓度和性质与重金属的行为密切相关.

**关键词:** 溶解性有机质; 三维荧光; 重金属; 相关性; 樟溪; 芦江

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2095-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710089

## Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River

LIANG Meng-qi<sup>1</sup>, SHAO Mei-ling<sup>1</sup>, CAO Chang-li<sup>2,3</sup>, ZONG Ya-nan<sup>1,3</sup>, TANG Jian-feng<sup>2,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui Province, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. Ningbo Urban Environment Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315830, China)

**Abstract:** Dissolved organic matter (DOM) is ubiquitous in the aquatic environment, playing an important role in the fate of heavy metals in aquatic systems. In this study, we characterized the DOM and heavy metals and their distribution in a peri-urban river and an urban river in Ningbo city. In addition, the relationship between DOM and dissolved heavy metals was also determined. Results showed that higher DOC, CDOM, and FDOM concentrations were found in the river with the higher urbanization level. Four fluorescence peaks were identified in the excitation-emission matrix (EEM) of DOM, including fulvic acid-like fluorescence peaks A and C and protein-like fluorescence peaks B and T. The higher fluorescence intensities of peak B and T were found in the urban river, and similar trends were also found for the degree of humification and aromaticity of DOM. Similarly, concentrations of heavy metals, such as As, Cu, and Mn, were significantly higher in the urban river. Moreover, DOM had significant positive correlations with Cu, Cr, Mn, As, Zn, and Pb in the urban river, while DOM only exhibited significant positive correlations with Mn, Pb, and Cu in the peri-urban river. In conclusion, urbanization level influenced the characteristics and concentrations of CDOM in rivers which were closely related to the distribution of heavy metals.

**Key words:** dissolved organic matter; excitation-emission matrix fluorescence; heavy metals; correlation; Zhangxi River; Lujiang River

近年来,随着城市化的快速发展和人口的不断集中,城市土地利用方式发生急剧转变并造成水体环境恶化,影响生态系统服务功能.流域水体中污染物的迁移转化过程与水体中的溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)密切相关<sup>[1]</sup>.DOM是由含氧、氮和硫的氨基酸、芳香族、脂肪族等功能团组成的异质碳氢混合物,广泛存在于各种天然水体中<sup>[2]</sup>.其来源为动植物残体、土壤、藻类活动产生的排泄物以及人类活动排放的环境污染物

等<sup>[3,4]</sup>.研究表明,DOM作为重金属的重要介质,对重金属在水环境中的迁移转化过程起着至关重要的作用<sup>[5,6]</sup>.在一些淡水水体中,DOM可以与Cu、Zn、Cd和Ni产生强烈的络合作用<sup>[7]</sup>;日本的Sagami河流中DOM与Cu和Fe之间具有较强的亲

收稿日期: 2017-10-13; 修订日期: 2017-11-13

基金项目: 中国科学院城市环境与健康重点实验室项目(KLUEH-C-201701); 宁波市重大科技计划项目(2015C110001)

作者简介: 梁梦琦(1992~),女,硕士,主要研究方向为水环境与流域生态学, E-mail: mengqiliangep@163.com

\* 通信作者, E-mail: jftang@iue.ac.cn

和力<sup>[8]</sup>;而在小清河莱州湾河口水体中, Hg 和 DOM 之间无明显联系<sup>[9]</sup>. 由此可见, 不同地区不同水体的 DOM 与重金属的研究表明它们之间的相关关系存在不确定性.

随着我国城镇化进程明显加快, 2012 年我国城镇人口比例已达到 52.5%, 2020 年将上升到 60%, 2050 年将达到 80% 左右<sup>[10, 11]</sup>. 在城镇化过程中, 由城镇化进程的阶段性而形成城市核心区、郊区(城乡过渡带地区)和乡村地区的三元地域结构, 并构成显著的城市化梯度<sup>[12~14]</sup>. 快速的城镇化过程导致了水体中 DOM 浓度与性质的改变<sup>[15]</sup>, 同时城镇化区域的人为活动可以显著增加水体中重金属浓度<sup>[16]</sup>. 我国长三角地区土地利用集约程度高, 人口密集, 地表水污染严重, 是城市化最高的地区之一. 在快速城镇化背景下, 城镇区域的人类活动对 DOM 的来源尚不清楚, DOM 与重金属之间的关系也还需进一步研究. 因此, 本文选取长三角地区快速城镇化过程的典型代表宁波市, 以城镇化梯度差异明显的 2 个流域: 樟溪(城郊)和芦江(城镇)开展对比研究, 分析河流水体 DOM 的来源性质, 以及 DOM 与重金属污染之间的关系, 探讨城镇化背景下人类活动对 DOM 来源, 重金属污染及两者之间的关系, 研究城镇化对河流水质的影响机制.

## 1 材料与方法

### 1.1 区域概况

樟溪位于浙江省宁波市鄞州区, 地处长三角核心区域, 全长 13.9 km, 河宽 60~80 m, 平均深度为 2.5 m(图 1). 樟溪属于城郊自然流域, 受人类活动影响较少, 周围土地类型以农田、林地和果园为主. 贯穿章水镇和龙观乡, 其中, 2016 年章水镇的人口数量为 2.6 万人, 龙观乡的人口数量为 1.1 万人; 2016 年章水镇 GDP 为 6.9 亿元, 龙观乡 GDP 为 7.7 亿元<sup>[17]</sup>. 芦江位于浙江省宁波市北仑区柴桥镇, 属于城镇流域, 流域内工业化程度较高, 主河道总长约 9 km, 是柴桥镇境内最重要的排水河道. 2015 年柴桥镇人口达到 4.0 万人, 2016 年北仑区 GDP 达到 1 153.1 亿元<sup>[18]</sup>, 随着城镇化的快速发展, 芦江流域水质氮磷污染严重<sup>[19]</sup>.

### 1.2 样品采集

于 2016 年 12 月对樟溪和芦江进行了采样, 采样点分布如图 1 所示, 分别在樟溪流域的上、中、下游设置 19 个样点以及芦江流域不同人类活动区域如农业区、生活区、工业区及无污染区域设置 11

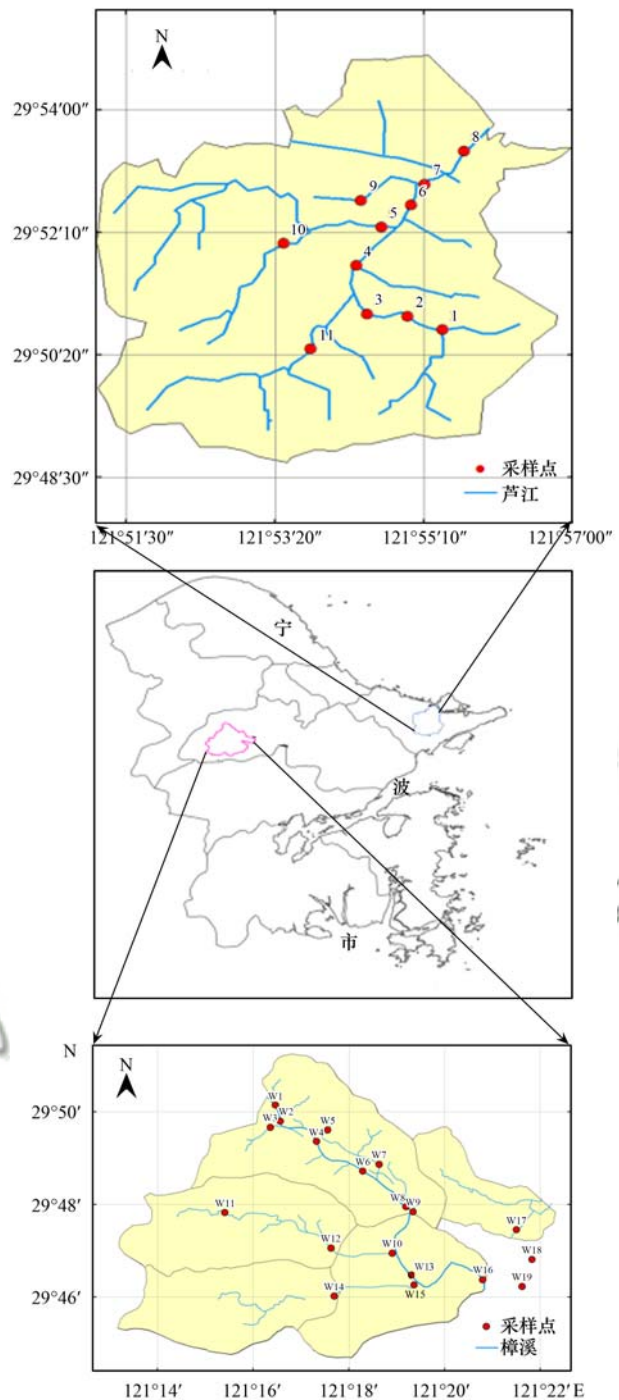


图 1 樟溪和芦江的样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Zhangxi River and Lujiang River

个样点. 采集的水样装入 4 L 棕色玻璃瓶运回实验室, 用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后放在 4℃ 冰箱保存, 并在 48 h 内完成水样指标的检测.

### 1.3 理化指标检测

采用多参数数字化分析仪(美国哈希, HQ40D)现场测定温度、pH、盐度和溶解氧(DO); 参照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)进行 DOC 与

重金属的测量:采用 TOC 仪(德国 Elementar, Vario TOC)测定溶解性有机碳(DOC);采用 ICP-MS(赛默飞, icap Q)测定水体 As、Cu、Zn、Pb、Mn 和 Cr 的元素含量.

1.4 荧光光谱检测

采用荧光分光光度计(日立 F-4600)进行水体 DOM 的三维荧光光谱测定,配以 1 cm 石英比色皿.以 Milli-Q 超纯水为实验空白,对水样进行三维荧光扫描.仪器光源为 150 W 氙灯,光电倍增电压为 800 V,激发和发射狭缝宽度均设置为 5 nm,相应时间 0.1 s,激发波长( $E_x$ )为 220 ~ 450 nm,扫描间隔 5 nm;发射波长( $E_m$ )260 ~ 600 nm,扫描间隔 1 nm;扫描速度为 2 400 nm·min<sup>-1</sup>.所有水样的三维荧光均需减去空白光谱,以消除拉曼散射的影响<sup>[20]</sup>;并将发射波长等于激发波长与发射波长等于 2 倍激发波长包围外的区域光谱值赋值为零,以修正瑞利散射的影响<sup>[2]</sup>.

1.5 数据分析

采用 Origin8.0 分析处理数据,SPSS 22.0 对数据进行 Pearson 相关系数的计算,采用 Matlab 进行三维荧光图谱绘制.

2 结果与讨论

2.1 城郊流域与城镇流域的 DOM、CDOM 和 FDOM 的丰度

结果表明(表 1),城镇流域(芦江)水体中 DOC 浓度略高于城郊流域(樟溪),但二者差异不显著

( $P > 0.05$ ),其浓度分别为 0.83 ~ 3.45 mg·L<sup>-1</sup>、0.84 ~ 3.53 mg·L<sup>-1</sup>,均值分别为 (2.27 ± 0.86) mg·L<sup>-1</sup>、(1.92 ± 0.65) mg·L<sup>-1</sup>,变异系数分别为 37.89%、33.85%.芦江的变异系数略高于樟溪,可能由于芦江受人类活动影响较多,导致其 DOC 浓度波动范围较樟溪更大.

国内外的研究中,一般以 355 nm 处的吸收系数  $a(355)$  代表有色溶解性有机质(CDOM)相对浓度<sup>[21, 22]</sup>. $F_n(355)$  是  $E_x = 355$  nm、 $E_m = 450$  nm 时荧光强度,用  $F_n(355)$  表示荧光溶解性有机质(FDOM)的相对浓度<sup>[23, 24]</sup>.本研究也用  $a(355)$  和  $F_n(355)$  代表 CDOM 和 FDOM 的相对浓度.结果显示,城镇化程度较高的芦江河流水体中的 CDOM 和 FDOM 相对浓度显著高于樟溪,其 CDOM 和 FDOM 的浓度均值分别为樟溪的 2.6 倍和 2.3 倍. $a_g^*(355)$  是 CDOM 与 DOC 浓度之比,该值表示 CDOM 在 DOM 中所占比例<sup>[25, 26]</sup>.樟溪的  $a_g^*(355)$  值为 0.00 ~ 1.18 L·(mg·m)<sup>-1</sup>,芦江的  $a_g^*(355)$  值为 0.54 ~ 1.61 L·(mg·m)<sup>-1</sup>,芦江水体的  $a_g^*(355)$  值显著高于樟溪( $P < 0.05$ ).综上所述,芦江水体的 DOC、CDOM、FDOM 浓度以及 CDOM 所占比值都高于樟溪,这可能与前者的城镇化水平较高有关,区域内频繁的工业活动带来更多的外源性 DOM.水体中的 DOC 与 CDOM 和 FDOM 之间往往存在显著的正相关关系<sup>[27 ~ 29]</sup>.本研究结果也表明,CDOM 和 FDOM 均与 DOC 呈显著正相关( $P < 0.05$ )(图 2).

表 1  $a(355)$ 、 $F_n(355)$ 、DOC、 $a_g^*(355)$  范围及均值描述统计

| 样点 | $a(355)/m^{-1}$ |             | $F_n(355)$    |               | DOC/mg·L <sup>-1</sup> |             | $a_g^*(355)/L·(mg·m)^{-1}$ |             |
|----|-----------------|-------------|---------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|    | 范围              | 均值          | 范围            | 均值            | 范围                     | 均值          | 范围                         | 均值          |
| 樟溪 | 0.00 ~ 1.52     | 0.82 ± 0.55 | 5.76 ~ 31.17  | 18.22 ± 6.44  | 0.84 ~ 3.53            | 1.92 ± 0.65 | 0.00 ~ 1.18                | 0.43 ± 0.33 |
| 芦江 | 0.99 ~ 3.66     | 2.16 ± 0.82 | 13.57 ~ 58.76 | 41.02 ± 16.83 | 0.83 ~ 3.45            | 2.27 ± 0.86 | 0.54 ~ 1.61                | 1.02 ± 0.36 |

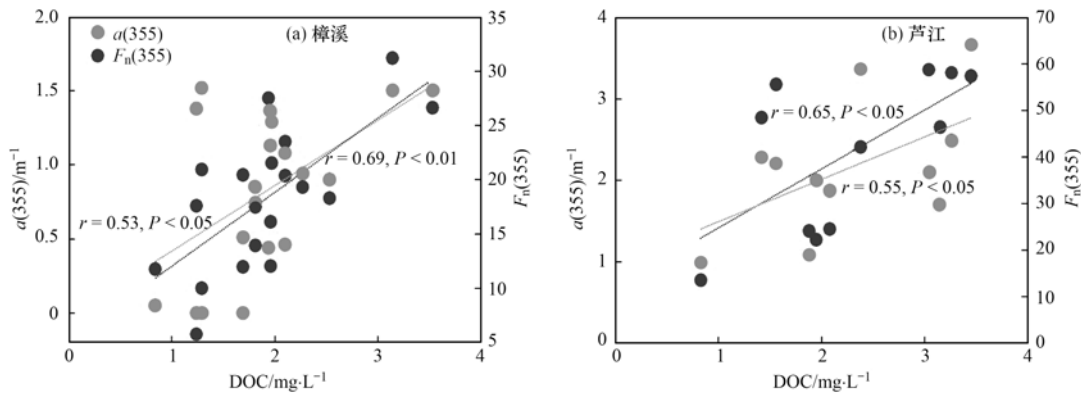


图 2 CDOM、FDOM 与 DOC 的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between CDOM, FDOM, and DOC

2.2 城郊流域与城镇流域 DOM 的 SUVA 值

通过 DOM 的吸收光谱特性可了解 DOM 的性质和结构特征. SUVA<sub>254</sub> 为 254 nm 处 UV 的吸收系数与 DOC 浓度之比, 可表示 DOM 的芳香性, 该值越大, 表明芳香化程度越高<sup>[30]</sup>. SUVA<sub>260</sub> 为 260 nm 处 UV 的吸光系数与 DOC 浓

度之比, 用来表示 DOM 中疏水性组分的含量, SUVA<sub>260</sub> 的值越大, 表明 DOM 疏水组分所占比例越高<sup>[31]</sup>. 城镇流域(芦江)的 SUVA<sub>254</sub> 和 SUVA<sub>260</sub> 均显著高于城郊流域的樟溪( $P < 0.05$ , 表 2), 表明芦江水体中 DOM 的芳香化程度和 DOM 的疏水组分比例远高于樟溪.

表 2 SUVA<sub>254</sub> 和 SUVA<sub>260</sub> 范围及均值描述统计

Table 2 Descriptive statistics for range and average concentrations of SUVA<sub>254</sub> and SUVA<sub>260</sub>

| 样点 | SUVA <sub>254</sub> |             | SUVA <sub>260</sub> |             |
|----|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
|    | 范围                  | 均值          | 范围                  | 均值          |
| 樟溪 | 0.78 ~ 4.14         | 2.38 ± 0.83 | 0.71 ~ 3.98         | 2.22 ± 0.77 |
| 芦江 | 3.94 ~ 10.59        | 5.65 ± 1.83 | 3.38 ~ 8.23         | 4.69 ± 1.32 |

如图 3 所示, 芦江与樟溪水体 DOM 的 SUVA<sub>254</sub> 与 SUVA<sub>260</sub> 都呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 表明水体的芳香性结构与疏水性组分所占比例关系密切, 即芳香性结构均主要存在于疏水性组分当中, 此结

果与江韬等人的研究结果相似<sup>[9]</sup>. 本研究发现, 人类活动越频繁, 流域水体中的 SUVA 值越高, 水体 DOM 的芳香化程度和 DOM 的疏水性组分比例越高.

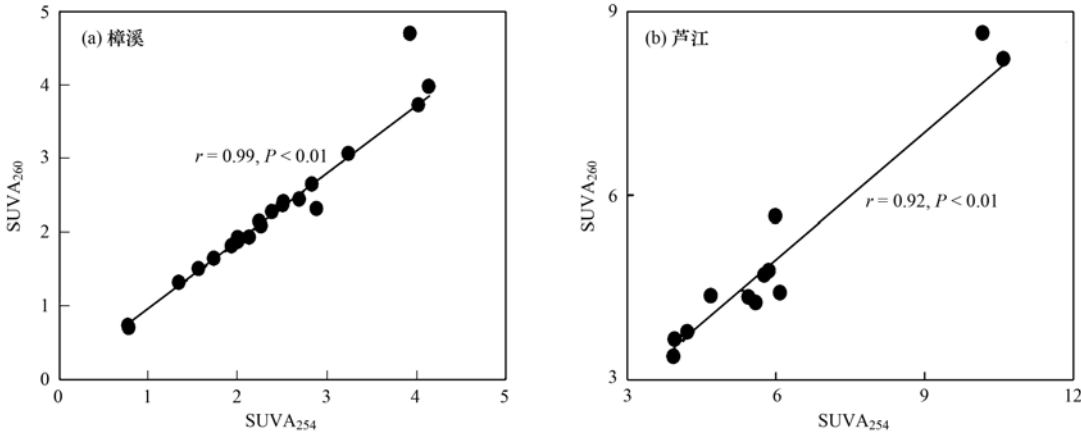


图 3 SUVA<sub>260</sub> 与 SUVA<sub>254</sub> 的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between SUVA<sub>260</sub> and SUVA<sub>254</sub>

2.3 DOM 的荧光特性

2.3.1 荧光峰

樟溪与芦江各采样点 DOM 的三维荧光光谱图类似, 主要为 4 个峰. 在两条河流中各选择一个有代表性的样点绘制三维荧光光谱图, 如图 4 所示. 其中, 荧光峰 A ( $E_x/E_m = 220 \sim 250/380 \sim 480$  nm) 为紫外光区类富里酸荧光峰, 荧光峰 C ( $E_x/E_m = 260 \sim 360/380 \sim 480$  nm) 为可见光区类富里酸荧光峰, 荧光峰 A 和 C 共同组成类腐殖质组分; 荧光峰 B ( $E_x/E_m = 220 \sim 240/300 \sim 380$  nm) 为类酪氨酸荧光峰, 荧光峰 T ( $E_x/E_m = 260 \sim 290/310 \sim 360$  nm) 为类色氨酸荧光峰, 荧光峰 B 和 T 为类蛋白质组分<sup>[32, 33]</sup>. 类腐殖质组分主要来自于陆源输入的腐殖类物质, 类蛋白组分主要是由浮游植物和微生物的作用所产生, 但也会受到外源生活污水排放和农

业用水的影响<sup>[34]</sup>. 芦江水体 DOM 中类蛋白质 (Peak B 和 Peak T) 的荧光强度大于樟溪, 表明芦江水体中类蛋白质含量较高, 可能与快速的城镇化发展导致生活污水和农业用水排放量增加有关, 此外随着大量氮、磷等营养物质排放到水体中, 促使微生物和浮游植物代谢活跃, 有助于产生类蛋白质.

2.3.2 荧光参数

荧光指数 (FI) 是指在激发光谱为 370 nm 时, 470 nm 处发射光谱的荧光强度与 520 nm 处发射光谱的荧光强度的比值, 已被广泛地用来区分 DOM 的主要来源, 例如: 主要由微生物或藻类活动所产生的内源性 DOM ( $FI > 1.9$ ) 和以陆源输入为主的外源性 DOM ( $FI < 1.4$ )<sup>[35, 36]</sup>. 结果显示, 樟溪的 FI 值为 1.42 ~ 1.99 (均值  $1.68 \pm 0.13$ ), 芦江的 FI 值

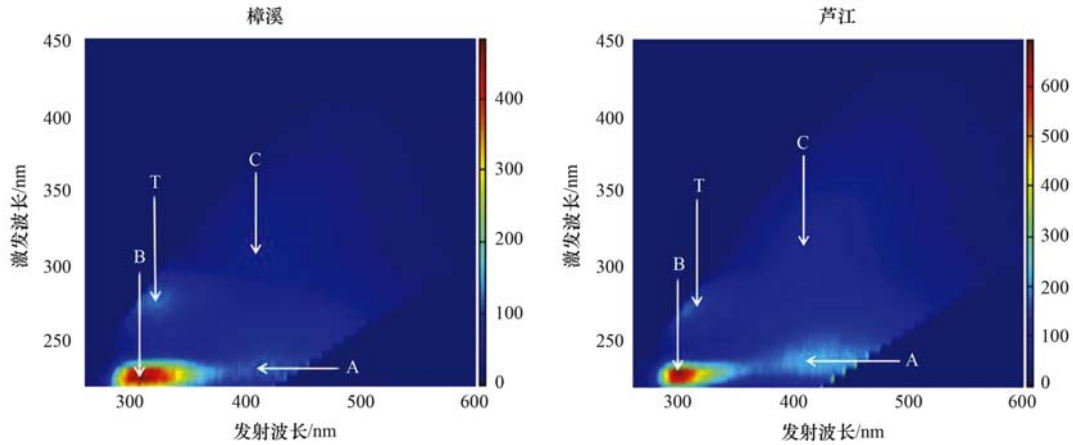


图 4 不同类型水体 DOM 的典型荧光光谱

Fig. 4 Typical fluorescence spectra of DOM in different types of water

为 1.62 ~ 1.88 (均值  $1.75 \pm 0.07$ )，两条河流无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。其中，樟溪有一个样点的 FI 值大于 1.9，表明这个样点的 DOM 来源主要为微生物或藻类活动所产生的内源性 DOM，此样点周围有一所学校且农业用地居多，频繁的人类活动可能导致水体 DOM 类蛋白组分的增加，从而水体中的 DOM 大多以内源性 DOM 为主<sup>[31]</sup>；其余样点的 FI 值都在 1.4 ~ 1.9 之间，表明这些样点的 DOM 来源组成是混合型的，既包含内源性 DOM，也包含以陆源输入为主的外源性 DOM[图 5(a)]。而芦江所有样点的 FI 值全都在 1.4 ~ 1.9 之间，表明芦江 DOM 的来源组成全部是混合型的[图 5(a)]。由于芦江所有样点的 DOM 来源均是内、外源混合型，所有样点的 FI 值分布较为集中且均值高于樟溪，这可能与人类的频繁活动有关。而属于城郊流域的樟溪，DOM 来源组成呈现出两种不同的类型，并且样点的 FI 值分布比较分散，波动较大，这可能与个别样点受人类活动影响较大有关。

腐殖化指数 (HIX) 是指在激发光谱为 255 nm

时，435 ~ 480 nm 发射光谱值的和与 300 ~ 345 nm 发射光谱值的和的比值<sup>[37]</sup>。结果表明，樟溪的 HIX 值范围为 0.35 ~ 2.66 (均值  $1.49 \pm 0.50$ )，芦江的 HIX 值为 1.15 ~ 2.16 (均值  $1.80 \pm 0.30$ )，两条河流的 HIX 值差异不显著 ( $P > 0.05$ )。HIX 值通常用来表征 DOM 的腐殖化程度，HIX 值越高表明腐殖化程度越高，DOM 较稳定<sup>[37]</sup>。本研究结果显示，芦江与樟溪水体的 HIX 值均小于 3 [图 5(b)]，表明两条河流的腐殖化程度相对较低，DOM 较不稳定。但芦江水体 HIX 均值高于樟溪，样点间数值分布比较集中且波动较小，表明芦江水体中 DOM 具有更强的腐殖化和芳香性特征。

自生源指数 (BIX) 是指在激发光谱为 310 nm 时，380 nm 处发射光谱的荧光强度与 430 nm 处发射光谱的荧光强度的比值，是反映水体 DOM 自生来源相对贡献的指示者<sup>[38]</sup>。当  $BIX < 0.8$  时，DOM 中自生组分贡献较少，而  $BIX > 0.8$  则表示 DOM 中存在较多的自生来源组分<sup>[36]</sup>。樟溪与芦江 BIX 值的范围分别为 0.73 ~ 0.91 和 0.76 ~ 1.05，均值分别

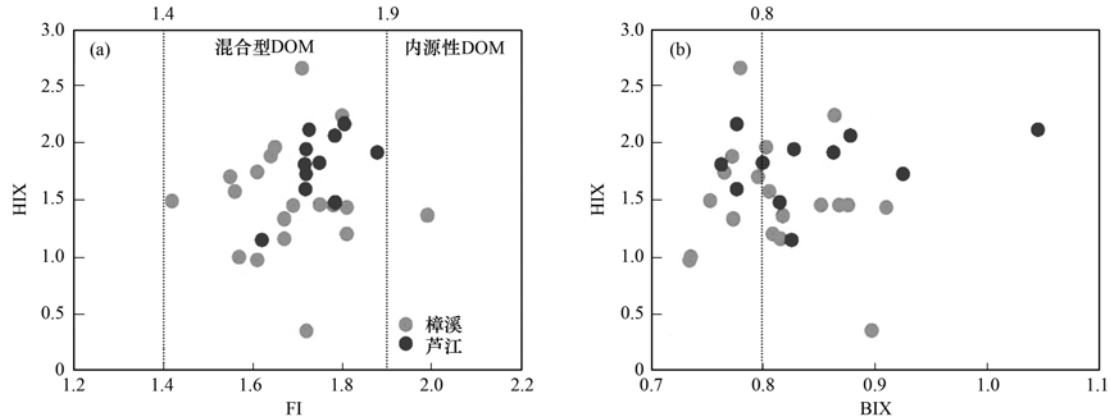


图 5 水体 DOM 的 FI-HIX 和 BIX-HIX 分布

Fig. 5 Distribution of FI-HIX and BIX-HIX values of the water DOM in Zhangxi River and Lujiang River

为  $0.81 \pm 0.05$  和  $0.85 \pm 0.08$ , 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 樟溪 52.6% 的样点的 BIX 值大于 0.8, 而芦江 63.6% 的样点 BIX 值高于 0.8 [图 5(b)].

#### 2.4 城郊流域与城镇流域的重金属丰度

图 6 为 2 个流域重金属浓度统计分布图, 结果表明, 城镇河流(芦江)水体中 As、Cu 和 Mn 的浓度显著高于城郊河流(樟溪) ( $P < 0.05$ ). 其中, 芦江水体 As 浓度均值是樟溪的 1.4 倍, 而 Cu 和 Mn 浓度均值分别为樟溪的 2.8 倍和 2.7 倍. 城镇河流(芦江)水体中 Zn 和 Pb 浓度均值分别为  $(4.01 \pm 4.93) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.12 \pm 0.10) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 均略高于城郊河流(樟溪). 而 Cr 是个例外, 虽然樟溪水体中 Cr 含量显著高于城镇河流(芦江) ( $P < 0.05$ ), 但二者的浓度均低于  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (国家地表水 I

类标准), 表明 2 个流域中 Cr 污染较轻, 城郊河流 Cr 浓度高于城镇河流, 可能与其背景值有关(而城镇河流中尚无 Cr 污染源). 研究表明, 城市化区域的人为活动可以显著增加水体中重金属浓度<sup>[16]</sup>. 本研究结果也发现城镇化程度高的芦江流域水体中显示出较高的重金属浓度.

#### 2.5 DOM 与重金属含量的相关性分析

DOC、SUVA<sub>254</sub>、CDOM、FDOM、FI、HIX 和 BIX 与重金属元素 As、Cu、Zn、Pb、Mn 和 Cr 之间的相关性分析结果表明, 樟溪水体中 Mn 与 DOC、CDOM、FDOM、FI 和 BIX 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); Cu 和 Zn 均与 DOC 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 并且 Cu 还与 FDOM 呈显著正相关; Pb 只与 FDOM 呈显著负相关, 而元素 As 和 Cr 与 DOM

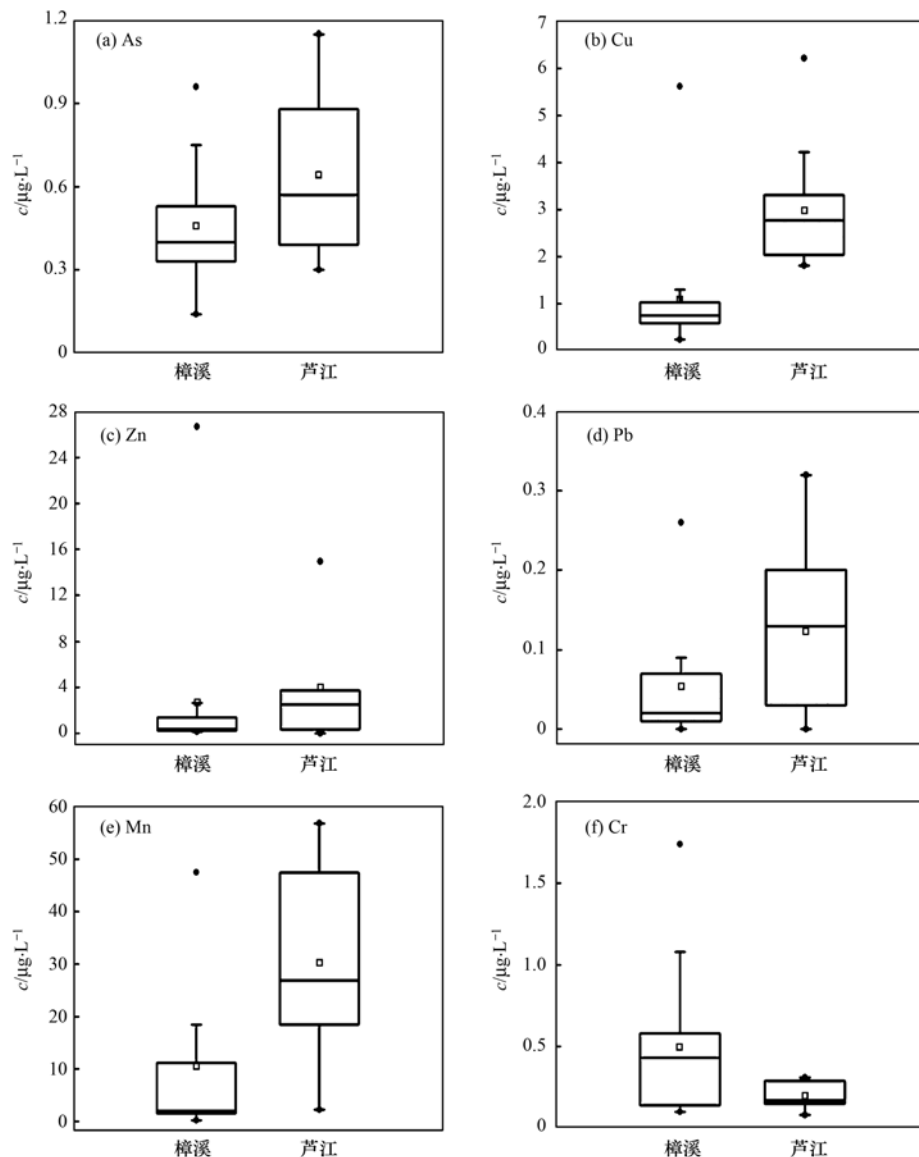


图 6 樟溪和芦江的 As、Cu、Zn、Pb、Mn 和 Cr 浓度值分布

Fig. 6 Distribution of As, Cu, Zn, Pb, Mn, and Cr concentration values in Zhangxi River and Lujiang River

的这些参数均无显著相关性(表 3)。研究发现,朝鲜半岛西南部的 Hwangryong River 水体中 DOM 与 Mn 之间存在正相关关系<sup>[39]</sup>,本研究结果与其类似,樟溪河流 DOM 与元素 Mn 也具有强烈的正相关关系。此外,本研究的樟溪水体中 DOM 与 Cu 和 Zn 也呈显著正相关。

表 3 樟溪 DOM 各项参数与重金属元素的相关性分析<sup>1)</sup>

|                            | As     | Cu       | Zn       | Pb       | Mn       | Cr    |
|----------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|-------|
| DOC                        | 0.002  | 0.684 ** | 0.594 ** | -0.269   | 0.743 ** | 0.138 |
| SUVA <sub>254</sub>        | 0.345  | -0.196   | -0.254   | -0.232   | 0.020    | 0.187 |
| <i>a</i> (355)             | -0.075 | 0.356    | 0.258    | -0.380   | 0.558 ** | 0.336 |
| <i>F<sub>n</sub></i> (355) | 0.374  | 0.398 *  | 0.288    | -0.395 * | 0.728 ** | 0.060 |
| FI                         | 0.322  | 0.229    | 0.196    | -0.223   | 0.464 *  | 0.057 |
| HIX                        | -0.048 | 0.002    | -0.029   | -0.042   | -0.133   | 0.340 |
| BIX                        | -0.088 | 0.331    | 0.308    | -0.251   | 0.450 *  | 0.180 |

1) \* 表示在 0.05 水平(单侧)上显著相关; \* \* 表示在 0.01 水平(单侧)上极显著相关,下同

城镇河流(芦江)的 DOM 与重金属的相关性分析结果见表 4,芦江水体 DOM 与重金属元素 Cu、Mn 和 Cr 之间呈显著正相关( $P < 0.05$ ),而元素 As、Zn 和 Pb 只与一、两种 DOM 参数之间存在相关性,表明芦江水体中 DOM 对 As、Zn 和 Pb 的影响较小。有研究表明,人类活动所产生

的大量生活污水以及工农业废水排放到水体中,会影响 DOM 与重金属元素之间的关系<sup>[22, 39]</sup>。本研究发现,城镇河流(芦江)受人类活动影响频繁,水体中的 DOM 与每种重金属元素之间均存在显著相关性,并且与 Mn、Cu 和 Zn 的相关性系数明显高于樟溪。

表 4 芦江 DOM 各项参数与重金属元素的相关性分析

|                            | As       | Cu       | Zn       | Pb      | Mn       | Cr       |
|----------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| DOC                        | 0.754 ** | 0.703 ** | 0.457    | 0.114   | 0.809 ** | 0.728 ** |
| SUVA <sub>254</sub>        | 0.107    | -0.163   | -0.342   | 0.074   | -0.073   | -0.316   |
| <i>a</i> (355)             | 0.467    | 0.752 ** | 0.877 ** | 0.577 * | 0.638 *  | 0.578 *  |
| <i>F<sub>n</sub></i> (355) | 0.879 ** | 0.676 *  | 0.394    | 0.432   | 0.879 ** | 0.471    |
| FI                         | 0.440    | 0.738 ** | 0.624 *  | 0.455   | 0.644 *  | 0.710 ** |
| HIX                        | 0.492    | 0.429    | 0.283    | 0.493   | 0.617 *  | 0.190    |
| BIX                        | 0.250    | 0.053    | -0.049   | 0.292   | 0.290    | 0.196    |

3 结论

(1)城镇化程度显著影响流域水体 DOM 浓度和性质,城镇流域(芦江)水体的 CDOM 和 FDOM 相对浓度显著高于城郊流域(樟溪)。

(2)三维荧光光谱分析 CDOM 的组分结果表明,樟溪和芦江水体中 CDOM 的主要成分为类富里酸物质、类酪氨酸物质、类色氨酸物质,城镇化程度高的流域水体呈现出较高的类蛋白组分含量。

(3)CDOM 的各项荧光参数结果表明,城镇化程度较高的流域水体中 CDOM 显示出较高的腐殖化程度与芳香性度。

(4)城镇化程度显著影响水体中重金属浓度,受人类活动影响越频繁,城镇化程度更高的水体(芦江)中重金属的浓度也越高。

(5)DOM 各项参数与重金属的相关性分析显

示,城镇化程度越高的河流,CDOM 与重金属之间的联系越密切。

参考文献:

[ 1 ] Park J H, Kalbitz K, Matzner E, *et al.* Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(6): 813-822.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] Borisover M, Laor Y, Parparov A, *et al.* Spatial and seasonal patterns of fluorescent organic matter in Lake Kinneret ( Sea of Galilee ) and its catchment basin[J]. *Water Research*, 2009, **43**(12): 3104-3116.

[ 4 ] Vazquez E, Amalfitano S, Fazi S, *et al.* Dissolved organic matter composition in a fragmented Mediterranean fluvial system under severe drought conditions[J]. *Biogeochemistry*, 2011, **102**(1-3): 59-72.

[ 5 ] Prasad M, Xu H Y, Saxena S. Multi-component sorption of Pb

- (II), Cu(II) and Zn(II) onto low-cost mineral adsorbent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 221-229.
- [6] Ferrand E, Dumat C, Leclerc-Cessac E, *et al.* Phytoavailability of zirconium in relation to its initial added form and soil characteristics[J]. *Plant and Soil*, 2006, **287**(1-2): 313-325.
- [7] Baken S, Degryse F, Verheyen L, *et al.* Metal complexation properties of freshwater dissolved organic matter are explained by its aromaticity and by anthropogenic ligands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2584-2590.
- [8] Kikuchi T, Fujii M, Terao K, *et al.* Correlations between aromaticity of dissolved organic matter and trace metal concentrations in natural and effluent waters: a case study in the Sagami River Basin, Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **576**: 36-45.
- [9] Jiang T, Skjellberg U, Björn E, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter (DOM) and relationship with dissolved mercury in Xiaoqing River-Laizhou Bay estuary, Bohai Sea, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 19-30.
- [10] 王桂新. 城市化基本理论与中国城市化的问题及对策[J]. *人口研究*, 2013, **37**(6): 43-51.  
Wang G X. The basic theory of urbanization and problems and countermeasures of China's urbanization [J]. *Population Research*, 2013, **37**(6): 43-51.
- [11] 杨旭, 袁崇法, 白南凤, 等. 第一部分2013中国城市发展报告(中文版) [R]. 中国城市科学发展综合评价报告, 2013.
- [12] Cilliers S S, Bredenkamp G J. Vegetation of road verges on an urbanisation gradient in Potchefstroom, South Africa [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2000, **46**(4): 217-239.
- [13] 李贞, 刘静艳, 张宝春, 等. 广州市城郊景观的生态演化分析[J]. *应用生态学报*, 1997, **8**(6): 633-638.  
Li Z, Liu J Y, Zhang B C, *et al.* Ecoevolutionary analysis of Guangzhou suburban landscape[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(6): 633-638.
- [14] Wang Y Q, Moskovits D K. Tracking fragmentation of natural communities and changes in land cover: applications of Landsat data for conservation in an urban landscape (Chicago Wilderness) [J]. *Conservation Biology*, 2001, **15**(4): 835-843.
- [15] 于会彬, 高红杰, 宋永会, 等. 城镇化河流 DOM 组成结构及与水质相关性研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 435-441.  
Yu H B, Gao H J, Song Y H, *et al.* Study on composition structure of DOM and its correlation with water quality in an urbanized river [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 435-441.
- [16] Yu S, Wu Q, Li Q L, *et al.* Anthropogenic land uses elevate metal levels in stream water in an urbanizing watershed [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **488-489**: 61-69.
- [17] 宁波市鄞州区地方志办公室. 鄞州年鉴. 2016[M]. 北京: 方志出版社, 2016.
- [18] 宁波市北仑区统计局. 2016 北仑统计年鉴 [EB/OL]. [http://blxxgk.bl.gov.cn/xxgk/jcms\\_files/jcms1/web38/site/art/2017/10/18/art\\_6610\\_89288.html](http://blxxgk.bl.gov.cn/xxgk/jcms_files/jcms1/web38/site/art/2017/10/18/art_6610_89288.html), 2017-10-18.
- [19] 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 等. 城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1560-1567.
- Cao C L, Liang M Q, He G Y, *et al.* Fluorescent dissolved organic matter and its correlation with water quality in a urban river: A case study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1560-1567.
- [20] Murphy K R, Hambly A, Singh S, *et al.* Organic matter fluorescence in municipal water recycling schemes: toward a unified PARAFAC model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2909-2916.
- [21] 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.
- [22] 闫丽红, 陈学君, 苏荣国, 等. 2010 年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 51-59.  
Yan L H, Chen X J, Su R G, *et al.* Resolving characteristic of CDOM by Excitation-Emission matrix spectroscopy combined with parallel factor analysis in the seawater of Outer Yangtze Estuary in autumn in 2010 [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 51-59.
- [23] Del Vecchio R, Blough N V. Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter in natural waters: kinetics and modeling [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **78**(4): 231-253.
- [24] Vignudelli S, Santinelli C, Murru E, *et al.* Distributions of dissolved organic carbon (DOC) and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in coastal waters of the northern Tyrrhenian Sea (Italy) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, **60**(1): 133-149.
- [25] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 933-941.  
Li L L, Jiang T, Yan J L, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir Areas [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 933-941.
- [26] 李璐璐, 江韬, 卢松, 等. 利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质 (DOM) 浓度[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3408-3416.  
Li L L, Jiang T, Lu S, *et al.* Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) absorption spectrum to Estimate the dissolved organic matter (DOM) concentration in water, soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir Areas [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3408-3416.
- [27] Spencer R G M, Butler K D, Aiken G R. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117**(G3): G03001.
- [28] Kowalczyk P, Zabłocka M, Sagan S, *et al.* Fluorescence measured in situ as a proxy of CDOM absorption and DOC concentration in the Baltic Sea [J]. *Oceanologia*, 2010, **52**(3): 431-471.
- [29] Yang L Y, Hong H S, Chen C T A, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter in the estuaries of populated and mountainous Taiwan [J]. *Marine Chemistry*, 2013, **157**: 12-23.
- [30] Chin Y P, Aiken G, O'Loughlin E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic

- substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, **28** (11): 1853-1858.
- [31] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 等. 三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 879-887.
- Wang Q L, Jiang T, Zhao Z, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) in typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir region[J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (3): 879-887.
- [32] 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.
- [33] 田雨, 王学东, 陈潇霖, 等. 土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2338-2344.
- Tian Y, Wang X D, Chen X L, *et al.* Fluorescence spectroscopic characteristics and  $\text{Cu}^{2+}$ -complexing ability of soil dissolved organic matter[J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (6): 2338-2344.
- [34] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2015, **36** (1): 151-162.
- Gao J, Jiang T, Li L L, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir region[J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (1): 151-162.
- [35] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.
- [36] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [37] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.
- [38] Wilson H F, Xenopoulos M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(1): 37-41.
- [39] Park J H. Spectroscopic characterization of dissolved organic matter and its interactions with metals in surface waters using size exclusion chromatography [J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(4): 485-494.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                  |                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Estimation of Fine Particle ( $PM_{2.5}$ ) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai                                                              | WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)    |
| Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China                         | GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)        |
| Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing                                         | GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)                             |
| Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method      | ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)             |
| HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China                                                                           | TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)        |
| Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes                                                    | HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)                 |
| Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale                                                           | FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)                        |
| Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers                                                              | LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)            |
| Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales                                                                             | PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)                    |
| Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR                                                             | JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)         |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake                                                           | GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)      |
| Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China                                                    | LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)             |
| Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary                                                                          | ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)           |
| Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China                                             | LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)         |
| Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau                        | MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)       |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River                                | LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)     |
| Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors                                     | ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)      |
| Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir                                                  | ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)             |
| Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin                             | WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)           |
| Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR                                            | SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)            |
| Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water                                                     | YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)           |
| Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir                                           | WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)          |
| Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams                                                                                | YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)           |
| Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch                                                                               | LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)              |
| Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions             | XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)           |
| Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate                                                                                                       | SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)                 |
| Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid                                                                             | XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)           |
| Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars                                                                                  | LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)                    |
| Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior     | LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)                              |
| Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant                                                                   | SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)       |
| Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater                                                                                            | LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)                     |
| Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater                                              | TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)        |
| Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR                                                    | FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)             |
| Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes                                                                                             | GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)    |
| Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants                                                                     | WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)        |
| Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge                                                            | DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)             |
| Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules                                                | LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)           |
| Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China                                                                                    | WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)               |
| Characteristics of $N_2O$ Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer                                         | ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)         |
| Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu                                                | JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)                |
| Dynamics of $CO_2$ and $N_2O$ in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia                                                            | LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)                     |
| Characteristics of $CO_2$ Flux in a Mature Apple ( <i>Malus domestica</i> ) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau                                               | YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)     |
| Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil                                                                        | QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)                  |
| Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil                                                   | LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)                     |
| Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing                   | ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)             |
| Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater                                                              | LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)          |
| Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing                                          | LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)        |
| Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology                                 | ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)           |
| Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil                                                       | YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)     |
| Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings                                                                  | FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)              |
| Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments                                                | KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431) |
| Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification | ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)      |
| Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi                                                      | ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)          |
| Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir                                     | CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)            |
| Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues ( <i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages           | WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)                      |
| Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area                                            | LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)                   |
| Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain                                        | XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)                     |
| Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice                                                      | SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)       |
| Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis                                       | DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)   |