

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

**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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM<sub>2.5</sub>影响 ..... 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化定量模拟 ..... 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 ..... 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM<sub>2.5</sub>中无机离子垂直分布特征 ..... 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)成分图谱 ..... 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM<sub>2.5</sub>成分谱特征 ..... 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 ..... 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 ..... 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 ..... 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 ..... 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 ..... 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 ..... 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 ..... 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

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 ..... 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 ..... 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH<sub>4</sub>浓度及其通量变化特征初探 ..... 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 ..... 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 ..... 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 ..... 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 ..... 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 ..... 李力, 朱耕, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

萘普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 ..... 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 ..... 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 ..... 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 ..... 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 ..... 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 ..... 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 ..... 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A<sup>2</sup>/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 ..... 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 ..... 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 ..... 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 ..... 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭氧原位减量工艺中抗生素的去除 ..... 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 ..... 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛昱, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 ..... 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 ..... 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 ..... 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 ..... 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 ..... 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 ..... 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 ..... 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 ..... 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 ..... 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 ..... 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 ..... 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 ..... 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 ..... 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 ..... 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 ..... 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 ..... 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 ..... 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 ..... 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 ..... 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 ..... 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 ..... 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 ..... 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO<sub>2</sub>释放的影响 ..... 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

# 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

曹昌丽<sup>1,2</sup>, 梁梦琦<sup>2,3</sup>, 何桂英<sup>4</sup>, 纵亚男<sup>2,3</sup>, 唐剑锋<sup>1,2\*</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 宁波 315830; 3. 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000; 4. 宁波市北仑区环境保护局, 宁波 315800)

**摘要:** 以宁波市北仑区芦江为例, 利用三维荧光技术分析城镇化河流水体荧光溶解性有机物(FDOM)组成结构及其空间分布特征, 研究 FDOM 与河流水质的相关性. 结果表明, FDOM 由类酪氨酸、类色氨酸、类溶解性微生物副产品、类富里酸物质组成, 以类蛋白组分为主要成分, 占总荧光强度的比例高达 83.8%, 而类腐殖物质的含量较少. 各组分荧光强度与氮、磷、金属含量呈显著正相关, 表明 FDOM 与氮、磷等元素的迁移转化有关; FDOM 呈现明显的空间分布格局, 上游水体 FDOM 含量较低受人类活动影响较小, 下游 FDOM 含量较高呈现城镇河段排放分布特征; 表明人类活动对河流水质及 FDOM 含量和组成均产生重要影响.

**关键词:** 溶解性有机质; 三维荧光; 荧光区域积分法; 水质; 城镇化河流

中图分类号: X131.2; X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1560-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707147

## Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo

CAO Chang-li<sup>1,2</sup>, LIANG Meng-qi<sup>2,3</sup>, HE Gui-ying<sup>4</sup>, ZONG Ya-nan<sup>2,3</sup>, TANG Jian-feng<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Ningbo Urban Environment Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315830, China; 3. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 4. Environmental Protection Agency of Beilun, Ningbo 315800, China)

**Abstract:** Excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy combined with fluorescence regional integration (FRI) analysis were adopted to analyze the water samples collected from the Lujiang River, which flows through the rapidly urbanizing areas of Beilun, Ningbo, in order to illuminate the composition and characteristics of the spatial distribution of fluorescent dissolved organic matter (FDOM), and further to explain its correlation with water quality in the urban river. The results showed that FDOM was composed of tyrosine-like, tryptophan-like, soluble microbial by-product-like, fulvic-like, and humic-like materials, and FDOM was dominated by protein-like components, accounting for 83.8% of the total fluorescence intensity, while humic-like components accounted for much less. The concentrations of the water quality parameters, such as total nitrogen, total phosphorus, and metals, were linearly correlated with the total fluorescence intensity of all components, indicating that FDOM was significantly related to the removal and transformation of nitrogen and phosphorus. The distribution of FDOM in different areas has the following characteristics: FDOM was low and not distinctly influenced by human activities in the upstream, while in the downstream, FDOM was high and showed the characteristics typical of that in urbanized rivers. Therefore, anthropogenic activities can greatly influence river water quality and the concentration and composition of FDOM.

**Key words:** dissolved organic matter; excitation-emission matrix fluorescence; fluorescence regional integration (FRI); water quality; urban river

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是一类具有复杂组成、结构和环境行为的有机混合物,普遍存在于湖泊、河流等自然水体中,主要是由含氧、氮和硫的氨基酸、脂肪族、芳香族等功能团组成的异质碳氢化合物<sup>[1]</sup>. DOM 是连接生命形态碳和无机碳的关键纽带,参与水生态各种生物地球化学过程,对水生态系统结构和功能具有重要影响. DOM 因水环境不同而产生的形态差异会与污染物发生不同类型的相互作用,从而影响污染物的

溶解、吸附解吸、毒性以及迁移转化特性<sup>[2,3]</sup>. 而且,在水生态系统中,DOM 不仅影响营养物的保持与释放、生物有效性,还被用来表征水质特征<sup>[4]</sup>. 在城镇化程度较高的河流中,人类活动如污水排

收稿日期: 2017-07-18; 修订日期: 2017-09-28

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

作者简介: 曹昌丽(1989~),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为水污染治理技术, E-mail: clcao@iue.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: jftang@iue.ac.cn

放<sup>[5]</sup>, 土地覆盖和景观格局的改变<sup>[6]</sup>等均会引起河流水体 DOM 含量和性质的改变. 由于 DOM 对水体的水质和富营养化等有显著影响, 因此一直受到广泛关注, 尤其是对 DOM 的结构、来源和辨析成为环境科学研究的重点.

荧光溶解性有机物 (fluorescent dissolved organic matter, FDOM) 是 DOM 中吸收光能并且发射荧光的物质, 是 DOM 的重要组成部分. 不同类别的类腐殖质和类蛋白质反映为不同的荧光组分, 对荧光组分进行解析即可实现 DOM 的辨别与表征. 目前对国内外研究 FDOM 的技术方法较多, 其中三维荧光光谱以其操作简便, 选择性好、所需样品量少且不破坏样品结构等优点, 被广泛应用<sup>[7, 8]</sup>.

三维荧光光谱广泛应用于水体中 FDOM 的表征, 包括组成、性质、来源和迁移转化, 以解释 FDOM 在水环境中的动力学特征<sup>[9~11]</sup>. 早期研究人员依据荧光特征峰解析 FDOM 组成结构, 例如类蛋白质峰、类腐殖质峰, 以及峰值的比值来判断水体污染程度<sup>[12, 13]</sup>. 但由于环境样品成分复杂, 导致不同物质的荧光响应值叠加, 单凭荧光特征峰也难以解析 FDOM 的组成和浓度<sup>[14]</sup>. 荧光区域积分法 (fluorescence regional integration, FRI) 是一种利用全区域荧光值对 FDOM 进行定量研究的方法, 在一定程度上克服了峰值法的不足, 近年来已用于湖泊、河流等水体三维荧光光谱的解析<sup>[1, 15]</sup>.

在过去的 30 年中, 我国城市化和工业化进程明显加快, 城市化率由 1980 年的 19.4% 增加到 2012 年的 52.5%<sup>[16]</sup>. 快速的城市化扩张和追求 GDP 的冲动特别是粗放型经济发展方式使得我国许多地区面临严重的水质污染<sup>[17~19]</sup>. 河流水质的污染直接影响到水体 FDOM 的含量和性质, 而现有的研究主要集中在河流水质或 FDOM 性质的表征上, 对城镇河流 FDOM 荧光特性与水质之间关系还不清楚. 因此, 本研究选取长三角快速城镇化典型城市近郊小流域——宁波市北仑区柴桥镇芦江水系为研究区域, 应用三维荧光光谱技术手段, 分析城镇化河流的 FDOM 组成结构特征, 揭示 FDOM 的空间分布规律, 阐述 FDOM 与水质指标的相关性, 以为城镇化河流水质提升和 FDOM 的环境行为提供理论支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 区域概况

芦江水系位于浙江省宁波市北仑区柴桥镇, 主

河道总长约 9 km, 是柴桥镇境内最重要的排水河道. 水系内河网密布, 交汇较多, 以南北流向的芦江大河为主河道, 共计 4 条支流汇入, 由上游至下游分别为里隘河、洪溪河、柴桥河、东直河, 具体分布见图 1. 水系污染源分为两类, 上游以面源污染为主, 包括农业化肥施用、畜禽养殖污染等; 中游及下游以点源污染为主, 包括生活污染和工业污染.

### 1.2 样品采集

2016 年 12 月布置采样点如图 1 所示, 分别在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 个采样点. 其中 1、6、7 号为受人类活动影响较少的区域; 2、4、5 号主要接纳农业污水; 3、8、9 号汇入生活污水; 10、11 号汇入工业废水. 此外, 4 号位于芦江大河与里隘河交汇处, 汇集了 2、3 号两个采样点的来水; 8 号位于芦江大河与柴桥河交汇处, 以 5、6 号的来水及生活污水为主; 10 号位于芦江大河与东直河的交汇处, 以上游来水及工业废水为主.

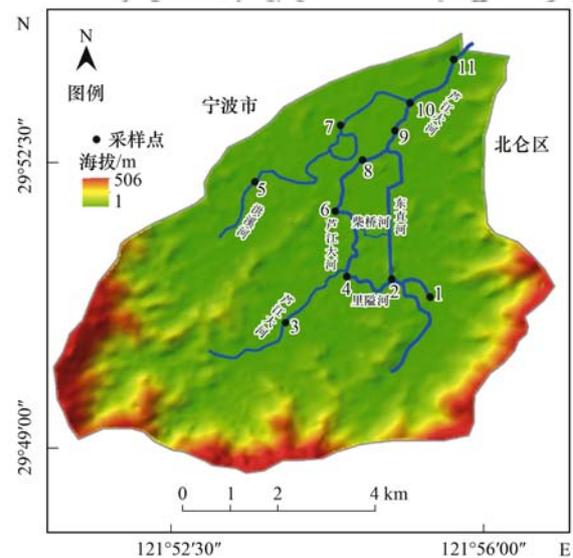


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

### 1.3 理化性质检测

现场采用多参数数字化分析仪 (美国哈希, HQ40D) 测定盐度、pH、温度、溶解氧等; 所有水样经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后, 参照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 进行其他物化指标的测量: 采用离子色谱法 (赛默飞, ICS-5000) 测定  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{PO}_4^-$ ; 采用钼酸铵分光光度法测定 TP; 采用 TOC 仪 (德国 Elementar, Vario TOC) 测定溶解性有机碳 (DOC) 及 TN; 采用流动分析仪 (德国 Seal,

AA3)测定氨氮;采用 ICP-OES(美国 PE, Optima 8300)测定 Na、Ca;采用 ICP-MS(赛默飞, icap Q)测定 Be、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba、Pb 等的元素总量,本文以 3 种含量较高的重金属 Mn、As、Cr 作为代表进行讨论。

#### 1.4 荧光光谱检测

溶解性有机质的三维荧光光谱采用荧光分光光度计(日立 F-4600)测定,主要程序为:狭缝宽度设置为 5 nm,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 2400 nm·min<sup>-1</sup>;以 Milli-Q 超纯水为实验空白。

#### 1.5 荧光区域积分方法

所有水样的三维荧光光谱在解析之前,减去空白光谱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,以修正拉曼散射、瑞利散射对光谱的影响,再采用荧光区域积分法(FRI)对光谱进行定量分析<sup>[1]</sup>。将光谱划分为 5 个区域,其中  $E_x/E_m = 220 \sim 250/260 \sim 320$  nm 为区域 I;  $E_x/E_m = 220 \sim 250/320 \sim 380$  nm 为区域 II;  $E_x/E_m = 220 \sim 300/>380$  nm 为区域 III;  $E_x/E_m = 250 \sim 450/280 \sim 380$  nm 为区域 IV;  $E_x/E_m = 300 \sim 450/>380$  nm 为区域 V,具体分布见文献[1]。利用 Origin 8.0 计算各荧光区域的积分体积  $\Phi_i$ ,即为各区域有机物的荧光强度和;对各区域的积分体积标准化,即为各区域积分标准体积  $\Phi_{i,n}$ ,代表各区域有机物的相对含量;各区域积分标准体积占总积分标准体积的比例即为  $P_{i,n}$ 。

#### 1.6 数据分析

利用 SPSS 22.0 对数据进行 K-S 检验、Pearson 相关系数计算及层状聚类分析。采用 Origin8.0 分析处理数据,采用 Matlab 进行三维荧光图谱绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 区域水质参数特征

芦江水系不同区域采样点各项水质参数见表 1。各采样点温度变化范围在 13.0~15.8℃之间;pH 平均值为 6.63,水样呈弱酸性。河水已存在轻度污染,主要污染物为氮、磷、有机物。其中  $\text{NH}_4^+$ -N 均低于 1.5 mg·L<sup>-1</sup>符合 IV 类地表水质标准;TN、TP 均值均超过 V 类标准;而在金属方面,As、Mn、Cr 含量均符合 I 类地表水质标准。从变异系数上看,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和 TOC 变异系数最大,TP、As、TN、 $\text{NH}_4^+$ -N 次之。

DOC、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP、As 浓度均呈现上游低下游高的趋势(图 2)。其中上游 1~5 号 DOC 均值为 1.63 mg·L<sup>-1</sup>,下游 8~11 号 DOC 均值为 3.22 mg·L<sup>-1</sup>,是上游均值的 2 倍;8、9 号主要排放源为生活污水,其  $\text{NH}_4^+$ -N、TN 浓度最高而 DO 最低,表明河水因生活污水的排入而引起溶氧水平降低;10、11 号主要排放源为工业废水,TP 和 As 达到峰值分别为 0.96 mg·L<sup>-1</sup>及 1.15 μg·L<sup>-1</sup>,是上游均值的 3.3 及 3.5 倍,表明工业废水的排入使得河水中磷、金属含量增加。上游 1~5 号排放源主要为农业污水,8~11 号排放源主要为生活及工业废水。综上所述上游与下游的水质参数差别,表明农业污水对河水水质无显著影响,人类活动产生的生活及工业废水引起了河水水质恶化。

表 1 水质指标的统计特征

Table 1 Summary statistics of the measured water-quality variables

项目	温度 /°C	pH	DO /mg·L <sup>-1</sup>	$\text{NH}_4^+$ -N /mg·L <sup>-1</sup>	$\text{NO}_2^-$ -N /mg·L <sup>-1</sup>	$\text{NO}_3^-$ -N /mg·L <sup>-1</sup>	TN /mg·L <sup>-1</sup>
平均值	13.8	6.63	7.92	0.41	0.06	3.12	3.48
最大值	13.0	7.05	11.41	1.22	0.21	3.75	5.23
最小值	15.8	6.33	4.90	0.02	0.00	2.52	1.79
标准差	0.81	0.22	1.85	0.45	0.07	0.39	1.13
变异系数	0.06	0.03	0.23	0.42	1.10	0.13	0.33
项目	TP /mg·L <sup>-1</sup>	DOC /mg·L <sup>-1</sup>	TOC /mg·L <sup>-1</sup>	As /μg·L <sup>-1</sup>	Mn /μg·L <sup>-1</sup>	Cr /μg·L <sup>-1</sup>	
平均值	0.51	2.27	8.18	0.64	30.1	0.20	
最大值	0.96	3.45	23.0	1.15	56.8	0.31	
最小值	0.27	0.83	2.83	0.30	0.25	0.08	
标准差	0.21	0.86	5.45	0.29	16.7	0.07	
变异系数	0.42	0.38	2.42	0.44	0.56	0.36	

河水 DOC 分别与  $\text{NH}_4^+$ -N( $r=0.81$ ,  $P<0.01$ )、TN( $r=0.88$ ,  $P<0.01$ )、TP( $r=0.72$ ,  $P<0.01$ )、

Mn( $r=0.81$ ,  $P<0.01$ )、As( $r=0.76$ ,  $P<0.01$ )呈显著正相关,与 DO( $r=-0.78$ ,  $P<0.01$ )呈显著

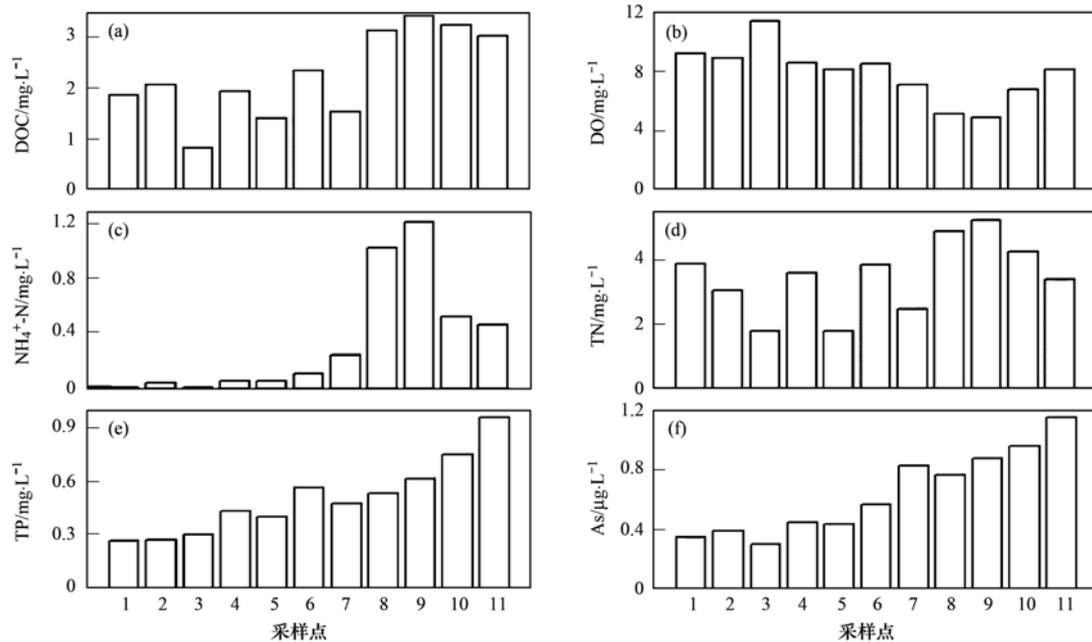


图2 各采样点水质参数

Fig. 2 Water quality parameters of the samples

负相关。一方面，由于 $\text{NH}_4^+$ -N、TP 是生活污水的典型成分，表明河水中的 DOC 主要来源于排入河流的生活污水<sup>[20]</sup>；另一方面，DOC 含量和金属密切相关，可能是由于 FDOM 与金属结合而影响了金属的迁移<sup>[21]</sup>。

## 2.2 不同采样区域点位荧光光谱特征

芦江水系各采样点的荧光光谱谱图类似，主要为 5 个峰，如图 3 所示。其中 Peak B ( $E_x/E_m = 220 \sim 235/280 \sim 320 \text{ nm}$ ) 为类酪氨酸物质；Peak T<sub>1</sub> ( $E_x/E_m = 220 \sim 235/320 \sim 360 \text{ nm}$ ) 为类色氨酸物质；Peak T<sub>2</sub> ( $E_x/E_m = 250 \sim 290/290 \sim 330 \text{ nm}$ ) 为微生物代谢产物；Peak A ( $E_x/E_m = 220 \sim 235/380 \sim 440 \text{ nm}$ ) 为紫外光区类富里酸物质；Peak C ( $E_x/E_m = 300 \sim 400/380 \sim 500 \text{ nm}$ ) 为可见光区类富里酸物质<sup>[22]</sup>。

水质污染状况可由类蛋白荧光强度来表征<sup>[23, 24]</sup>。由图 3 可见，芦江水系各样点由上游至下游，Peak B 强度呈不断增大的趋势，由 1 号的 464.8 增至 11 号的 1 073.7，表明河水中污染物浓度不断增加<sup>[15]</sup>；Peak T1 强度增大且呈现出红移，说明类色氨酸中羟基、羰基、羧基等含量逐步递增；Peak T2 在 1~6 号为尖峰，在 7~11 号中尖峰增强且出现了红移的肩峰，表明下游微生物活性增强<sup>[4]</sup>。

## 2.3 区域体积积分

三维荧光区域的分区见图 3(b)，其中区域 I

为类酪氨酸物质，区域 II 为类色氨酸物质，两者均为类芳香蛋白质；区域 IV 为微生物代谢产物；区域 III 为紫外光区类富里酸物质，区域 V 为可见光区类富里酸物质<sup>[1]</sup>。

三维荧光区域的积分标准体积 ( $\Phi_{i,n}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 可间接表征不同荧光组分的相对浓度<sup>[25]</sup>。各区域积分标准体积见图 4， $\Phi_{i,n}$  均沿河递增，表明以工业源为主的河水的 FDOM 中芳香碳含量最大，生活源其次，农业源最小<sup>[23]</sup>。图 5 为不同点位区域体积积分荧光响应值比例 ( $P_{i,n}$ )。在所有采样点位，区域体积积分以类蛋白区域 I 区和 II 区所占比例较大， $P_{1,n}$ 、 $P_{2,n}$ 、 $P_{4,n}$  三者总的变化范围为 80.8%~88.9%，可推出各采样点类蛋白含量较高，对区域总积分的贡献率较大，进一步表明生活污水及工业废水是 FDOM 主要来源之一<sup>[5]</sup>； $P_{1,n}$  与  $P_{2,n}$  变动较大，其中  $P_{1,n}$  范围为 38.1%~54.1%，上游 1~5 号均值为 50.1%，下游 8~9 号均值为 41.7%，呈现出上游高下游低的趋势， $P_{2,n}$  则与  $P_{1,n}$  相反，上游低下游高，这是由于随着污水的排入，河水中类酪氨酸物质比例减少而类色氨酸物质比例增加，微生物活跃水平呈现好氧与缺氧差异<sup>[23]</sup>； $P_{3,n}$  的变化范围为 9.1%~15.7%， $P_{5,n}$  的变化范围为 2.0%~3.8%，表明腐殖酸类物质在 FDOM 中含量较低且相对稳定。

## 2.4 FDOM 组分与水质相关性

为进一步研究河流 FDOM 的来源，对各采样点

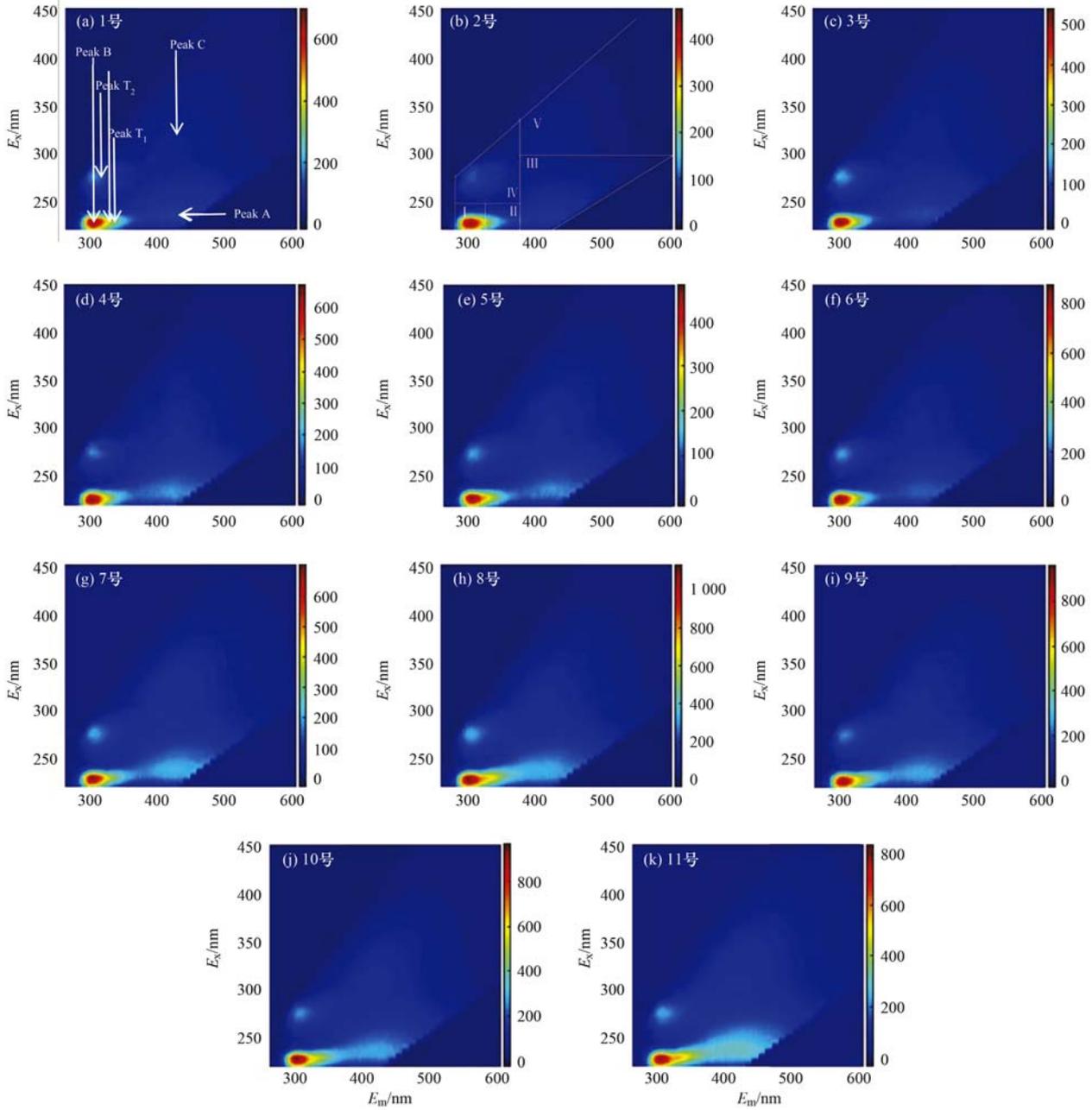


图 3 各采样点水样三维荧光光谱

Fig. 3 EEM fluorescence spectra of the samples

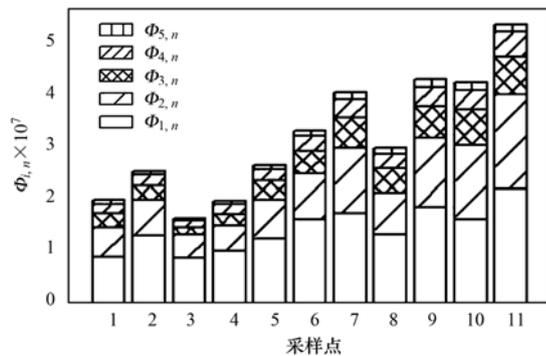


图 4 FDOM 各组分相对丰度分布

Fig. 4 Distribution of the abundances of the FDOM components

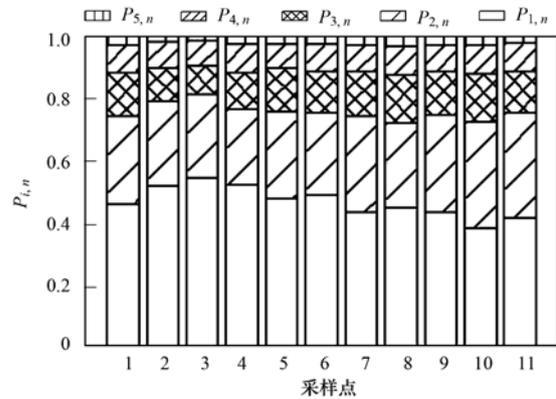


图 5 FDOM 各组分百分含量分布

Fig. 5 Distribution of the percentages of the FDOM components

的理化性质和荧光强度进行相关性分析. 经 K-S 检验, 所选取的指标均满足正态分布 ( $P > 0.05$ ), 采用 Pearson 相关性分析的结果见表 2. 不同区域的积分标准体积 ( $\Phi_{i,n}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 之间存在显著的相关性, 表明 FDOM 中的类蛋白质与类腐殖物质受到同一因素的影响<sup>[26]</sup>.  $\text{NH}_4^+$ -N、亚硝态氮、TP、DOC 的质量浓度与  $\Phi_{i,n}$  呈显著正相关关系, 这

与文献[27]的报道类似, 可推测 FDOM 与氮、磷的迁移和转换有关; 而 Mn、As、Cr 等金属浓度也与  $\Phi_{i,n}$  呈显著正相关, 表明 FDOM 与金属存有潜在相关性; 已有多项研究中表明金属与 FDOM 结合而引起荧光猝灭<sup>[28, 29]</sup>, 但也有研究证实  $\text{Ca}^{2+}$  对荧光具有增强作用<sup>[30]</sup>, 同时猝灭作用也与 pH、基团浓度密切相关<sup>[28]</sup>.

表 2 荧光强度与环境因子之间的相关关系<sup>1)</sup>

Table 2 Relationship between the fluorescence intensity and the environmental factors

项目	pH	DO	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	TN	TP	DOC	Mn	As	Cr	Ca
$\Phi_{1,n}$	0.349	-0.532 *	0.511	0.828 **	-0.415	0.298	0.847 **	0.631 *	0.800 **	0.896 **	0.658 *	0.875 **
$\Phi_{2,n}$	0.400	-0.517	0.526 *	0.931 **	-0.537 *	0.311	0.896 **	0.659 *	0.857 **	0.953 **	0.616 *	0.941 **
$\Phi_{3,n}$	0.249	-0.673 *	0.616 *	0.908 **	-0.409	0.419	0.881 **	0.726 **	0.906 **	0.967 **	0.556 *	0.935 **
$\Phi_{4,n}$	0.321	-0.596 *	0.582 *	0.925 **	-0.412	0.419	0.913 **	0.731 **	0.882 **	0.972 **	0.622 *	0.962 **
$\Phi_{5,n}$	0.182	-0.743 **	0.679 *	0.872 **	-0.320	0.503	0.852 **	0.766 **	0.917 **	0.960 **	0.550 *	0.916 **

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

为进一步分析不同采样点水体中 FDOM 的差异性, 以 6 个光谱和 12 个水质数据为变量, 对 11 个采样点进行了聚类分析, 分析结果见图 6.

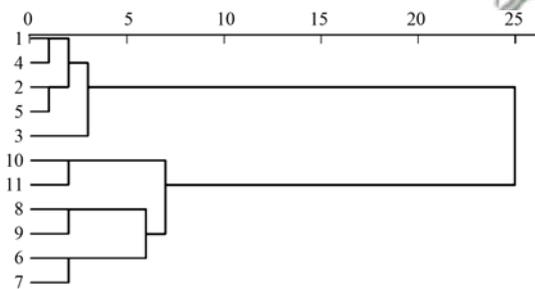


图 6 各采样点聚类分析结果

Fig. 6 Results of cluster analysis of the sampling sites

在层次聚类分析中, 簇间距离不同会使得样品分类不同<sup>[31]</sup>. 如图 6 所示, 依据上下游水质差异, 当欧几里得距离小于 25 时, 11 个采样点分为两大类<sup>[32]</sup>, 即上游 1~5 号采样点及下游 6~11 号采样点. 第一类采样点 1~5 号均位于芦江大河上游, 该区域来水主要为自然补给水、农业源污水及少量生活污水, FDOM 含量较低, 水质较好; 第二类采样点位于中下游, 该区域汇入生活污水及工业废水, 水质变差; 当欧几里得距离小于 6 时可划分为 3 个子类. 第一个子类采样点位于芦江大河中游, 包括采样点 6、7 号, 具有水流量大, 汇集其他支流河水的特征, 该区域 FDOM 的差异来源于水体汇合及 FDOM 自身地化过程<sup>[33]</sup>; 第二个子类采样点位于支流柴桥河及东直河, 包括采样点 8、9 号, 该区域 DOC 浓度升高 DO 下降, T1 峰出现红移且荧光强度比例上升, 是生活污水汇入的结果; 第三个子类

位于芦江大河下游, 包含采样点 10、11 号, 该区域汇入了工业废水, TP 含量持续增加, 金属元素如 Mn、As、Cr 也有小幅增加, 荧光总值达到了高峰. 这一分类结果表明, FDOM 的浓度及结构分布存在空间性, EEM 结合 FRI 及聚类分析可进行有效解析.

### 3 结论

(1) 利用三维荧光光谱结合多元统计解析了芦江水系 FDOM 的组分和结构. FDOM 的主成分为酪氨酸、类色氨酸、类溶解性微生物副产品、类富里酸物质, 其中类蛋白质在 FDOM 中占据主导地位. 各组分呈现显著正相关, 说明各组分具有同源性.

(2) 分析了 FDOM 组成与水质的相关性. FDOM 各组分与氮、磷、金属含量呈正相关, 表明 FDOM 与氮、磷的迁移转换相关, 而 FDOM 与金属的相关性涉及机制较复杂, 有待进一步研究.

(3) 芦江水系上游水质受人类活动影响较小, 下游水质则深受人类活动影响. 下游 FDOM 组成与结构呈现城镇河段废水排放分布特征, FDOM 随着含氮、磷的陆源排放而进入河流.

致谢: 感谢王瑞杰对文章中图片的润色给予的帮助.

#### 参考文献:

- [1] Chen W, Westerhoff P, Leemheer 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.
- [2] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 水生生态系统中溶解性有机质

- 表生行为与环境效应研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, **48**(3): 341-355.
- He W, Bai Z L, Li Y L, *et al.* Advances in environmental behaviors and effects of dissolved organic matter in aquatic ecosystems[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, **59**(4): 746-759.
- [ 3 ] Shi W, Jin Z F, Hu S Y, *et al.* Dissolved organic matter affects the bioaccumulation of copper and lead in *Chlorella pyrenoidosa*: a case of long-term exposure [J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 447-455.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Meng F G, Huang G C, Yang X, *et al.* Identifying the sources and fate of anthropogenically impacted dissolved organic matter (DOM) in urbanized rivers [J]. *Water Research*, 2013, **47**(14): 5027-5039.
- [ 6 ] Hosen J D, McDonough O T, Febria C M, *et al.* Dissolved organic matter quality and bioavailability changes across an urbanization gradient in headwater streams [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(14): 7817-7824.
- [ 7 ] 孔赞, 朱亮, 吕梅乐, 等. 三维荧光光谱技术在水环境修复和废水处理中的应用 [J]. 生态环境学报, 2012, **21**(9): 1647-1654.
- Kong Y, Zhu L, Lv M L, *et al.* Research advances in water environment remediation and wastewater treatment based on three dimensional fluorescence spectroscopy technology [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(9): 1647-1654.
- [ 8 ] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 溶解有机质的三维荧光光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- Fu P Q, Liu C Q, Wu F C. Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of dissolved organic matter [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- [ 9 ] Yang L Y, Zhuang W E, Chen C T A, *et al.* Unveiling the transformation and bioavailability of dissolved organic matter in contrasting hydrothermal vents using fluorescence EEM-PARAFAC [J]. *Water Research*, 2017, **111**: 195-203.
- [ 10 ] Zeng Z, Zheng P, Ding A, *et al.* Source analysis of organic matter in swine wastewater after anaerobic digestion with EEM-PARAFAC [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(7): 6770-6778.
- [ 11 ] Hu H D, Ren H Q. Can fluorescence spectrometry be used as a surrogate for predicting the dissolved organic nitrogen and its bioavailable portion in wastewater effluents? [J]. *Chemosphere*, 2016, **164**: 299-303.
- [ 12 ] Spencer R G M, Bolton L, Baker A. Freeze/thaw and pH effects on freshwater dissolved organic matter fluorescence and absorbance properties from a number of UK locations [J]. *Water Research*, 2007, **41**(13): 2941-2950.
- [ 13 ] 宋晓娜, 于涛, 张远, 等. 利用三维荧光技术分析太湖水体溶解性有机质的分布特征及来源 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2321-2331.
- Song X N, Yu T, Zhang Y, *et al.* Distribution characterization and source analysis of dissolved organic matters in Taihu Lake using three dimensional fluorescence excitation-emission matrix [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(11): 2321-2331.
- [ 14 ] Guo X J, He L S, Li Q, *et al.* Investigating the spatial variability of dissolved organic matter quantity and composition in Lake Wuliangsu [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **62**: 93-101.
- [ 15 ] He X S, Fan Q D. Investigating the effect of landfill leachates on the characteristics of dissolved organic matter in groundwater using excitation-emission matrix fluorescence spectra coupled with fluorescence regional integration and self-organizing map [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(21): 21229-21237.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Wang X, Li J Q, Li Y X, *et al.* Is urban development an urban river killer? A case study of Yongding Diversion Channel in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(6): 1232-1237.
- [ 18 ] 王小娇, 胡国成, 张丽娟, 等. 广西刁江流域主要河流水质评价 [J]. 生态科学, 2016, **35**(6): 128-135.
- Wang X J, Hu G C, Zhang L J, *et al.* Water quality assessment of the Diaojiang River Basin in Guangxi [J]. *Ecological Science*, 2016, **35**(6): 128-135.
- [ 19 ] 曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 等. 山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 [J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1615-1621.
- Cao F F, Yang L J, Pang X G, *et al.* Pollution status and migration of mercury in the sediments of Nansi Lake in Shandong Province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1615-1621.
- [ 20 ] Spencer R G M, Baker A, Ahad J M E, *et al.* Discriminatory classification of natural and anthropogenic waters in two U. K. estuaries [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **373**(1): 305-323.
- [ 21 ] Xu H C, Yan Z S, Cai H Y, *et al.* Heterogeneity in metal binding by individual fluorescent components in a eutrophic algae-rich lake [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **98**: 266-272.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] Wang Z W, Wu Z C, Tang S J. Characterization of dissolved organic matter in a submerged membrane bioreactor by using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Water Research*, 2009, **43**(6): 1533-1540.
- [ 24 ] Sanchez N P, Skeriotis A T, Miller C M. A PARAFAC-based long-term assessment of DOM in a multi-coagulant drinking water treatment scheme [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1582-1591.
- [ 25 ] Tang Z, Yu G H, Liu D Y, *et al.* Different analysis techniques for fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy to assess

- compost maturity [J]. *Chemosphere*, 2011, **82** (8): 1202-1208.
- [26] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: a review[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2452-2462.
- [27] 陈永娟, 胡玮璇, 庞树江, 等. 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37** (8): 3017-3025.  
Chen Y J, Hu W X, Pang S J, *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of dissolved organic matter in Beiyun River[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3017-3025.
- [28] Yamashita Y, Jaffé R. Characterizing the Interactions between trace metals and dissolved organic matter using excitation-emission matrix and parallel factor analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(19): 7374-7379.
- [29] 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.
- [30] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 三维荧光光谱研究溶解有机质与汞的相互作用[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 140-144.  
Fu P Q, Liu C Q, Wu F C. Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of the complexation between Mercury(II) and dissolved organic matter [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(6): 140-144.
- [31] Jiang F H, Yang B J, Lee F S C, *et al.* Multivariate analysis of fluorescence and source identification of dissolved organic matter in Jiaozhou Bay, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **28** (2): 60-72.
- [32] Wei Z M, Zhao X Y, Zhu C W, *et al.* Assessment of humification degree of dissolved organic matter from different composts using fluorescence spectroscopy technology [J]. *Chemosphere*, 2014, **95**: 261-267.
- [33] Li P H, Lee S H, Lee S H, *et al.* Seasonal and storm-driven changes in chemical composition of dissolved organic matter: a case study of a reservoir and its forested tributaries [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(24): 24834-24845.



## CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM <sub>2.5</sub> .....	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM <sub>2.5</sub> Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu .....	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> at Mt. Huashan, Inland China .....	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) Produced by Burning Fireworks .....	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region .....	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion .....	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring .....	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao .....	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay .....	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas .....	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City .....	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai .....	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo .....	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region .....	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH <sub>4</sub> Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River .....	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River .....	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments .....	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River .....	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake .....	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta .....	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process .....	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment .....	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine .....	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation .....	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water .....	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater .....	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition .....	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads .....	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A <sup>2</sup> /O-BAF System .....	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control .....	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process .....	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater .....	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process .....	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process .....	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge .....	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02 .....	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances .....	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain .....	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings .....	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin .....	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region .....	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamox in the Surface Soils of a Riparian Zone .....	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding .....	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China .....	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment .....	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengnongjia .....	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi .....	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It .....	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment .....	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains .....	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage .....	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern .....	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland .....	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission .....	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO <sub>2</sub> Release in Karst Region .....	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)