

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
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	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例

闫金龙¹, 江韬^{1,2*}, 高洁¹, 魏世强¹, 卢松¹, 刘江¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716;

2. Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå SE-90183, Sweden)

摘要: 利用三维荧光和紫外-可见吸收光谱手段, 分析了渠江、涪江和嘉陵江交汇处水体 DOM 特征变化。结果表明, 干支流各采样点水体 DOM 的 FI 值 < 1.4 , HIX 值 > 0.8 , 表现出明显陆源输入特征, 整个研究区域水体混合模式为非保守混合, 对交汇处水体 DOM 地化特征变化有一定贡献, 但并非主导因素。河流沿岸不同土地利用类型对交汇处水体 DOM 特征改变有明显影响, 聚类分析发现, 所有采样点可分为两大类, 一类为沿岸以森林和农田生态系统为主(渠江-嘉陵江交汇处), 另一类为沿岸以城市用地为主(涪江-嘉陵江交汇处), 前者向干流水体中输入芳香化程度和腐殖化程度较高的 DOM, 后者以浓度较高而结构相对较简单的 DOM 输入为主。此外, 涪江-嘉陵江交汇处类蛋白质荧光组分信号增强, 出现荧光 T 峰, 表明人为活动对水体质量的影响明显。

关键词: 溶解性有机质; 三维荧光光谱; 紫外-可见吸收光谱; 河流交汇; 土地利用类型

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0869-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.03.016

Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers: Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River

YAN Jin-long¹, JIANG Tao^{1,2*}, GAO Jie¹, WEI Shi-qiang¹, LU Song¹, LIU Jiang¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. Department of Forest Ecology and Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå SE-90183, Sweden)

Abstract: Three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with ultraviolet-visible (UV-Vis) absorption spectra was used to investigate the change characteristics of dissolved organic matter (DOM) in confluences water of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River, respectively. The results suggested that DOM showed a significant terrestrial input signal in all the sampling sites, FI < 1.4 , HIX > 0.8 , possibly representing remarkable signals of humus resulted from humic-like component. Moreover, the mixing zone of this study showed a non-conservative mixed behavior, which had a limited contribution, and was not the dominant factor to interpret the change characteristics of DOM in confluences zones. Different land-use types along all the rivers had an obvious impact on DOM inputs. Results of cluster analysis showed that a higher degree of aromaticity and humification components was observed as the predominant contributor to DOM when the land-use type was forest and farmland ecosystem, for example the confluences of Qujiang River-Jialing River. On the other hand, high concentrations of DOM with relative simple structures were found in the water when the urban land-use type was predominant, for example the confluences of Fujiang River-Jialing River. Meanwhile, a new fluorescent signal of protein-like components (peak T) appeared, which manifested a significant effect on the water quality resulted from anthropogenic activities.

Key words: dissolved organic matter; three-dimensional fluorescence spectroscopy; ultraviolet-visible absorption spectra; river confluences; land-use types

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)广泛存在于天然水体中,其成分包括蛋白质、木质素、碳水化合物、小分子有机酸和一些结构未知的腐殖物质(富里酸和胡敏酸),且腐殖物质为 DOM 主要成分(50% ~ 80%)^[1]。由于 DOM 中含有羧基、酚基、羟基和氨基等大量功能基团,对环境污染物的形态特征及迁移转化过程都会产生重要影

响^[2,3],同时作为重要的碳库,参与全球碳循环^[4]。

收稿日期: 2014-08-05; 修订日期: 2014-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41403079); 中国博士后科学基金项目(2013M542238); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013C151); 西南大学博士基金项目(SWU112098)

作者简介: 闫金龙(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: yanjinlong6439@126.com

* 通讯联系人, E-mail: Jiangtower666@163.com

因此,针对不同来源 DOM 地化特征的研究一直是热点. 作为重要的水环境,水体汇合处由于水流速度和滞留时间变化、物理稀释等作用^[5],进而影响水环境中 DOM 性质及其与其他污染物的环境行为. 目前,国内外针对水体汇合区域 DOM 地化特征已有相关研究^[6~10],但多集中于河口或海湾等地,有关内陆淡水河流汇合处水体 DOM 性质的研究还不多见^[11,12]. 此外,沿岸不同土地利用方式对河流水体 DOM 输入、结构和化学组成均能产生重要影响^[13~15],进而造成 DOM 地球化学特征的差异性,而国内有关沿岸不同土地利用方式对河流汇合处水体 DOM 性质的研究还鲜见报道. 因此,了解内陆河流 DOM,尤其是水体汇合对 DOM 性质结构的影响,是进一步明确 DOM 在该类型水体系统中环境角色的重要前提,也是了解 DOM 在内陆河流中影响环境污染物迁移转化的基础.

另外,由于紫外-可见和三维荧光光谱具有灵敏度高、样品用量少、重复性高、不破坏样品等优点,

被广泛用于天然环境中 DOM 表征和分析,尤其是三维荧光光谱能有效反映 DOM 结构和来源等信息,为深入研究 DOM 地化特征提供了可能性^[16]. 因此,本研究采用紫外-可见、三维荧光光谱方法探讨了沿岸不同土地利用方式对河流交汇处水体 DOM 性质的影响,其结果对进一步揭示水体 DOM 在河流交汇处的地球化学行为提供科学基础.

1 材料与方法

1.1 样品采集

嘉陵江干流全长 1 156 km,全流域集水面积 16 万 km²,是长江上游重要支流. 涪江和渠江为嘉陵江两条支流,且均在重庆市合川区汇入嘉陵江. 渠江与嘉陵江汇合处距涪江与嘉陵江汇合处约 8 km 左右,前者位于郊区,沿岸以林地为主,后者位于城区码头处,文峰古街旁,受人为影响大. 具体沿岸土地利用类型见图 1.

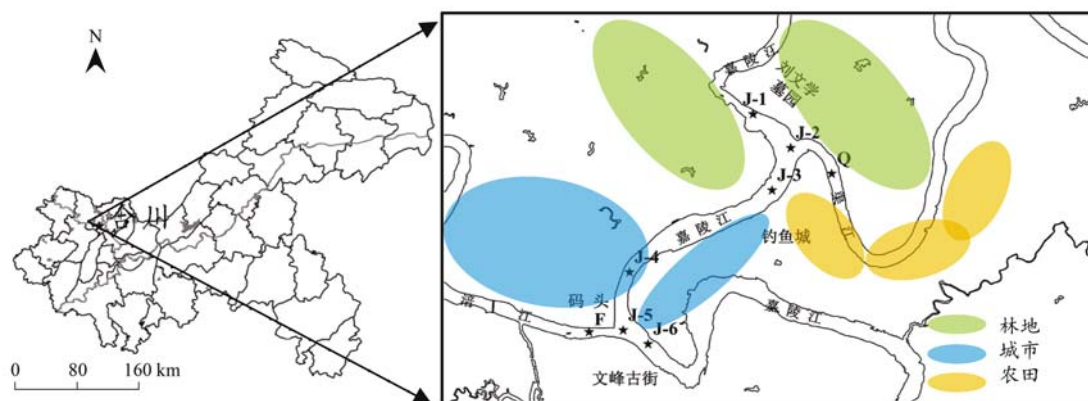


图 1 采样点示意

Fig. 1 Sampling locations of water samples

于 2013 年 6 月采集干流嘉陵江表层(0 ~ 50 cm)水样,采样点分别为 J-1(渠江汇入嘉陵江前), J-2(渠江与嘉陵江汇合处), J-3(渠江汇入嘉陵江后), J-4(涪江汇入嘉陵江前), J-5(涪江与嘉陵江汇合处), J-6(涪江汇入嘉陵江后). 同时采集了汇入嘉陵江前的渠江和涪江表层(0 ~ 50 cm)水样,分别为 Q 和 F. 每个点位均采集 3 个水样. 现场测定水样 pH,电导率(EC)和总溶解性固体(TDS). 水样放入 4℃ 冷藏箱内,当天送回实验室. 采用 0.45 μm 水系混合纤维滤膜对水样进行过滤. DOM 浓度采用 GE InnovOx® Laboratory TOC 分析仪测定,以溶解性有机碳(DOC)表示,单位 mg·L⁻¹. 叶绿素 a

(Chl-a)采用丙酮萃取法测定^[17]. 表 1 为水样基本性质.

1.2 吸收及荧光光谱扫描

DOM 紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱均采用 Horiba 公司 Aqualog® 荧光光谱仪测定(可同时测定吸收和荧光光谱). 紫外可见光谱扫描波长范围为: 230 ~ 800 nm; 间隔 1 nm. 荧光光谱激发波长(E_x): 230 ~ 450 nm,发射波长(E_m): 213 ~ 620 nm; 激发光源为 150 W 氙弧灯; 相应时间: 3 s; 扫描间隔: $E_x = 5$ nm, $E_m = 3.18$ nm; 两种光谱扫描均以 Millipore® 超纯水(18.2 MΩ·cm)作空白. Aqualog® 系统对荧光光谱自动校正瑞利和拉曼散射.

表 1 水体基本性质

Table 1 Basic parameters of water samples

样点	温度/℃	pH	EC/mS	TDS/ng·L ⁻¹	DOM/mg·L ⁻¹	Chl-a/mg·m ⁻³
J-1	28.1	7.94	0.33	0.16	4.28	2.92
Q	27.0	7.84	0.30	0.14	5.06	2.73
J-2	27.8	7.90	0.33	0.15	4.50	3.03
J-3	28.1	7.91	0.33	0.15	4.76	2.80
J-4	26.9	7.86	0.31	0.14	4.97	3.22
F	27.0	7.83	0.40	0.19	6.28	2.75
J-5	26.2	7.83	0.32	0.15	6.16	2.35
J-6	26.3	7.83	0.36	0.17	5.71	4.68

1.3 光谱特征值 E

SUVA(λ)代表 DOM 在特定波长处的紫外特征值^[18,19], $SUVA(\lambda) = a(\lambda)/c$, 吸收系数 $a(\lambda) = 2.303A(\lambda)/b$, 式中, λ 是波长 (nm), b 代表比色皿的光程 (m), $A(\lambda)$ 代表 DOM 在特定波长处的吸光度, c 代表 DOM 浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); $E_2/E_3 = a_{250}/a_{365}$, a_{250} 、 a_{365} 分别代表 DOM 在 250、365 nm 处的吸光系数 (m^{-1})^[20]. $E_3/E_4 = a_{300}/a_{400}$, a_{300} 、 a_{400} 分别代表 DOM 在 300、400 nm 处的吸光系数 (m^{-1})^[21]. F_n (355) 为 $E_x = 355$ nm 时, E_m 在 440~470 nm 间最大荧光强度, 代表荧光物质浓度^[22]. 荧光指数 (FI)^[23]: 当 $E_x = 370$ nm 时, E_m 为 470 nm 与 520 nm 处的荧光强度比值; 自身源指数 (BIX)^[24]: 当 $E_x = 310$ nm 时, E_m 为 380 nm 与 430 nm 处的荧光强度比值; 腐殖化指数 (HIX) 为积分比值^[25,26]: 当 $E_x = 254$ nm 时, $\left(\int E_m = 435 \sim 480 \text{ nm} \right) / \left[\left(\int E_m = 300 \sim 345 \text{ nm} \right) + \left(\int E_m = 435 \sim 480 \text{ nm} \right) \right]$; $r(A/C)$ 为荧光 A 峰强度与荧光 C 峰强度的比值^[27].

1.4 数据分析

未做特别说明, 本研究荧光峰定位采用 Origin 8.5 Peak Pick 寻峰功能找峰. 荧光图谱采用 Origin

8.5 处理, 相关数据处理及统计分析采用 SPSS 17.0 和 Excel 2013 进行.

2 结果与讨论

2.1 干流水体 DOM 浓度

干流嘉陵江水体 DOM 浓度变化如图 2. 除 J-5 外, 干流水体 DOC 浓度沿水流方向逐渐增加 [图 2 (a)], 这可能与沿岸 DOM 输入有关. CDOM 是 DOM 中具有特定光学性质的部分, 能有效吸收紫外线, 保护水生生物免受紫外线的辐射^[28], 同时也是水体光学的重要指标, 以 $a(355)$ 表征^[29]. 渠江与干流交汇处水体 CDOM 浓度高于交汇前后干流值, 而涪江汇入干流前后, 干流水体 CDOM 浓度随着干流方向逐渐减小. FDOM 为 DOM 中具有荧光特性的组分, $F_n(355)$ 代表荧光物质相对浓度^[22]. 由图 2 (b), 干流水体中荧光组分相对浓度沿水流方向逐渐增加, 其中在涪江汇入嘉陵江前后, 干流水体荧光组分相对浓度增幅较大. 整体而言, 从 J-1~J-6, DOM 中各浓度指标呈增加趋势, 尽管光漂白和生物降解可能导致 DOM 损耗^[30,31], 但仍主要以 DOM 输入为主.

有研究发现^[32,33], 在开阔水体 (如湖泊和海洋) 中, DOC 和 CDOM 之间存在显著正相关, 两者空间

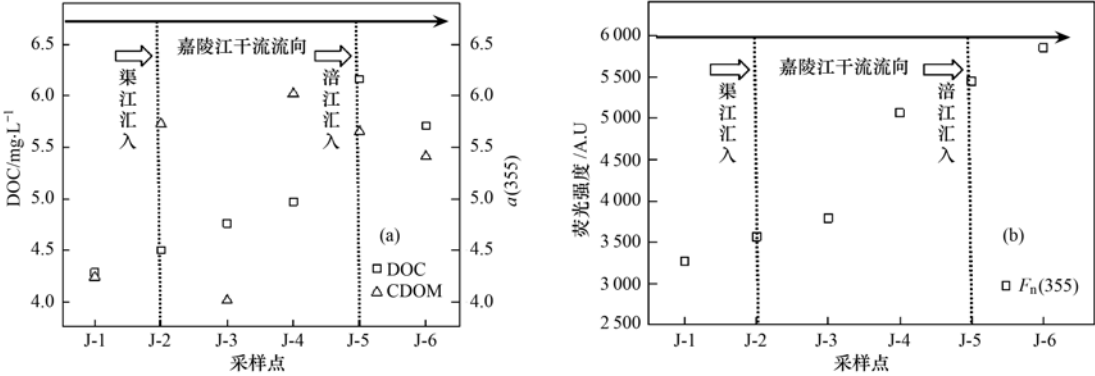


图 2 干流水体 DOM、CDOM、FDOM 浓度

Fig. 2 Changes of DOC, CDOM and FDOM concentrations in the main stream

分布类似,可基于 CDOM 利用遥感技术预估 DOC 时空分布情况. 但本研究中仅 FDOM 和 DOC 显著正相关(表 2),而 CDOM 分别与 FDOM 和 DOC 间均未发现较强相关性($P > 0.05, N = 18$),说明非有色 DOM 组分在 DOM 中所占比例较不稳定,DOC 时空差异可由 FDOM 变化来解释,而非 CDOM. 与文献报道不同的可能原因:①不同于大型湖泊和海洋,本研究水域较窄,DOM 地化反应过程较为集中,水体混合行为影响有限;②流域内不同土地利用类型较为复杂,尤其人为源输入(例如污水排放)干扰较为严重,因此,CDOM 和 DOC 相关性不高. 同时,该区域水体电导率(EC)和 DOC 无明显相关性($P > 0.05, N = 24$),说明水体混合属于非保守型混合模式^[10],物理稀释和传质扩散对 DOM 浓度分布有一定贡献,但并非主导因素.

表 2 干流水体中 DOM 浓度指标相关性¹⁾

Table 2 Correlation among different concentration indices of DOM in the main stream

	$F_n(355)$	$a(355)$	DOC
$F_n(355)$	1.00	0.31	0.75 **
$a(355)$		1.00	0.15
DOC			1.00

1) ** 表示 $P < 0.01$

2.2 干流水体 DOM 的吸收光谱特征

SUVA₂₅₄ 值与 DOM 芳香性程度呈正相关^[18]. 如图 3,渠江汇入干流后,干流水体 DOM 的 SUVA₂₅₄ 值升高,而涪江汇入干流后,干流水体 DOM 的 SUVA₂₅₄ 值降低. 前者可能与沿岸 DOM 输入有关,而后者与水体混合关系密切. SUVA₂₆₀ 值与 DOM 的疏水性组分呈正相关关系^[19],干流水体各样点 SUVA₂₆₀ 变化趋势与 SUVA₂₅₄ 一致,且两者极显著正

相关($P < 0.01, N = 18$) (表 3). E_2/E_3 可反映 DOM 分子量大小^[20],其值越小,分子量越大. 结果显示,干流水体 DOM 的 E_2/E_3 值变化趋势与 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀ 值刚好相反,与后两个指标极显著负相关($P < 0.01, N = 18$) (表 3). 另外,研究发现^[21], E_3/E_4 能反映水体 DOM 腐殖化程度、芳香性结构等. $E_3/E_4 < 3.5$ 时,水体 DOM 以胡敏酸为主; $E_3/E_4 > 3.5$ 时,以富里酸为主. 干流水体 DOM 的 E_3/E_4 值均大于 3.5,表明各采样点水体 DOM 以富里酸为主,这和 Wu 等研究结果类似^[34].

表 3 干流水体 DOM 的紫外-可见吸收光谱特征值的相关性¹⁾

Table 3 Correlations among different UV-Vis absorption spectra special indices of DOM in the main stream

	E_3/E_4	E_2/E_3	SUVA ₂₆₀	SUVA ₂₅₄
E_3/E_4	1.00	0.99 **	-0.84 **	-0.84 **
E_2/E_3		1.00	-0.85 **	-0.85 **
SUVA ₂₆₀			1.00	1.00 **
SUVA ₂₅₄				1.00

1) ** 表示 $P < 0.01$

2.3 干流水体 DOM 的荧光光谱特征

三维荧光光谱广泛用于水体 DOM 的结构和组成的定性分析. 参照文献[34]对水体 DOM 不同类型荧光峰进行划分,干流水体荧光光谱解析得 2 类峰:①类腐殖质峰,紫外光区类腐殖质 A 峰($E_x/E_m = 230 \sim 265/410 \sim 480 \text{ nm}$)、可见光区类腐殖质 C 峰($E_x/E_m = 325 \sim 370/420 \sim 480 \text{ nm}$); 光漂白类腐殖质 M 峰($E_x/E_m = 290 \sim 325/380 \sim 440 \text{ nm}$). ②类蛋白质峰,类色氨酸 T 峰($E_x/E_m = 275 \sim 285/320 \sim 360 \text{ nm}$)和类酪氨酸 B 峰($E_x/E_m = 270 \sim 280/300 \sim 320 \text{ nm}$). 图 4 为代表性水样 DOM 三维荧光光谱图. 干流水体 DOM 均含有 A、C、M 峰,但未发现 B 峰. 此外,涪江汇入干流后,J-5、J-6 采样点还发现 T 峰,其中 A 峰荧光强度占主导,M、C、T 峰荧光强度差异不大. Coble^[35]认为荧光 A、C 峰主要反映水体 DOM 的陆源特征. 荧光 A、C、M、T 峰强度沿着水流方向逐渐增加(图 5),渠江、涪江汇入干流后,均能明显增加干流水体 DOM 的 A、C、M 强度,同时后者还引入 T 峰,且前者汇合处干流各样点 DOM 的荧光峰强度均低于后者,这可能与 FDOM 浓度有关,A、C、M 峰与 FDOM 浓度均达到极显著正相关关系(r 均大于 0.85, $N = 18$).

相关性分析表明,A、C 和 M 峰均表现出极显著正相关($P < 0.01, N = 18$),表明 A、C 和 M 峰可能具有共源性. 在 J-5 和 J-6 出现 T 峰,可能是由受

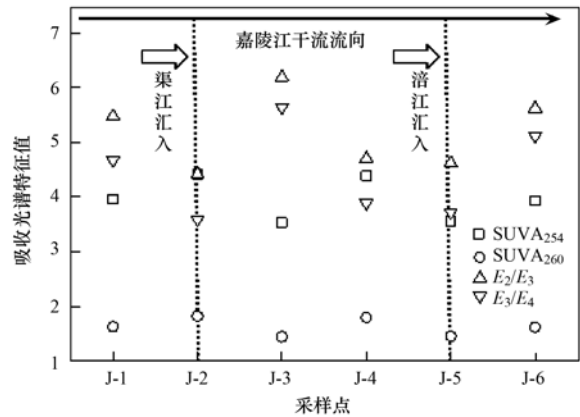


图 3 干流水体 DOM 的紫外-可见吸收光谱特征值

Fig. 3 UV-Vis absorption spectra special indices of DOM in the main stream

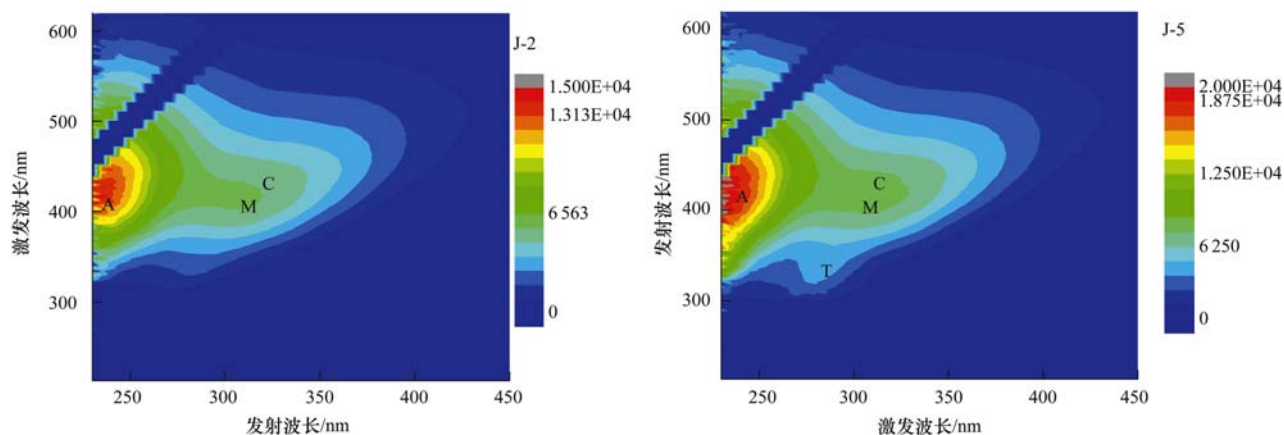


图4 干流代表性水样 DOM 的三维荧光光谱图

Fig. 4 EEMs of typical DOM samples from the main stream

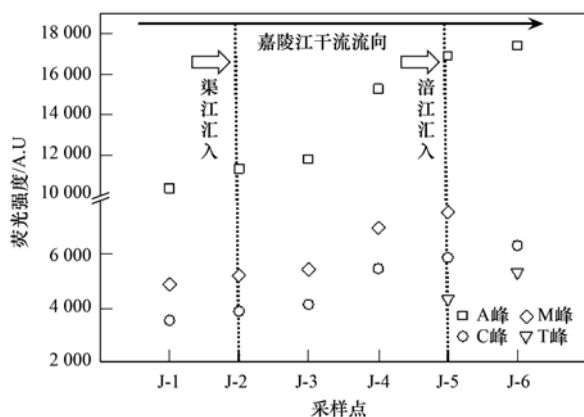


图5 干流水体 DOM 荧光峰强度值

Fig. 5 Fluorescence peak intensity of DOM samples from the main stream

城市影响的涪江水体汇入而产生,这与文献报道类似^[14,36].但荧光 T 峰强度仍远小于占主导的荧光 A 峰,表明类蛋白质组分的贡献有限.值得注意的是,作为典型的 DOM 类蛋白质信号,B 峰(类酪氨酸)在本研究中并没有发现.由于 B 峰所表征的类蛋白质组分其降解程度较 T 峰高^[37],由此可推测,在该区域内 DOM 中类蛋白质组分主要来自于人为输入(例如废水排放),藻类活动和部分有机质在降解初级阶段形成的多肽等物质.而 T 峰也仅在 J-5 ~ J-6 段样本中发现,这可能与上游(J-1 ~ J-4)区类蛋白质组分的外源输入和内源产生均相对较少有关.

干流水体 DOM 荧光光谱特征值见图 6. FI 值可表征水体 DOM 腐殖质来源^[23],FI > 1.9 以自生源为主,FI < 1.4 以陆源输入为主.干流水体 DOM 的 FI 值均小于 1.4,表明水体 DOM 以陆源为主.同时,BIX 可反映水体 DOM 自生源贡献^[24],其值在

0.6 ~ 0.7 时,主要为陆源输入或受人为影响较大,当 BIX 值大于 1 时,主要为生物或细菌等来源.干流水体 DOM 的 BIX 值在 0.78 ~ 0.80 之间,表明水体 DOM 来源可能受到两种结果的混合影响,其值更接近于陆源,表明陆源输入可能为主要形式.

HIX 反映 DOM 腐殖质含量或腐殖化程度^[25,26],当 HIX > 0.8 时,水体 DOM 具有显著腐殖质特征,其来源主要以陆源为主.干流水体 DOM 的 HIX 值均大于 0.8,表明水体 DOM 来源以陆源为主,有显著的腐殖质特征,这与上文的分析结果一致.

在 pH 变化不大的情况下,荧光 A 峰和 C 峰的荧光强度之比 $[r(A/C)]$ 可反映 DOM 来源的差异性^[27].各采样点水体 pH 值在 7.83 ~ 7.91 之间,因此采用该指标是可行的.渠江汇合段干流水体 DOM 的 $r(A/C)$ 值大于对应涪江汇合段干流 DOM 的 $r(A/C)$ 值,表明涪江、渠江与干流汇合段水体 DOM 的来源有一定的差异.干流区域中,FI, BIX 和 HIX 值之间的差异并不显著($P > 0.05$),但 $r(A/C)$ 差异明显($P < 0.05$)(图 6).J-1 ~ J-4 区域, $r(A/C)$ 逐渐降低,说明 C 峰比例不断增加,这可能与沿岸陆源输入有关,而涪江汇入处(J-5)值明显增加.由于 C 峰具有较强光化学活性,更易于光解, $r(A/C)$ 也常用来评估 DOM 光降解情况^[38].DOM 的光漂白会使得 $r(A/C)$ 值增大.通过室内模拟,该区域 CDOM 日光辐照下光漂白速率常数为 0.03 ~ 0.04 h^{-1} ,最小半衰期为 16.58 h ^[39],但由于 J-5 区域面积有限,几乎无水体滞留区域,光漂白贡献可能并不明显,可能更多是由于生物降解和水体稀释导致的 DOM 耗损^[30,31].

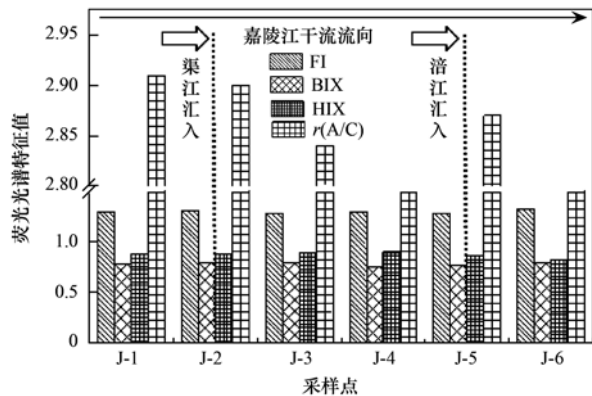


图6 干流水体 DOM 的荧光光谱特征值

Fig. 6 Fluorescence spectra special index of DOM samples from the main stream

综上,水体汇入、光漂白和生物降解及沿岸 DOM 输入均会对 DOM 性质产生影响. 为进一步了解引起 DOM 变化的相关机制,采用系统聚类法,以所有样本均存在的 A、C、M 荧光峰为特征变量,采样点为个案标记依据,采样点可明显分为两类(图 7). 上游 J-1 ~ J-3 包括渠江(Q)为 A 类;下游 J-4 ~ J-6 包括涪江(F)为 B 类. A 类区域沿岸土地利用方式较为复杂,包括森林生态系统、农田生态系统;B 类较为单一,以城市为主,人为活动影响较大. 人为排放和水体藻类、微生物活动会产生类蛋白质物质,但在 A 类区贡献不显著,DOM 仍显示出较强的陆源特征,由此可知,在该区域中 DOM 结构和性质上出现的差异性,更多来自于水体汇合的影响,以及 DOM 自身地化过程,如生物降解及与底泥、悬浮颗粒物的吸附^[40];在 B 类区,明显的 T 峰信号出现,表明人为影响导致的类蛋白质物质输入是 DOM 浓度增加的重要原因.

2.4 支流水体 DOM 特征变化

由于两支流汇入干流的混合模式也为非保守型混合,因此水体稀释/扩散在支流汇入过程中,对

DOM 浓度分布及特征影响有限,其机制并不能仅用水体混合模式来解释(图 8). 渠江汇入嘉陵江后,DOC 降低,CDOM 浓度增加;同时荧光组分 $[F_n(355)]$ 含量下降. 但 DOC 和 FDOM 降低程度并不一致,除水体混合的有限影响外,其他地化过程(例如降解和吸附)也可能导致 DOM 中荧光组分减少. 对涪江而言,尽管汇合后 $[F_n(355)]$ 下降,但 DOC 和 CDOM 浓度变化并不明显,说明汇入过程中存在非荧光组分的增加,例如沿岸输入、DOM 荧光组分降解成为非荧光物质等^[41].

渠江、涪江汇入干流后,前者 DOM 的 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 值增加,后者降低,而 E_2/E_3 的变化趋势刚好相反(图 9),表明渠江为干流水体带来了较多的大分子量疏水性芳香性结构物质,而涪江水体中大分子量疏水性芳香性物质较少,在干流混合作用下,其值明显降低. 两支流汇合前后水体 DOM 的 E_3/E_4 均大于 3.5,表明水体 DOM 以富里酸为主,这与干流水体一致.

与渠江交汇前后相比(图 10),涪江交汇前后水体 DOM 除 A、C、M 峰外,还出现 T 峰,且荧光 A 峰强度远大于其余几个荧光峰强度,前者较后者荧光峰强度的差异更大. 涪江汇入后,荧光 T 峰强度降低,表明干流水体对汇入的高浓度的类蛋白质物质有很好的缓冲作用. 两支流 DOM 的 $r(A/C)$ 值为所有采样点中的最大值和最小值,但数值差异较小,表明两流水体 DOM 的来源存在一定差异. 两流水体 DOM 的 FI 值均低于 1.4, BIX 分别为 0.76 和 0.82, HIX 均大于 0.8(图 11),结果均进一步表明两流水体 DOM 来源以陆源输入为主,具有明显类腐殖物质特征. 结合 CDOM 浓度,涪江由于沿岸城市的人为排放及较高的内源生产力,成为干流中类蛋白组分含量增加的重要原因.

渠江与嘉陵江交汇处位于郊区,两江沿岸土地

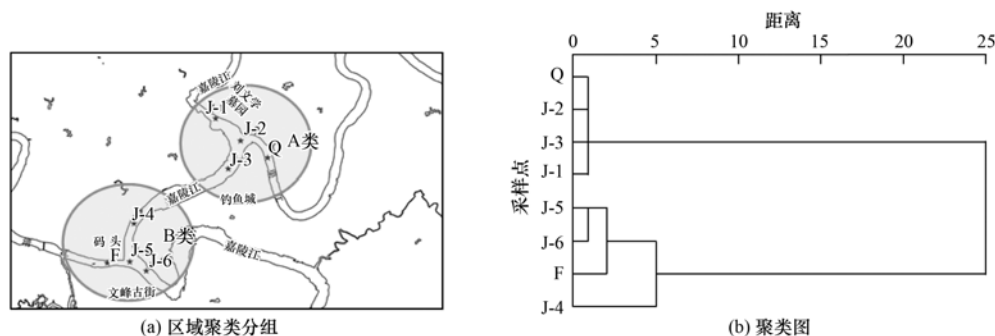


图7 DOM 样本荧光峰聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of fluorescence peaks from DOM samples

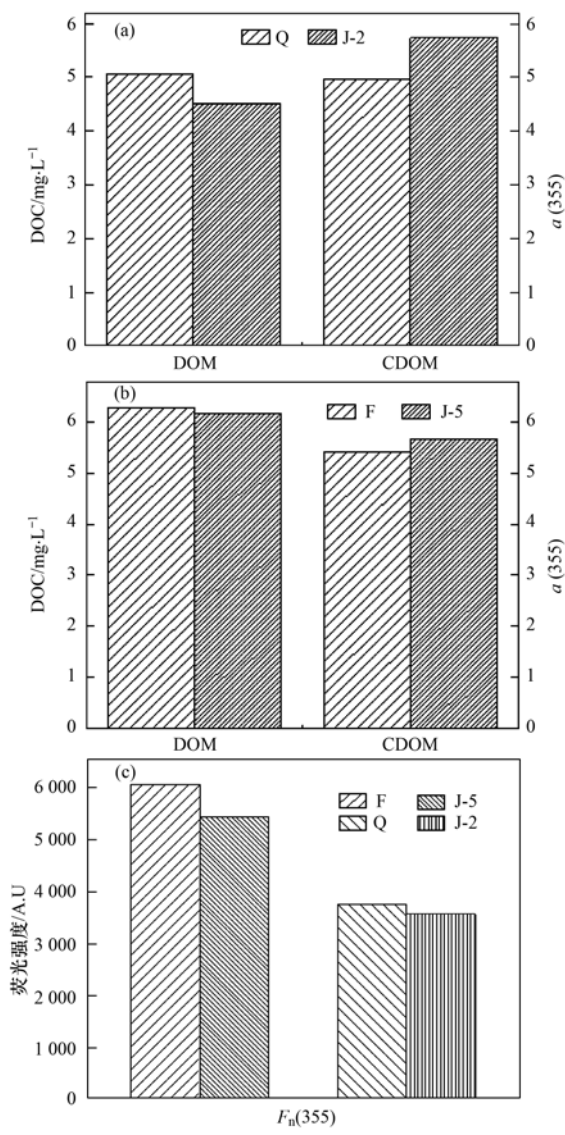


图 8 支流汇合前水体 DOM 浓度
Fig. 8 Comparison of DOM concentrations from tributaries before and after confluence

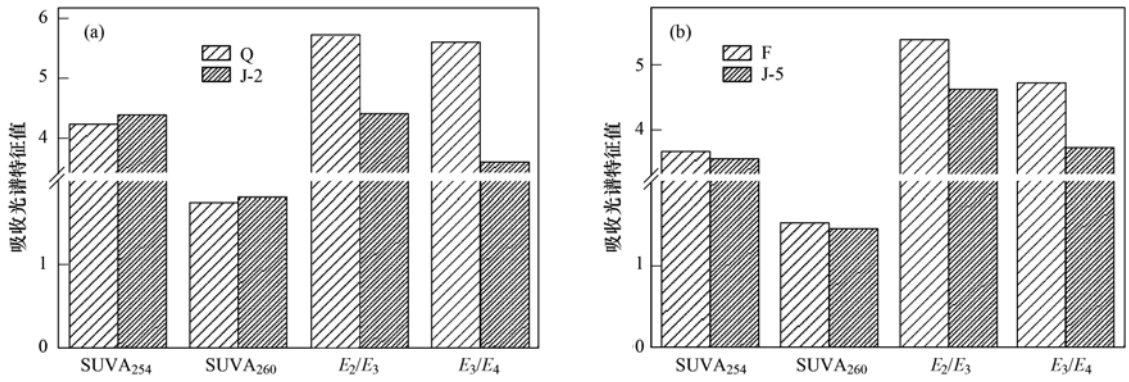


图 9 支流汇合前后水体 DOM 的可见-紫外光谱特征值
Fig. 9 Comparison of UV-Vis spectra special index of DOM samples from tributaries before and after confluence

利用方式以林地及坡耕地为主,人为活动相对较城市用地少,而森林土壤 DOM 常含有较高木质素、C/N 比和较大的分子量^[13,42],因此,本研究中降雨径流及渗流通过以林地等植被覆盖为主的土地后,为水体带来更多芳香性结构且分子量更高的物质.涪江与嘉陵江交汇处位于合川城区中心码头处,文峰古镇旁,沿岸以城市用地为主,受人为活动影响较大,可能为水体输入大量油脂、蛋白质等,芳香性结构较低^[43],同时,人为活动产生的生活污水等将造成水体细菌等微生物活动增强^[44],而水体类蛋白质荧光峰可反映微生物活性及人为干扰对水体的影响^[14],这可能是该区域(J-5 ~ J-6)水体出现荧光 T 峰、且 DOM 浓度较高的重要原因.

2.5 文献对比

和其他研究汇合处水体 DOM 特征变化的文献进行对比发现(表 4),大部分研究将原因归结于支流水体性质及其周边环境差异,且主要以周边环境差异为主,包括人为活动、气候变化、地理位置和不同土地利用方式等.支流汇入干流后,干流水体 DOM 在浓度、结构和来源特征上均发生变化,这与本研究结果相似.

嘉陵江干流水体稀释作用对支流高浓度 DOM 的输入起到重要缓冲作用,同时,支流高浓度 DOM 的输入也有效地增加了干流水体 DOM 浓度.另一方面,渠江为嘉陵江干流提供了较高芳香性结构和腐殖化程度 DOM;而涪江为干流水体 DOM 除提供了类腐殖质组分外,还输入了大量类蛋白质.支流对干流的这种影响,与文献[8]报道一致.

水生生态系统中,DOM 对水体中营养元素、重金属及有机污染物等的迁移转化行为都能产生重要

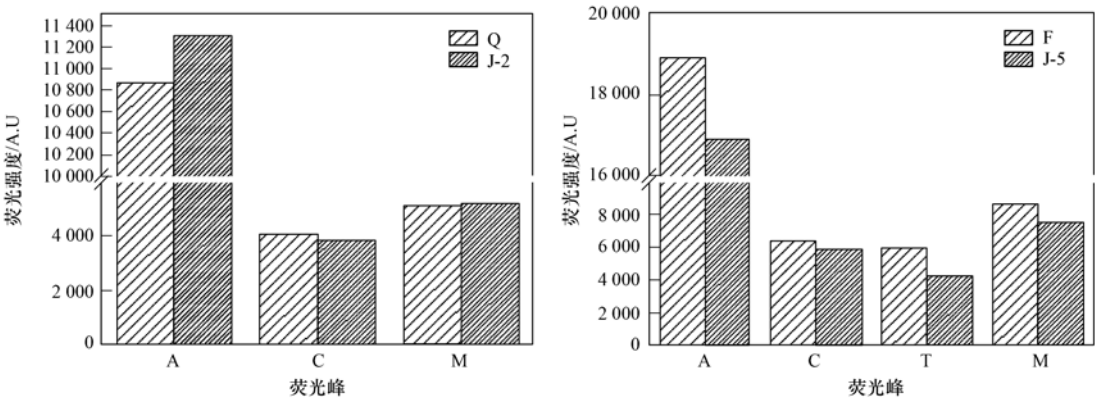


图 10 支流汇合前后水体 DOM 的荧光峰强度

Fig. 10 Comparison of fluorescence peaks intensity of DOM samples from tributaries before and after confluence

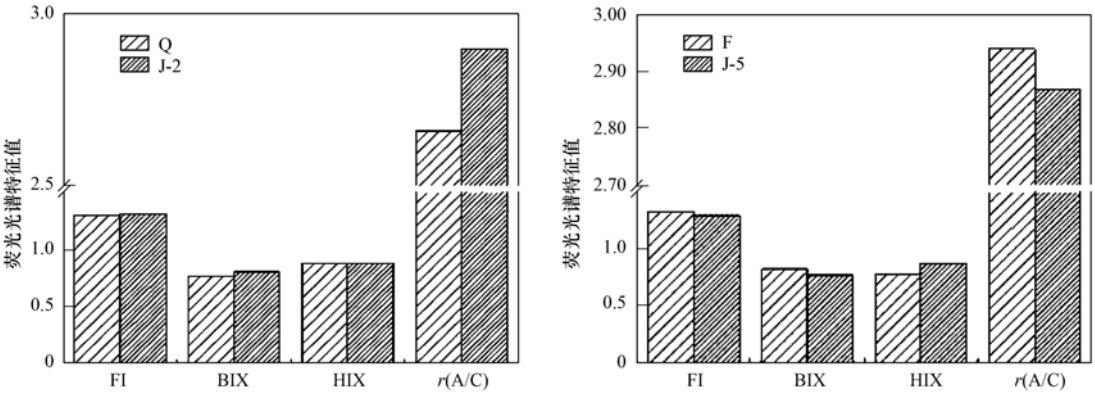


图 11 支流汇合前后水体 DOM 的荧光特征值

Fig. 11 Comparison of fluorescence spectra special index of DOM samples from tributaries before and after confluence

表 4 文献数据对比河流交汇处水体 DOM 变化情况¹⁾

Table 4 Comparison of DOM changes of rivers confluence reported in different references

汇合水体	支流	支流特征	干流 DOM 变化	文献
Ogeechee river	—	支流为黑水(主要成分为 HA 和 FA), 流域多沼泽地	来源发生变化,提供更多芳香性结构物质	[7]
Amazon Basin	Rio Negro 和 Rio Solimões	交汇处发生黏土矿物吸附	DOC 浓度降低	[10]
胶州湾	大沽河、海泊河等	人为活动	荧光峰位置发生移动,荧光强度发生变化	[46]
深圳某河	—	生活污水排放	荧光峰出现蓝移和部分荧光峰消失	[8]
Taihu basin	—	存在不同地质学特征和土地利用方式	提供不同类型 CDOM	[47]
Takase River system	Anenuma, Akagawa 和 others	周边水稻土灌溉水输入	提供更多外源输入信号	[12]
Moon River estuary	the Moon River	无机营养盐富集,浮游生物发生变化等	提供外源输入信号	[9]
Yenisei River	Bogs 和 other tributaries	地理纬度等造成的温度变化及低 pH 造成的有机酸积累和发生氢离子交换	提供不同分子组成的 DOM	[11]
嘉陵江	渠江和涪江	沿岸土地利用方式差异	提供不同类型 DOM	本研究

1) “—”表示未告知

影响^[45],水体交汇处更是环境变化的敏感区域之一,两支流向干流汇入性质不同的 DOM 后,必将导致水体中各种污染物的环境行为发生相应变化,同时伴随着交汇处水体水流减缓等条件,水体 DOM 与污染物接触时间可能增加,加大该区域生态环境

风险. 因此,研究在该特殊水体区域内,DOM 对污染物迁移转化的影响,应是进一步研究的工作重点.

3 结论

(1) 干流水体(嘉陵江)DOM 陆源输入特征较

为明显,在采样区域的流过程中,DOM 中各浓度指标呈增加趋势,尽管存在 DOM 耗损,但仍主要以 DOM 输入为主. 受水体混合、DOM 降解和吸附以及沿岸输入的影响,DOC 与 CDOM 浓度无相关性,该区域采用水色遥感等技术评估 DOC 空间分布特征的可行性不高.

(2) 整个研究区域的水体混合为非保守混合模式,对 DOM 地化特征的变化有一定贡献,但并非主导因素. 相比而言,沿岸输入(外源)才是 DOM 主要来源,同时降解和吸附等地化过程可能是导致该区域 DOM 特征变化较为复杂的重要原因.

(3) 水体沿岸土地利用类型对 DOM 有明显影响. 根据 DOM 特征变化,研究区域可分为两类:一类以沿岸为森林和农田生态系统为主;另一类以城市用地为主. 两者均显示出较强陆源输入特征;且后者出现类蛋白组分信号,表明人为活动对水体质量的影响明显.

参考文献:

- [1] Aiken G R, McKnight D M, Wershaw R L, *et al.* Humic substances in soil, sediment and water[M]. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [2] Tipping E, Rey-Castro C, Bryan S E, *et al.* Al (Ⅲ) and Fe (Ⅲ) binding by humic substances in freshwaters, and implications for trace metal speciation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66**(18): 3211-3224.
- [3] Hur J, Lee B M, Shin H S. Microbial degradation of dissolved organic matter (DOM) and its influence on phenanthrene-DOM interactions[J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(8): 1360-1367.
- [4] Neff J C, Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and a model[J]. *Ecosystems*, 2001, **4**(1): 29-48.
- [5] 付中敏. 山区河流弯曲干流型汇口水沙运动试验及数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [6] 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.
- [7] Sun L, Perdue E M, Meyer J L, *et al.* Use of elemental composition to predict bioavailability of dissolved organic matter in a Georgia river[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 714-721.
- [8] 钟润生, 张锡辉, 管运涛, 等. 三维荧光指纹光谱用于污染河流溶解性有机物来源示踪研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(2): 347-351.
- [9] Bocaniov S A, Barton D R, Schiff S L, *et al.* Impact of tributary DOM and nutrient inputs on the nearshore ecology of a large, oligotrophic lake (Georgian Bay, Lake Huron, Canada) [J]. *Aquatic Sciences*, 2013, **75**(2): 321-332.
- [10] Moreira-Turcq P F, Seyler P, Guyot J L, *et al.* Characteristics of organic matter in the mixing zone of the Rio Negro and Rio Solimões of the Amazon River [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(7): 1393-1404.
- [11] Roth V N, Dittmar T, Gaupp R, *et al.* Latitude and pH driven trends in the molecular composition of DOM across a north south transect along the Yenisei River [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **123**: 93-105.
- [12] Abe Y, Maie N, Shima E. Influence of irrigated paddy fields on the fluorescence properties of fluvial dissolved organic matter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, **40**(4): 1266-1272.
- [13] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices[J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3-4): 357-380.
- [14] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**(5): 948-953.
- [15] 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.
- [16] Coble P G, Spencer S A, Blough N V, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy[J]. *Nature*, 1990, **348**(6300): 432-435.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [19] Dilling J, Kaiser K. Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry [J]. *Water Research*, 2002, **36**(20): 5037-5044.
- [20] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337**(2): 133-149.
- [21] Artinger R, Buckau G, Geyer S, *et al.* Characterization of groundwater humic substances: influence of sedimentary organic carbon[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, **15**(1): 97-116.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(4): 742-

- 746.
- [26] Wickland K P, Neff J C, Aiken G R. Dissolved organic carbon in alaskan boreal forest: Sources, chemical characteristics, and biodegradability[J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(8): 1323-1340.
- [27] Patel-Sorrentino N, Mounier S, Benaim J Y. Excitation-emission fluorescence matrix to study pH influence on organic matter fluorescence in the Amazon basin rivers[J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2571-2581.
- [28] Wu F C, Mills R B, Cai Y R, *et al.* Photodegradation-induced changes in dissolved organic matter in acidic waters [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, **62**(5): 1019-1027.
- [29] 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.
- [30] Helms J R, Stubbins A, Perdue E M, *et al.* Photochemical bleaching of oceanic dissolved organic matter and its effect on absorption spectral slope and fluorescence [J]. *Marine Chemistry*, 2013, **155**: 81-91.
- [31] Wang H, Holden J, Zhang Z, *et al.* Concentration dynamics and biodegradability of dissolved organic matter in wetland soils subjected to experimental warming [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 907-916.
- [32] Ferrari G M, Dowell M D, Grossi S, *et al.* Relationship between the optical properties of chromophoric dissolved organic matter and total concentration of dissolved organic carbon in the southern Baltic Sea region[J]. *Marine Chemistry*, 1996, **55**(3-4): 299-316.
- [33] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* A preliminary study of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in lake Taihu, a shallow subtropical lake in China[J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2005, **33**(4): 315-323.
- [34] Wu F C, Xing B S. Natural organic matter and its significance in the environment[M]. Beijing: Science Press, 2009, 27-39.
- [35] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [36] Fu P Q, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Fluorescence characterization of dissolved organic matter in an urban river and its complexation with Hg(II) [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**(8): 1668-1679.
- [37] 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.
- [38] 傅平青, 吴丰昌, 刘丛强, 等. 太阳辐射对溶解有机质荧光光谱特征的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(3): 471-474.
- [39] 高洁, 江韬, 闫金龙, 等. 天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程: 以涪江-嘉陵江为例[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 160-170.
- [40] Pérez M A P, Moreira-Turcq P, Gallard H, *et al.* Dissolved organic matter dynamic in the Amazon Basin: sorption by mineral surfaces[J]. *Chemical Geology*, 2011, **286**(3-4): 158-168.
- [41] Callahan J, Dai M H, Chen R F, *et al.* Distribution of dissolved organic matter in the Pearl River estuary, China [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 211-224.
- [42] Hughes S, Reynolds B, Roberts J D. The influence of land management on concentrations of dissolved organic carbon and its effects on the mobilization of aluminium and iron in podzol soils in Mid-Wales[J]. *Soil Use and Management*, 1990, **6**(3): 137-145.
- [43] 陈茂福, 吴静, 律严励, 等. 城市污水的三维荧光指纹特征[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 578-582.
- [44] Muller C L, Baker A, Hutchinson R, *et al.* Analysis of rainwater dissolved organic carbon compounds using fluorescence spectrophotometry [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(34): 8036-8045.
- [45] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 1-12.
- [46] 蒋凤华, 杨黄浩, 黎先春, 等. 胶州湾海水溶解有机物三维荧光特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(9): 1765-1769.
- [47] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 145-155.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijiang River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行