

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

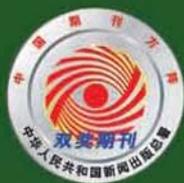
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2015年北京市两次红色预警期间PM<sub>2.5</sub>浓度特征 ..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM<sub>2.5</sub>变化特征对气象因素的响应 ..... 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM<sub>2.5</sub>中芳香酸的测定及来源解析 ..... 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 ..... 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 ..... 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 ..... 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 ..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 ..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO<sub>2</sub>交换通量变化过程及其环境影响 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 ..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 ..... 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 ..... 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 ..... 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 ..... 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 ..... 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 ..... 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 ..... 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 ..... 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 ..... 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 ..... 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 ..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 ..... 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 ..... 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 ..... 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 ..... 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 ..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 ..... 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 ..... 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 ..... 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX<sub>2</sub>的筛选及脱氮特性 ..... 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 ..... 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 ..... 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 ..... 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 ..... 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N<sub>2</sub>O排放及其影响因素 ..... 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N<sub>2</sub>O排放研究 ..... 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 ..... 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 ..... 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 ..... 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 ..... 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 ..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 ..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 ..... 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其NH<sub>3</sub>-SCR活性探究 ..... 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

# 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征：荧光光谱

梁俭<sup>1</sup>, 江韬<sup>1,2\*</sup>, 卢松<sup>1</sup>, 魏世强<sup>1</sup>, 王定勇<sup>1</sup>, 陈雪霜<sup>1</sup>, 王齐磊<sup>1</sup>

(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, Sweden Umeå SE-90183, Sweden)

**摘要:** 作为水体 DOM 的重要来源, 消落带土壤淹水释放过程十分重要. 本文以三峡库区典型消落带土壤为例, 通过模拟正常淹水和厌氧淹水的两种条件, 利用荧光光谱, 着重定性地分析并讨论了土壤向上覆水体释放 DOM 的动态特征. 结果表明, 消落带 4 个区域土壤淹水后产生的 DOM 荧光特性, 呈现出和可见-紫外光谱相似特征, 对上覆水体 DOM 荧光特征有重要贡献. 淹水初期的快速释放及后期去除机制, 是水体 DOM 荧光组分的动态“源-汇”平衡的关键; 其中类腐殖峰(A 和 C)受无机矿物相的吸附-释放影响明显, 而类蛋白峰(B 和 T)受微生物影响较为明显. 另外, 所有土壤淹水释放后水体 DOM 均呈现出“内源+外源”的复合特征. 除忠县石宝寨(SB)外, 整个淹水周期, 其余区域土壤在厌氧和正常淹水条件下, 水体 DOM 荧光特征的差异性不明显, 这可能与土壤自身组成(例如无机矿物组成和有机组分)的复杂程度有关. 结合可见-紫外光谱, 两种技术相互补充, 证明了土壤释放(“源”)和去除(“汇”)机制是控制 DOM 动态变化的重要因素; 而淹水初期的较强芳香性和腐殖化程度, 以及较强的陆源特征, 无疑有利于进一步解释污染物在淹水过程中的环境行为, 为进一步了解 DOM 的环境角色提供数据基础和实验支撑.

**关键词:** 溶解性有机质; 三峡库区; 消落带; 淹水; 溶解性有机碳; 三维荧光光谱; 土壤

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2506-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.012

## Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas: Fluorescence Spectra

LIANG Jian<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1,2\*</sup>, LU Song<sup>1</sup>, WEI Shi-qiang<sup>1</sup>, WANG Ding-yong<sup>1</sup>, CHEN Xue-shuang<sup>1</sup>, WANG Qi-lei<sup>1</sup>

(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:** As an important sources of dissolved organic matter (DOM) in aquatic system, DOM releases from flooding or submerged soils is a key process in water-level fluctuation zones. In this study, four typical sites in water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas were selected to conduct simulated soil flooding experiments, under ambient (open air) and anoxic conditions. By using fluorescence spectrum technique, the dynamic and geochemical characteristics of DOM releases from flooding soils were investigated. Results showed that the trend or model of DOM releases observed by fluorescence spectrum in all soils from four sampling sites was similar to the observation by UV-Vis spectrum. Fluorescence property of DOM releases showed an important contribution to DOM fluorescence in overlying waters. The rapid releases at initial stage and removal mechanism for later dynamic equilibrium were crucial to explain the dynamic “source-sink” equilibrium in whole flooding period. Effect of inorganic mineral adsorption-desorption on humic-like components (A and C peaks) was significant. Also, impact of microbial utilization on protein-like components (B and T peaks) was confirmative. Additionally, all DOM samples had “autochthonousness plus allochthonousness” property. Except Shibaozhai (SB) site in Zhongxian county, during the whole flooding period, all three other sites didn't show any significant difference between ambient and anoxic conditions. They could be explained by the high heterogeneity of soil property including minerals and organic components. Meanwhile, both the UV-Vis and fluorescence spectra were complementary for each other, and they essentially showed that the “source-sink” (release and removal) mechanism in DOM releases from submerged soils was the core to decide the dynamics of DOM in overlying waters. Importantly, DOM showed higher aromaticity and humification at the initial release stage when flooding occurred, as well as the greater terrestrial source characteristics, which further helped to explain the environmental fates of pollutants in these environmental sensitive areas. It would also be useful for unveiling the role of DOM in environmental system in future.

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41403079); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA20021); 重庆市博士后科研项目(Xm2014023); 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基金重点项目(XDJK2015B035)

作者简介: 梁俭(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为天然有机质的环境地球化学, E-mail: liangjian1071@163.com

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

**Key words:** dissolved organic matter (DOM); Three Gorges Reservoir Areas; water-level fluctuation zone; flooding; dissolved organic carbon (DOC); three-dimensional fluorescence spectrum; soil

溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 广泛存在于土壤与沉积物中, 以极其活跃的化学特征在土壤圈与其他圈层的物质交换中起着重要作用, 对全球碳循环有着重要的影响<sup>[1]</sup>. 水体 DOM 来源主要包括内源 (例如微生物和藻类代谢), 和因地表径流和渗流产生的陆源输入; 而在诸如湿地、河滨带、潮间带、水稻田和消落带等受水位消涨影响明显的区域, 淹水土壤向上覆水体释放 DOM 也是其重要输入途径. 又因为沉积物与上覆水间 DOM 的迁移转化影响着水生生态系统的物质转化与平衡, 对各种污染物的环境行为产生影响. 环境系统中, 单纯利用 DOC 浓度和污染物浓度的相关性分析, 并不是解释 DOM 在污染物环境中角色的充分必要条件<sup>[2-4]</sup>; 而通过进一步对 DOM 性质、来源和结构上的分析, 可以提供更多 DOM 和污染物之间相互关系的信息<sup>[5]</sup>. 因此, 对该淹水过程释放 DOM 性质的研究就显得十分必要.

作为全球最大的水位消落区域, 三峡库区消落带以其独特的干湿交替特征成为环境敏感性生态系统, 一直受到广泛关注<sup>[6,7]</sup>. 目前已有部分研究工作系统讨论了水体和土壤 DOM 的地球化学特征<sup>[8-12]</sup>, 但对土-水体系释放过程的关注还鲜见报道. 基于此, 本研究采用了通过实验室淹水模拟实验, 采用厌氧淹水与正常淹水处理, 通过紫外-可见

吸收光谱和荧光光谱, 定量定性分析并讨论了两种淹水条件下土壤-上覆水间 DOM 的释放迁移规律. 在之前的报道中, 笔者着重利用可见-紫外光谱解析 DOM 性质特征; 而本研究则进一步采用荧光光谱对 DOM 进行深度解析; 尤其在定性方面, 利用 DOM “释放-去除” 机制主导的 “源-汇” 观点, 定量定性分析并讨论了两种淹水条件下 (厌氧淹水和正常淹水), 土壤-上覆水间 DOM 的释放迁移规律. 有助于了解以 DOM 为代表的天然有机质, 在三峡库区消落带生态系统中所起到的重要作用.

## 1 材料与方法

供试土壤采集、理化性质与实验方法见文献 [13]. DOM 的吸收光谱采用 Horiba 公司 Aqualog<sup>®</sup> 荧光光谱仪进行测定. 该光谱仪可以同时测定吸收和荧光光谱. 荧光光谱扫描操作具体为: 以 Millipore<sup>®</sup> 纯水作空白, 光源为 150W 无臭氧氙弧灯, 激发波长 ( $E_x$ ) 范围 230 ~ 450 nm, 增量 5 nm; 发射波长 ( $E_m$ ) 范围 250 ~ 620 nm. 扫描信号积分时间为 3 s, Aqualog<sup>®</sup> 系统自动校正瑞利和拉曼散射. 荧光峰在 Origin 8.5 软件上利用 peak pick 功能识别, 荧光峰解析参考文献 [14]. 本研究中相关荧光参数如表 1 所示. 实验数据分析在 SPSS 17.0 中进行, 图形制作在 Origin 8.5 和 Excel 2013 中处理.

表 1 荧光光谱参数描述

Table 1 Descriptions of fluorescence spectra parameters

荧光光谱参数	定义	参数意义描述
$r_{(A/C)}$	荧光峰 A 与荧光峰 C 荧光强度比值	与 DOM 降解、腐殖化发育程度有关 <sup>[15]</sup>
$r_{(T/C)}$	荧光峰 T 与荧光峰 C 荧光强度比值	评估内源对 DOM 贡献, 比值越大表明类蛋白组分越多, 受微生物活动等内源影响越大; 也用于评估 DOM 受人为干扰的影响 <sup>[16,17]</sup>
荧光指数 (FI)	$E_x = 370 \text{ nm}, E_m = 470 \text{ nm}$ 和 $520 \text{ nm}$ 处的荧光发射强度比值 ( $f_{470/520}$ )	表征 DOM 来源, FI > 1.9 表示 DOM 主要源于微生物活动, 以内源输入为主 (自生源特征较为明显); FI < 1.4 则以陆源输入为主 (异生源特征明显), 微生物活动等贡献相对较低 <sup>[18]</sup>
腐殖化指数 (HIX)	$E_x = 254 \text{ nm}, E_m$ 在 $435 \sim 480 \text{ nm}$ 区域积分值 ( $\int_{435-480}$ ) 除以 $300 \sim 345 \text{ nm}$ 区域积分值 ( $\int_{300-345}$ )	表征 DOM 腐殖化程度, 高 HIX 值表明 DOM 腐殖化程度较高, 结构可能更复杂 <sup>[19]</sup>
自生源指数 (BIX)	$E_x = 310 \text{ nm}, E_m = 380 \text{ nm}$ 与 $430 \text{ nm}$ 处荧光强度比值 ( $f_{380/430}$ )	该值反映 DOM 自生源相对贡献, BIX 值越大, 自生源特征越明显, 类蛋白组分贡献越大, 生物可利用性越高 <sup>[20]</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 荧光峰变化特征

依据参考文献 [14], 本研究共识别 2 类 4 个荧

光峰: 类腐殖峰有荧光峰 A ( $E_x/E_m = 250 \sim 260 \text{ nm}/380 \sim 480 \text{ nm}$ ): 紫外光区类腐殖荧光峰; 荧光峰 C ( $E_x/E_m = 330 \sim 350 \text{ nm}/420 \sim 480 \text{ nm}$ ): 可见光区类腐殖荧光峰. 类蛋白峰包括荧光峰 B ( $E_x/$

$E_m = 230 \text{ nm}/300 \sim 320 \text{ nm}$ ): 类酪氨酸荧光峰; 荧光峰 T ( $E_x/E_m = 230 \text{ nm}/320 \sim 350 \text{ nm}$ ): 类色氨酸荧光峰. 由图 1, SB 的 A 峰、C 峰信号最大, 厌氧和正常淹水的均值为  $70\ 716.07 \pm 26\ 161.68$ 、 $54\ 290.14 \pm 13\ 096.67$ ; FL 最小, 分别为  $18\ 442.14 \pm 5\ 428.09$  (厌氧)、 $8\ 434.36 \pm 2\ 605.68$  (正常). 荧光峰 A、C 和

DOC、CDOM 的变化基本一致, 其中, 和 DOC 变化相关性达  $0.87 \sim 0.95$  ( $P < 0.01$ ); 和 CDOM 的相关性达  $0.95 \sim 0.96$  ( $P < 0.01$ ). 和 DOC 与 CDOM 类似, 荧光特征峰变化也可分为快速释放增长期, 22 d 左右达到最大值, 随后进入缓慢下降期; 在 40 d 以后荧光峰浓度逐渐趋于稳定(稳定期).

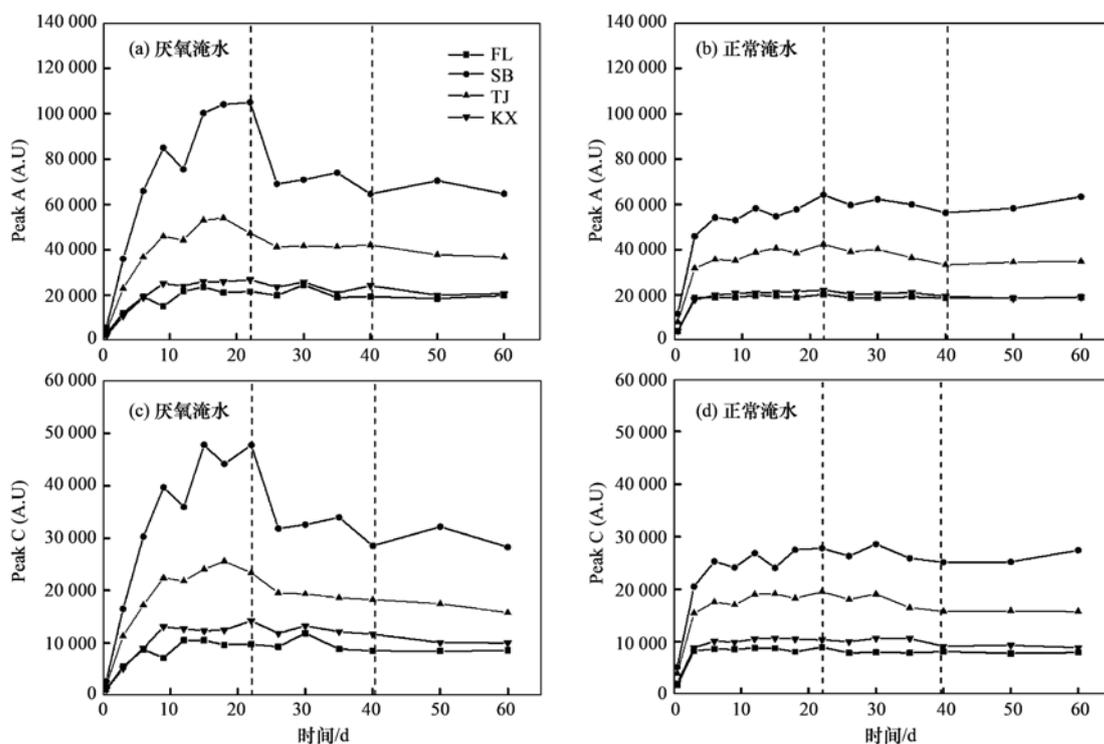


图 1 两种处理上覆水 A 峰与 C 峰浓度变化

Fig. 1 Changes of fluorescence peaks A and C in the overlying waters between two treatments

在土壤淹水释放过程中, 淹水初期 DOC 和 CDOM 增加伴随着各荧光组分含量升高, 浓度梯度差是其主要的驱动因素; 同时又受到多种去除作用的影响, 其中, 水体含氧量是控制 DOM 释放特征的重要因素, 它会影响底泥及水体中无机矿物的氧化-还原、沉降-溶解过程, 另外, 虽然空气中氧气仅能渗入表层沉积物几毫米或几厘米<sup>[21, 22]</sup>, 但沉积物表层中铁、锰氧化物的变化也能显著影响 DOM 释放<sup>[23~26]</sup>. 由于底泥与水体中铁、锰氧化物较易吸附 DOM 芳香性高的组分 (例如类腐殖质组分)<sup>[27, 28]</sup>, 还原条件下发生还原性溶解使得吸附的 DOM 得到释放; 但微生物的分解及固相界面的吸附, 仍会导致荧光组分含量降低. 本研究中, 仅忠县石宝寨 (SB) 土壤在两种淹水条件下出现 A、C 峰显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而其他地点并未出现明显不同, 这与 DOC、CDOM 的观测一样. 这可能与底泥土壤有机质 (SOM) 含量有关: 土壤有机质含量越高, 在淹水

过程中向上覆水体释放的可能性越大<sup>[29]</sup>, 因而在淹水过程中受去除机制影响更加明显. 此外, 无定型铁是土壤/底泥中非常重要的无机矿物 (金属氧化物), 对 DOM 的吸附与固持起着十分重要的重要, 尤其是较易于吸附芳香性较高的大分子结构组分, 使得 DOM 在和无定型铁的相互作用过程中发生分组 (fractionation), 这也是水体 DOM 去除机制之一. 和其他区域相比, SB 土壤中较高的总铁含量 ( $30.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 2.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和无定型铁含量 ( $7.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 1.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 也可能是另一重要原因.

另外, 荧光峰 T, B 属于类蛋白组分, 与类腐殖质组分相比, 稳定性较低, 微生物可利用性较高. 从图 2 可知, 类蛋白组分变化规律与类腐殖质峰明显不同, 变化更为复杂: 其中, T 峰总体上在淹水初期迅速达到最大值, 之后虽有波动涨落, 但含量均低于前期, 这与文献研究相似<sup>[30]</sup>. 表明短暂的淹水初期 (增长期) 后, T 峰的去存量始终高于底泥的释放量,

去除机制占主导——这与微生物的降解作用有关。尽管在两种体系下微生物种类会有所差异,但和类腐殖峰相比,类蛋白组分在微生物降解过程中会被优先降解,尤其是类色氨酸 T 峰<sup>[30-32]</sup>,这也可以解释 A、C 峰的下降期出现时间较 B、T 峰会有所滞

后;同时也是类蛋白峰在淹水后期变异程度(24.26%~50.75%)明显高于类腐殖峰(22.40%~37.00%)的重要原因。另外,B 峰所代表的类酪氨酸组分较 T 峰降解程度高<sup>[31]</sup>,因此 B 峰在整个淹水周期内有较长的积累过程。

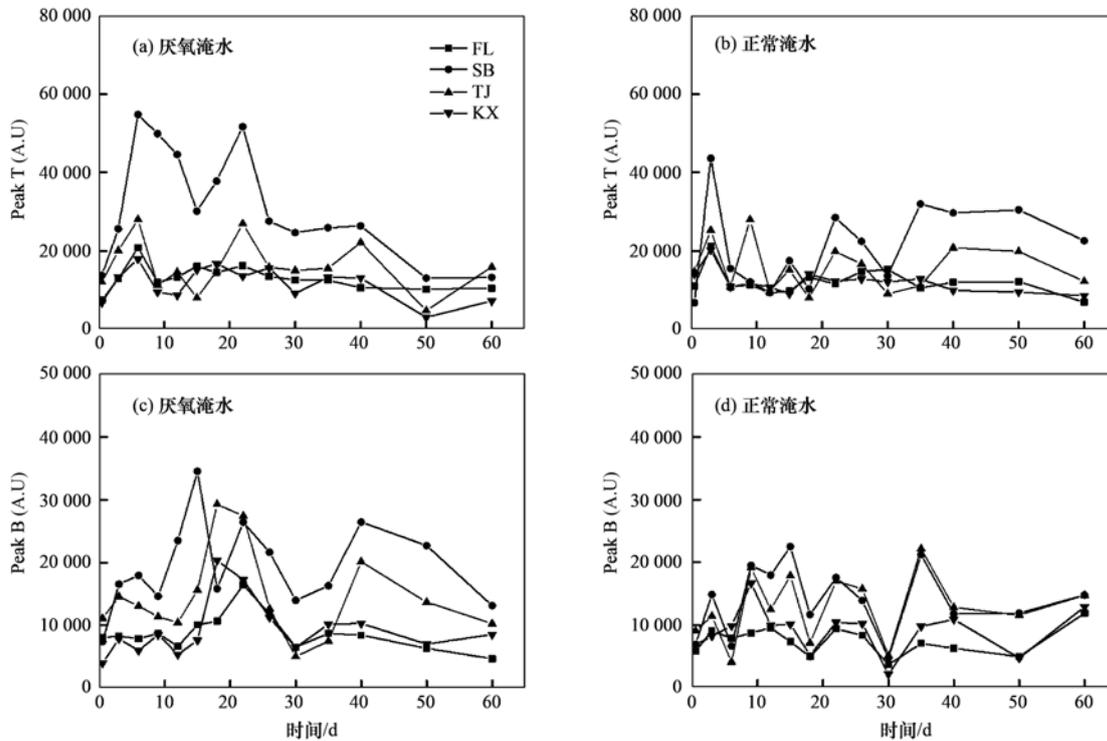


图2 两种处理上覆水 T 峰与 B 峰浓度变化

Fig. 2 Changes of fluorescence peaks T and B in the overlying waters between two treatments

通过相关性分析(表2),两种处理上覆水4个荧光峰与 DOC、CDOM 均呈显著相关( $P < 0.01$ ),表明底泥/沉积物淹水释放是水体荧光组分重要来源之一,在其“源-汇动态交换”过程中起着重要作用;而荧光峰差异性也是解释 DOC 和 CDOM 变动的重要原因。同时,正常淹水相关系数低于厌氧淹水,说明前者可能由于水体含氧量增加而导致淹水释放 DOM 更复杂,这与紫外光谱特征一致;另外,相关系数变化较大的为类蛋白组分(T、B 峰),

这也印证了前面的分析,即类蛋白组分具有较高的生物可利用性,而类腐殖组分稳定性较高。

## 2.2 荧光光谱特征参数

对于自然水体而言,荧光指数(FI)作为 DOM 来源的重要评价指标,当  $FI > 1.9$  表明 DOM 主要源于水体内微生物、藻类活动,自生源特征明显;当  $FI < 1.4$  时 DOM 则以外源输入为主,陆源特征明显,水体自身生产力贡献相对较低<sup>[11,33]</sup>。自生源指数(BIX)反映 DOM 内源相对贡献: BIX 在 0.6~0.7 之间,DOM 自生组分较少;  $BIX > 1$  时,类蛋白组分贡献大,生物可利用性高<sup>[15]</sup>。腐殖化指数(HIX)来表征 DOM 腐殖化程度:  $HIX < 4$ ,表明 DOM 腐殖化程度较低,主要由微生物或藻类活动产生;  $HIX > 10$ ,则具有较强的腐殖化特征<sup>[34,35]</sup>。由图3,两种处理下4个区域土壤上覆水 DOM 的 FI 均值为 1.54~1.66(厌氧)、1.55~1.68(正常); BIX 为 0.61~0.70(厌氧)、0.61~0.71(正常),两种处理下 FI 与 BIX 均差异不显著;而腐殖化指数(HIX)

表2 两种处理荧光峰 A、C 与 DOC、CDOM 相关性<sup>1)</sup>

Table 2 Correlations among A, C and DOC,

CDOM in two different treatments

项目	厌氧淹水		正常淹水	
	DOC	CDOM	DOC	CDOM
Peak A	0.94 **	0.96 **	0.87 **	0.95 **
Peak C	0.95 **	0.96 **	0.88 **	0.95 **
Peak T	0.76 **	0.79 **	0.40 **	0.46 **
Peak B	0.73 **	0.71 **	0.53 **	0.57 **

1) \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关

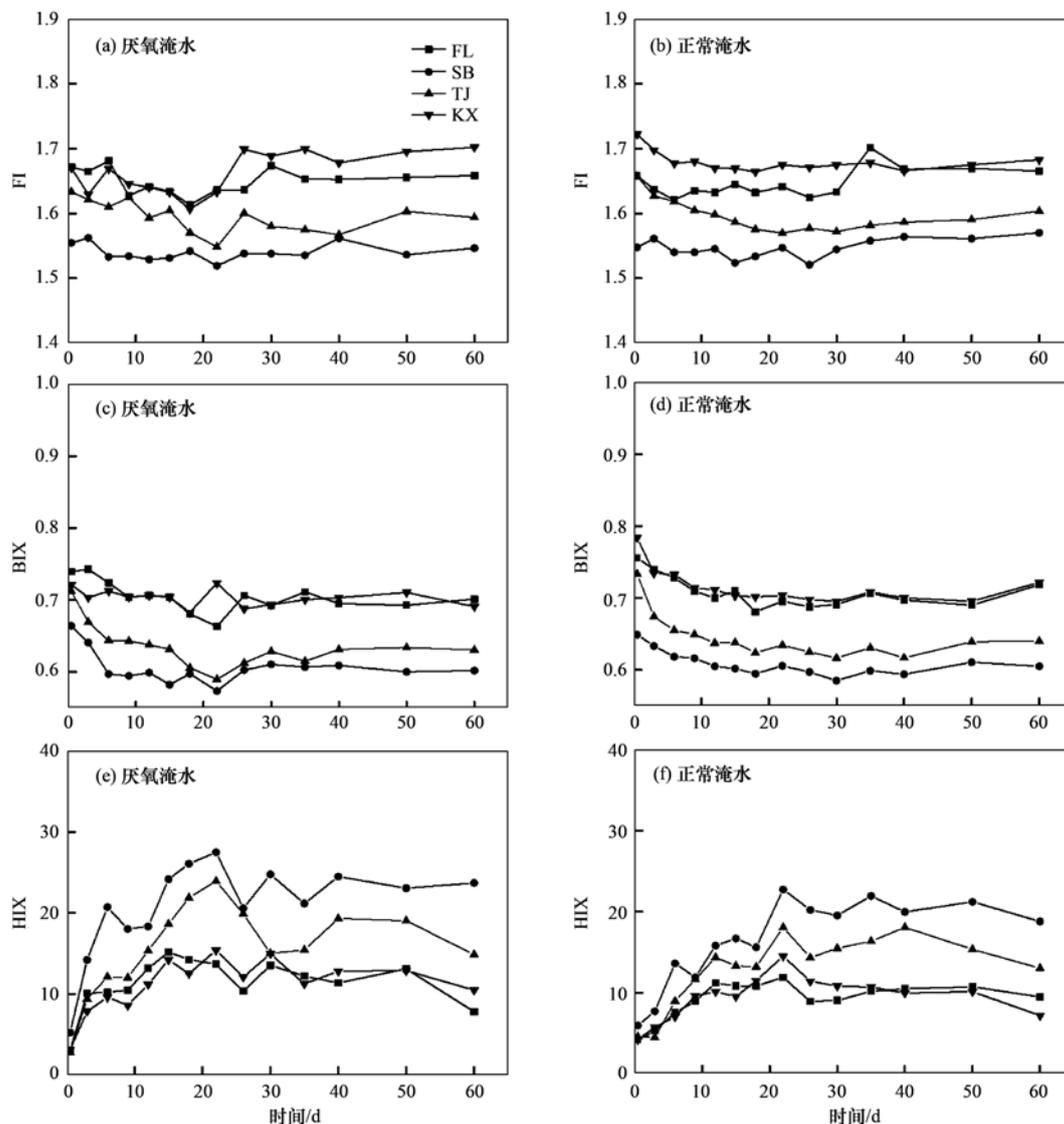


图3 两种处理上覆水 FI、BIX 和 HIX 值

Fig. 3 FI, BIX and HIX of DOM in overlying waters in two treatments

变化趋势亦与紫外  $SUVA_{280}$  相似, HIX 为 11.21 ~ 20.86(厌氧)、9.24 ~ 16.54(正常), 仅 SB 样本差异显著 ( $P < 0.05$ ). 光谱特征参数表明, 上覆水 DOM 陆源特征较强, 腐殖化程度较高, 自生源特征较弱. 尤其是 BIX 低于库区消落带水体, 但仍说明除水体内部微生物和藻类活动等内生活动外, 土壤淹水释放的 DOM, 其内源特征也是决定上覆水体内源特征的重要来源.

同时, 两种处理中, FI 和 BIX 均存在极显著正相关 ( $P < 0.01$ , 图 4), 而这种相关性独立于淹水处理方式, 说明无论厌氧和正常淹水条件下, 较高生物代谢活动产生的较高内源特征, 是 FI 值增加并靠近 1.9(内源)的主要原因. 对比类似研究的荧光光谱特征参数发现, 本实验与韩国 Uiam 湖<sup>[30]</sup>相似, 较高

的 FI 值(1.62 ~ 1.79)对应了较高的 BIX(0.71 ~ 0.89)和较低的 HIX(1.7 ~ 3.3); 但与国内某水库湖底表层沉积物<sup>[36]</sup>的研究不同, 可能由于该研究体系中微生物的生长及代谢增加了沉积物-水界面间的生源性 DOM 成分, 使得 FI 值好氧( $1.94 \pm 0.12$ )高于厌氧( $1.73 \pm 0.09$ ); 另外湖底表层沉积物类蛋白质含量较高, 芳香性较弱, 微生物丰富, 在好氧淹水的释放过程中, 微生物活动与代谢在淹水时(尤其是好氧淹水)较易启动, 生物降解效果明显.

类腐殖荧光峰 A 峰主要由低分子量(高荧光效率)组分组成, C 峰则来自相对稳定高分子量组分, 降解潜能较大、降解程度低. 因此  $r_{(A/C)}$  值用来反映 DOM 中类腐殖组分发育程度,  $r_{(A/C)}$  值越大, DOM 中稳定腐殖组分越低. 采用类蛋白峰(T)与类腐殖

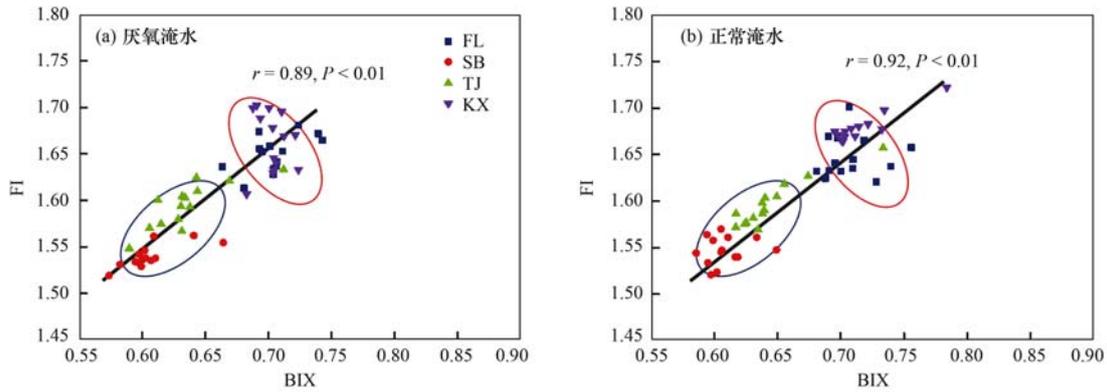
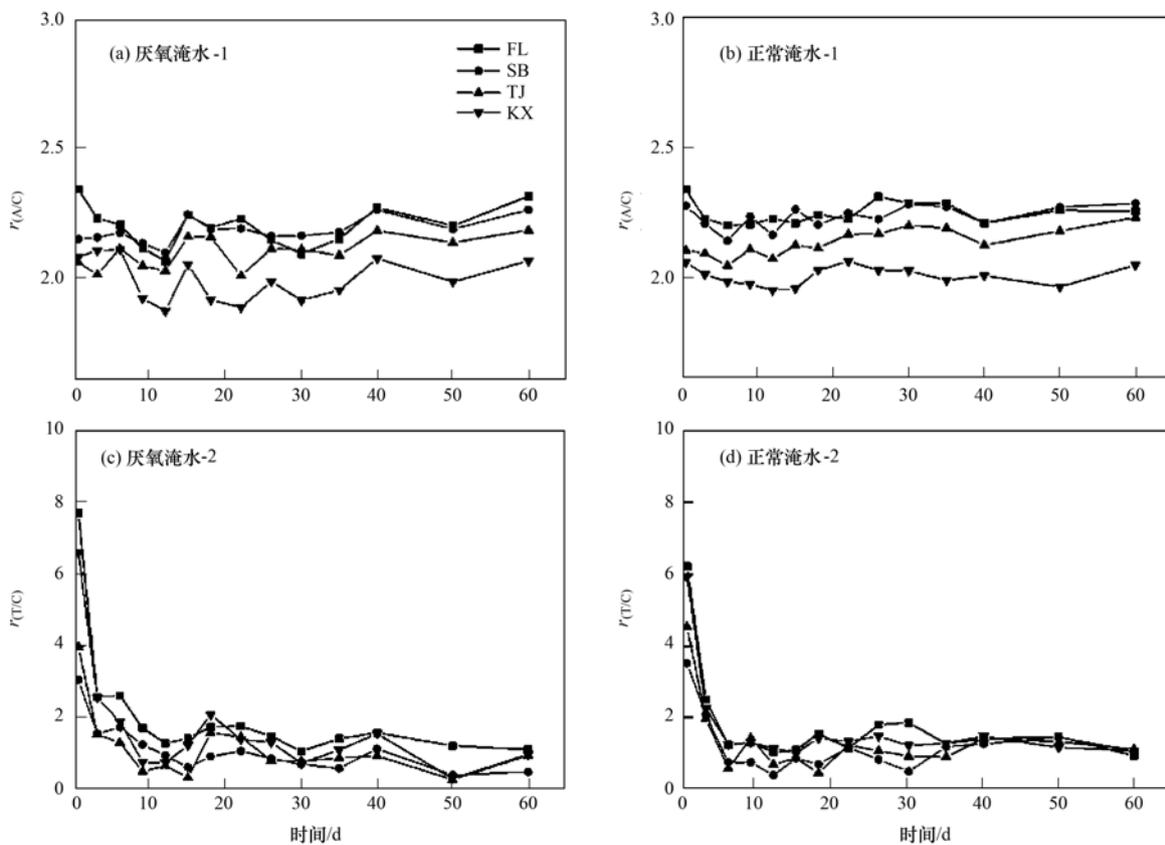


图 4 两种处理上覆水 FI 与 BIX 的相关性

Fig. 4 Correlations between FI and BIX in DOM of overlying waters in two treatments

图 5 两种处理上覆水  $r_{(A/C)}$ 、 $r_{(T/C)}$ Fig. 5 The  $r_{(A/C)}$  and  $r_{(T/C)}$  of DOM in overlying waters from two different treatments

峰(C)的比值  $r_{(T/C)}$ , 用来评价内源贡献率的比重<sup>[15,17,37]</sup>. 如图 5, 由于类腐殖组分较类蛋白组分稳定,  $r_{(A/C)}$  没有明显的变化趋势, 均值为 1.99 ~ 2.20 (厌氧) 和 2.00 ~ 2.24 (正常), 其中 SB 厌氧为  $2.18 \pm 0.05$ , 正常为  $2.23 \pm 0.05$ , 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 说明仅对 SB 而言, 正常淹水条件下氧气含量较高使得微生物活性较高, 对高分子组分的降解程度较大<sup>[38]</sup>.  $r_{(T/C)}$  均值为 1.10 ~ 2.05 (厌氧) 和 1.19 ~ 1.78 (正常), 变化趋势在两种处理

下相似, 随着 T 峰的降解以及 C 峰的释放,  $r_{(T/C)}$  快速降低.

### 2.3 主成分分析

进一步, 对紫外和荧光各参数进行主成分分析 (PCA), 在厌氧和正常淹水下, 均得出特征根大于 1 的 2 个主因子 (图 6), 两个主因子分别解释总体变量的 81.18% (厌氧) 与 76.11% (正常). 两处理的主成分分析结果基本一致. DOC、CDOM [ $a(355)$ ]、SUVA<sub>280</sub>、HIX 及 4 个荧光峰在主成分 1

中有较高载荷,因此主成分1可能与底泥释放有关;主成分2与 $S_R$ 、 $r_{(T/C)}$ 关系紧密,可能与体系中的去除机制(例如无机矿物吸附)及微生物降解有关.从图6可知,因子1与FI、BIX成反比,即底泥释放量越大,FI、BIX值越低,与图3(a)~3(d)反映的规律一致;而正常淹水下T峰在主因子2的载荷有所提升,由于T峰与微生物降解有关,说明正常淹水下氧气含量的增加,使得微生物的活性高于厌氧淹水,增加了沉积物-上覆水间的生物源成分,因此T峰在主因子2的载荷得以提升;而 $r_{(A/C)}$ 不仅与底泥释放有关,也受铁、锰氧化物、悬浮颗粒吸附等

影响,因此在两个主因子中均有一定的载荷.由于淹水释放过程中的“源-汇”、“释放-去除”机制使得上覆水体DOM结构和性质与土壤提取DOM(纯水或者盐离子溶液振荡离心提取)存在着明显差异,因此,本研究结果更接近于海洋DOM的情况<sup>[39]</sup>,而与土壤DOM的报道有所差异<sup>[11,12]</sup>.海洋DOM为水体DOM,受微生物、颗粒物等多种因素影响,而土壤DOM研究为按一定土水比提取,二者有一定的区别.本研究为土壤淹水释放过程中的上覆水DOM变化过程,因此在DOM的共性上与海洋DOM有一定相似,而与土壤DOM有所不同.

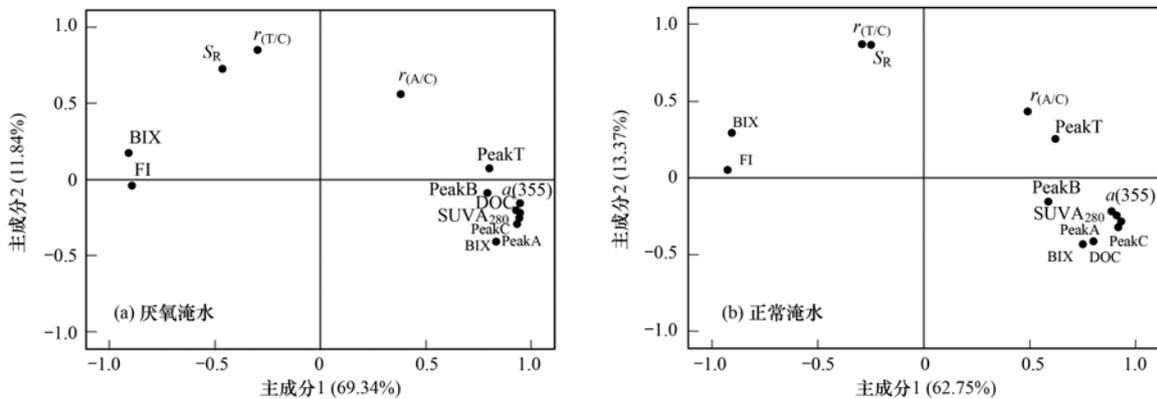


图6 两种处理上覆水DOM光谱特征的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis (PCA) of UV-Vis and fluorescence parameters of DOM in overlying waters of two treatments

2.4 不同区域对比

对比4个区域上覆水DOM荧光峰与相关参数发现(表3和表4),不同区域间的荧光光谱特征差异与紫外光谱相似.两种淹水条件下2类4个荧光峰均为SB最大,FL和KX最小,与DOC、CDOM大小顺序类似.与此相对应的是,SB样本FI、BIX值最小,HIX最大,说明在土壤淹水释放过程中,SB上覆水DOM腐殖化程度最高,自生源特征最弱;而FL与KX的FI、BIX值最大,HIX最小,内源特征较强.其中HIX的对比关系和SUVA<sub>280</sub>值(SB > TJ > FL和KX)相同.而由图4(a)和(b),相比于SB和TJ(蓝圈),位于长江干流FL和KX样本点

(红圈)的FI-BIX分布位置更高,意味着内源贡献更高.同时,结合可见-紫外光谱特征分析结论,土壤组成的差异性可能是导致区域差异的重要原因,其中最重要的3个因素包括:①土壤有机质含量、②无机矿物组成以及③微生物的种群多样性及丰富等.位于长江干流的忠县石宝寨(SB),土地利用类型属于“农田+林地”的复合生态系统,有机质和无机矿物组成都显著高于其余三处;而大量施用粪肥导致的营养物质积累,又使得微生物活性较高,因此,4个区域中仅有SB样本在两种处理下差异显著( $P < 0.05$ ),这与可见-紫外光谱分析基本一致.

表3 不同区域土壤厌氧淹水释放DOM的荧光参数对比<sup>1)</sup>

Table 3 Comparisons of fluorescence spectra parameters of DOM releases from flooding soils among four sampling sites (ambient treatment)

地点	荧光参数(厌氧淹水)								
	Peak A	Peak C	Peak T	Peak B	FI	BIX	HIX	$r_{(A/C)}$	$r_{(T/C)}$
FL	18 442.14c	8 434.36c	13 110.07c	8 801.17c	1.65a	0.70a	11.32c	2.20a	2.05a
SB	70 716.07a	32 290.36a	31 381.70a	19 367.21a	1.54c	0.61c	20.86a	2.18a	1.10a
TJ	39 234.29b	18 338.36b	16 092.57b	14 443.00b	1.59b	0.63b	15.70b	2.10b	1.14a
KX	21 061.64c	10 623.93c	11 674.14c	9 324.46c	1.66a	0.70a	11.21c	1.99c	1.66a

1) 同一参数同一列中的相同字母表示差异性不显著( $P > 0.05$ ),下同

表 4 不同区域土壤正常淹水释放 DOM 的荧光参数对比

Table 4 Comparisons of fluorescence spectra parameters of DOM releases from flooding soils among four sampling sites (anoxic treatment)

地点	荧光参数(正常淹水)								
	Peak A	Peak C	Peak T	Peak B	FI	BIX	HIX	$r_{(A/C)}$	$r_{(T/C)}$
FL	18 077.86c	7 843.24c	12 154.12c	7 475.02b	1.65b	0.71a	9.24c	2.24a	1.78a
SB	54 290.14a	24 290.48a	21 062.64a	13 979.02a	1.55d	0.61c	16.54a	2.23a	1.19a
TJ	35 027.07b	16 515.24b	15 833.14b	12 807.21a	1.60c	0.64b	12.94b	2.13b	1.33a
KX	19 181.71c	9 437.05c	12 073.81c	9 120.38b	1.68a	0.71a	9.45c	2.00c	1.67a

进一步,  $r_{(A/C)}$ 、 $r_{(T/C)}$  的区域间差异与荧光峰不同. 由于 T 峰的生物不稳定性,  $r_{(T/C)}$  主要受淹水初期 T 峰与 C 峰的影响导致差异不明显 ( $P > 0.05$ ); 而  $r_{(A/C)}$  中 FL 和 SB  $>$  TJ  $>$  KX ( $P < 0.05$ ), 这可能与整个土壤淹水物理-化学过程有关, 包括土壤自身性质、微生物作用、无机矿物等的影响, 因此还需要进一步的研究.

### 3 结论

(1) 消落带 4 个区域土壤淹水后产生的 DOM 荧光特性, 呈现出和可见-紫外光谱相似特征, 对上覆水体 DOM 荧光特征有重要贡献. 淹水初期的快速释放阶段, 及后期去除机制对荧光组分的影响, 是 DOM 动态“源-汇”平衡的关键; 其中类腐殖峰 (A 和 C) 受无机矿物相的吸附-释放影响明显, 而类蛋白峰 (B 和 T) 受微生物影响较为明显.

(2) 所有土壤淹水释放后 DOM 均呈现出“内源 + 外源”的复合特征, 结合野外观测水体 DOM 的 BIX 值可知, 底泥/土壤淹水释放也是天然水体 DOM 的重要来源. 另外, 淹水初期较高的腐殖化程度, 是控制整个淹水周期 DOM 芳香性特征和腐殖化程度的关键阶段.

(3) 除忠县石宝寨 (SB) 外, 厌氧和正常淹水条件下, DOM 荧光特征的差异性不明显, 这可能与土壤自身组成 (例如无机矿物组成和有机组分) 的复杂程度有关.

(4) 综上所述, 利用荧光光谱技术, 可以进一步解析三峡库区消落带土壤淹水产生的 DOM 地化特征, 是可见-紫外光谱特征的有力补充. 尽管两种不同淹水处理方式 (厌氧和正常) 的差异性还有待进一步详细研究, 但两种光谱所呈现出的 DOM 释放特征, 证明了释放 (“源”) 和去除 (“汇”) 机制是控制 DOM 动态变化的重要因素; 而淹水初期的较强芳香性和腐殖化程度, 以及较强的陆源特征, 无疑有利于人们进一步解析 DOM 的地球化学特征变化, 尤其对下一步深入了解 DOM 在污染物时空分布差异上的影响, 提供一定的科学数据和研究基础.

### 参考文献:

- [1] Battin T J, Luysaert S, Kaplan L A, *et al.* The boundless carbon cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 598-600.
- [2] 白薇扬, 张成, 唐振亚, 等. 长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3649-3661.
- [3] Yan H Y, Li Q H, Meng B, *et al.* Spatial distribution and methylation of mercury in a eutrophic reservoir heavily contaminated by mercury in Southwest China [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **33**: 182-190.
- [4] Belzile N, Lang C Y, Chen Y W, *et al.* The competitive role of organic carbon and dissolved sulfide in controlling the distribution of mercury in freshwater lake sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **405**(1-3): 226-238.
- [5] Schartup A T, Ndu U, Balcom P H, *et al.* Contrasting effects of marine and terrestrially derived dissolve organic matter on mercury speciation and bioavailability in seawater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(10): 5965-5972.
- [6] 周永娟, 王效科, 吴庆标, 等. 三峡库区消落带生态脆弱性与生态保护模式[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [7] 谢德体, 范小华. 三峡库区消落带生态系统演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [8] 黎司, 吉芳英, 周光明, 等. 三峡库区水体溶解有机质的荧光光谱特性[J]. *分析化学*, 2009, **37**(9): 1328-1332.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 梁俭, 江韬, 卢松, 等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2496-2505.
- [14] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [15] 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.
- [16] Galapate R P, Baes A U, Ito K, *et al.* Detection of domestic wastes in Kurose river using synchronous fluorescence spectroscopy[J]. *Water Research*, 1998, **32**(7): 2232-2239.
- [17] Baker A, Curry M. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills[J]. *Water Research*, 2004, **38**(10): 2605-2613.
- [18] 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.
- [19] Ohno T, Fernandez I J, Hiradate S, *et al.* Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties[J]. *Geoderma*, 2007, **140**(1-2): 176-187.
- [20] 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.
- [21] Rasmussen H, Jørgensen B B. Microelectrode studies of seasonal oxygen uptake in a coastal sediment; role of molecular diffusion [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, **81**(3): 289-303.
- [22] Neubacher E C, Parker R E, Trimmer M. Short-term hypoxia alters the balance of the nitrogen cycle in coastal sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(2): 651-665.
- [23] Skoog A, Hall P O J, Hulth S, *et al.* Early diagenetic production and sediment-water exchange of fluorescent dissolved organic matter in the coastal environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(19): 3619-3629.
- [24] Skoog A C, Arias-Esquivel V A. The effect of induced anoxia and reoxygenation on benthic fluxes of organic carbon, phosphate, iron, and manganese [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(23): 6085-6092.
- [25] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 2251-2259.
- [26] Yang L Y, Guo W D, Hong H S, *et al.* Non-conservative behaviors of chromophoric dissolved organic matter in a turbid estuary; roles of multiple biogeochemical processes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, **133**: 285-292.
- [27] Kaiser K, Guggenberger G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(7-8): 711-725.
- [28] Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, *et al.* Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(7): 1319-1331.
- [29] Kaiser K, Zech W. Rates of dissolved organic matter release and sorption in forest soils[J]. *Soil Science*, 1998, **163**(9): 714-725.
- [30] Yang L Y, Choi J H, Hur J. Benthic flux of dissolved organic matter from lake sediment at different redox conditions and the possible effects of biogeochemical processes [J]. *Water Research*, 2014, **61**: 97-107.
- [31] 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.
- [32] Hur J, Park M H, Schlautman M A. Microbial transformation of dissolved leaf litter organic matter and its effects on selected organic matter operational descriptors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(7): 2315-2321.
- [33] 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.
- [34] Salve P R, Lohkare H, Gobre T, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Rainwater Using Fluorescence Spectrophotometry [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(2): 215-218.
- [35] Birdwell J E, Valsaraj K T. Characterization of dissolved organic matter in fogwater by excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(27): 3246-3253.
- [36] 朱维晃, 黄廷林, 张亚宁. 氧化还原条件变化对上覆水体中溶解有机质的三维荧光光谱特征影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(12): 3272-3276.
- [37] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(7): 1377-1382.
- [38] Kelton N, Molot L A, Dillon P J. Spectrofluorometric properties of dissolved organic matter from Central and Southern Ontario streams and the influence of iron and irradiation [J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 638-646.
- [39] Burdige D J, Kline S W, Chen W H. Fluorescent dissolved organic matter in marine sediment pore waters [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 289-311.

## CONTENTS

Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During Two Red Alert Periods .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM <sub>2.5</sub> Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing .....	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City .....	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM <sub>2.5</sub> from the Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea .....	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang .....	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing .....	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors .....	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing .....	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO <sub>2</sub> Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China .....	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing .....	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin .....	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms .....	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes .....	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands .....	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine .....	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation .....	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes .....	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode .....	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation .....	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process .....	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water .....	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter .....	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation .....	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics .....	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX <sub>2</sub> from Sea Water .....	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges .....	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) .....	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions .....	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N <sub>2</sub> O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N <sub>2</sub> O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments .....	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter .....	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau .....	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China .....	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir .....	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil .....	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil .....	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism .....	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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