

环境科学

(HUANJING KEXUE)

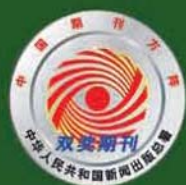
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 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, 刘骞, 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: 以重庆市马鞍山为例	
..... 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)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 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砷酸盐的响应	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, 邵义萍, 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 ₃ O ₄ 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, 郑伟 (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 ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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, 赵秀兰, 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旱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 ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -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：紫外-可见吸收光谱

梁俭¹, 江韬^{1,2*}, 卢松¹, 魏世强¹, 王定勇¹, 陈雪霜¹, 王齐磊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: 消落带土壤在淹水发生时释放溶解性有机质(DOM), 是上覆水体 DOM 的重要来源。但同时淹水释放 DOM 进行定量定性分析的报道并不多见。本文以三峡库区典型消落带为研究对象, 通过模拟实验, 利用紫外-可见吸收光谱, 研究了厌氧淹水和正常淹水条件下, 淹水土壤释放 DOM 的光谱特征。结果表明, 消落带 4 个区域土壤淹水均呈“快速释放-下降-动态平衡”释放规律; 释放速率和通量计算表明, DOM 释放呈现出“源-汇动态交换”特征。对比两种淹水处理, 尽管溶解性有机碳(DOC)和有色溶解性有机质(CDOM)无显著差异, 但厌氧淹水 DOM 芳香性(SUVA₂₈₀)高于正常淹水, 而光谱斜率比值(S_R)对不同淹水条件不敏感。同时, 厌氧淹水时, DOC 和 CDOM 的相关性也明显高于正常淹水。另外, 各区域土壤淹水释放 DOM 存在差异, 以忠县石宝寨土壤释放强度最高, 尽管土壤有机质含量是影响各区域土壤淹水释放 DOM 差异的重要原因之一, 但其他地化因素仍需考虑。因此, 仅仅关注 DOC 浓度变化并不足以完全描述 DOM 的释放特征。

关键词: 溶解性有机质; 三峡库区; 消落带; 淹水; 溶解性有机碳; 紫外-可见吸收光谱; 土壤

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2496-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.011

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 Jian¹, JIANG Tao^{1,2*}, LU Song¹, WEI Shi-qiang¹, WANG Ding-yong¹, CHEN Xue-shuang¹, WANG Qi-lei¹

(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: Water-level fluctuation zone is an important area in Three Gorges Reservoir areas, because dissolved organic matter (DOM) releases from submerged soils is a crucial source of DOM in overlying waters when flooding occurs. But there was little qualitative and quantitative analysis for DOM. In this study, soils of four typical water-level fluctuation zones were selected to conduct simulated flooding experiment. Also, UV-Vis spectroscopy was utilized to investigate the DOM spectral characteristics in two individual flooding sets including ambient (open air) and anoxic conditions. The results showed, for all soils, the DOM release patterns all showed a “rapid release, then decrease, and final dynamic equilibrium” trend. Also, through calculations of DOM releasing rates and fluxes, DOM releases clearly showed a feature of “source-sink dynamic exchange”. By comparison between two flooding treatments, although DOC and CDOM didn't show any significant differences, but higher aromaticity (SUVA₂₈₀) was observed in anoxic experiment. In contrast, spectra slope ratio (S_R) was insensitive to redox conditions of different flooding. Meanwhile, correlation between DOC and CDOM in anoxic was also higher than that in ambient flooding. Additionally, obvious differences among soils from different sampling sites were observed, Shibao Zhai (SB) of which showed the greatest releasing potential. Considering the various soil properties, soil organic matter amounts in soils is one of the key factors to explain the differences among sampling sites, but other geochemical factors should also be considered in the processes of DOM releases. Summarily, only focusing on the changes of DOC concentrations in submerging process is not enough to comprehensively describe the DOM release characteristics.

Key words: dissolved organic matter (DOM); Three Gorges Reservoir Areas; water-level fluctuation zone; flooding; dissolved organic carbon (DOC); UV-Vis absorption spectrum; soil

收稿日期: 2015-12-16; 修订日期: 2016-01-18

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

溶解性有机质(DOM)广泛分布于地球系统中,以其活跃的地球化学特性,积极参与到污染物环境行为过程中;同时作为碳循环重要组成部分,对全球气候变化也发挥着重要作用.通过地表径流、淋溶等过程,DOM由陆地系统进入水体;同时水体自身藻类和微生物的代谢活动也是重要的内生来源.除此之外,尤其是在湖泊、河流和海洋系统中,沉积物/底泥中的有机质能通过分解进入孔隙水^[1-3],并在浓度梯度作用下向上覆水体释放,成为水体DOM的又一重要来源——而DOM在土-水两相中的这种交换行为,深刻地影响着水生生态系统的物质转化与平衡,对各种污染物(尤其是重金属)的迁移转化和生物有效性等产生重要影响.因此,对该“内源(底泥/土壤)释放”过程的认识和了解,有助于进一步认识DOM的地化特征及环境角色.

三峡库区消落带作为全世界最大的水库型消落区,以其独特的“干湿交替”特征受到环境科学研究者广泛关注^[4,5].有研究表明,修建水坝等人为干扰会加速水体中有机碳的沉降^[6],而三峡库区消落带以其特有的非季节性“干湿交替”以及落干后的植被生长与人类的土地开采和利用,使其在落干后的淹水过程中沉积物对上覆水DOM的影响变得更为复杂.目前已有研究报道了湖泊和海洋底泥淹水释放DOM特征^[1,2,7-9],但大多以定量分析为主,缺少对DOM定性方面的关注,尤其是淹水过程中释放的DOM性质和组成会发生何种变化,报道较少.同时,尽管也已有相关文献对三峡库区消落带水体与土壤DOM进行研究^[10-13],但对于淹水过程中土壤与上覆水间DOM的迁移转化规律还未见报道,尤其在定性讨论方面.

另外,对于淹水土壤而言,深水区处于厌氧状态;而正常沿岸淹水区大多属于浅水区,由于水深较浅,与大气连通状态较好,氧气含量较深水区高.有少量研究对比了厌氧与好氧淹水土壤DOM释放^[9,14],但对于自然水体而言,水中氧气含量极少达到人工曝气后的富氧水平.对三峡库区消落带而言,水位变化导致的氧化-还原环境的变化,可能会

对土壤淹水释放产生重要影响.基于此,本研究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,定量定性地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,以期为认识三峡库区消落带DOM地化特征和生态环境作用提供研究基础,同时也有助于加深和丰富其他周期性淹水环境(例如湿地、水稻田、滨河带、潮间带等)中DOM地化特征的研究.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

2014年4月分别在三峡库区消落带4个采样点(图1):位于上游地区涪陵珍溪(FL)、中游地区忠县石宝寨(SB)和涂井乡(TJ),以及下游地区的开县汉丰湖(KX)进行土样采集.涪陵珍溪采样点位于长江干流,为典型农业小流域;忠县石宝寨位于长江干流,沿岸以农田坡耕地和林地为主;忠县涂井为支流回水区,相对封闭;开县汉丰湖采样点为长江支流回水区且位于城区内.根据文献[15]中土壤性质测定方法,测定土壤有机质(SOM),阳离子交换量(CEC),土壤pH和机械组成.土壤有机质为重铬酸钾法测定,以每kg土样中碳含量表示($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$).具体土壤理化性质见表1.

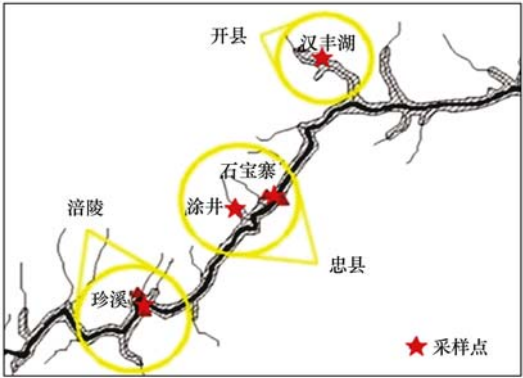


图1 三峡库区消落带采样地点
Fig. 1 Soil sampling locations in the water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas

表1 供试土壤相关理化性质

采样点	pH	土壤有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤 DOM		机械组成/%			
				DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$a(355)/\text{m}^{-1}$	<0.002 mm	<0.02 mm	0.02~0.25 mm	>0.25 mm
涪陵珍溪(FL)	8.57	8.19	19.03	33.78	12.44	23.00	47.00	32.60	0.40
忠县石宝寨(SB)	8.65	18.92	16.81	38.37	23.02	24.80	38.40	37.08	2.52
忠县涂井(TJ)	8.38	14.61	27.18	62.25	44.90	2.60	45.00	51.81	3.19
开县汉丰湖(KX)	8.41	9.79	17.08	74.64	134.98	7.20	33.80	57.80	7.00

1.2 淹水实验

风干土壤样本过 60 目筛后,称取 15 g 土样若干份,置于 100 mL 棕色培养瓶内,加入超纯水 (Millipore®, 电阻率 18.2 MΩ·cm),统一调节至土壤田间最大持水量 70% 后,陈化培养 3 d. 再按土水比 1:6 加入超纯水(水深约 6 cm),遮光条件下开始淹水实验. 为完全了解土壤淹水释放 DOM 潜能,本研究采用超纯水而未采用模拟江水或真实江水.

实验分为两种处理,其中厌氧处理为先向超纯水中通入高纯 N₂ 排除纯水中的溶解氧,使溶解氧浓度小于 0.5 mg·L⁻¹ 后迅速加入瓶内,并向瓶内充入高纯 N₂ 排除空气后加盖密封; 正常淹水则敞口保持与大气连通. 分别于实验开始后第 0、3、6、9、

12、15、18、22、26、30、35、40、50 和 60 d 采集上覆水样 50 mL,过 0.45 μm 混合纤维素酯水系滤膜后,4℃ 恒温冷藏保存,所有后续分析测试在 5 d 内完成. 该实验每个处理设 2 个重复.

1.3 光谱测定与分析

溶解性有机碳 (DOC) 采用 GE InnovOx® Laboratory TOC 分析仪测定,单位 mg·L⁻¹. DOM 吸收光谱在 Aqualog® 荧光光谱仪 (Horiba, 日本) 进行. 吸收光谱扫描步骤: 以 Millipore 水作空白,用光程 10 mm 石英比色皿在 230 ~ 800 nm 范围内进行吸收测定,并以 355 nm 处吸收系数 $a(355)$ 表示有色溶解性有机质 (color dissolved organic matter, CDOM) 相对浓度,参照文献 [10,11],相关吸收光谱参数如表 2 所示.

表 2 紫外-可见吸收光谱参数描述^[10]

Table 2 Descriptions of ultraviolet-visible absorption spectra parameters

紫外-可见光谱参数	计算公式	公式参数及描述
吸收系数 a	$a(\lambda) = 2.303 \cdot A(\lambda) / l$	$A(\lambda)$ 为波长 λ 处吸光度, l 为光程路径 (m) ^[16]
SUVA ₂₈₀	$SUVA_{280} = a(280) / DOC$	$a(280)$ 为波长 280 nm 吸收系数, DOC 为溶解性有机碳 (mg·L ⁻¹), 表征 DOM 芳香性, 值越大, 芳香性越高 ^[17]
光谱斜率比值 S_R	$S_R = S_{(275 \sim 295)} / S_{(350 \sim 400)}$ $a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)]$	S 为光谱斜率, λ_0 是参照波长 (nm); $S_{(275 \sim 295)}$ 和 $S_{(350 \sim 400)}$ 分别为波长范围 275 ~ 295 nm 和 350 ~ 400 nm S 值 (与 DOM 结构、分子量有关, 值越大表明 DOM 分子量越小) ^[17]

2 结果与讨论

2.1 DOC 和 CDOM 释放特征

DOC 和 $a(355)$ 分别表示上覆水体 DOM 浓度及 CDOM 浓度. 由于 DOM 释放过程受多种地化因素的影响,沉积物与上覆水的“源-汇”关系随淹水时间变化而改变. 总体上,两种淹水方式的 DOC 和 CDOM 释放量无明显差异 ($P > 0.05$),这与文献 [9] 类似. 两种处理的上覆水体 DOC 浓度变化规律较一致 [图 2(a)、2(b)],可分为 3 个阶段: ①快速释放增长区——DOC 呈现波动但整体趋于增加达最大 (22 d 左右); ②下降区——DOC 浓度开始缓慢下降; ③平稳区——基本在 40 d 左右 DOC 趋于稳定. 类似地,CDOM 浓度也呈现出和 DOC 相似的变化趋势 [图 2(c)、2(d)]. 因此,在不考虑光降解情况下,淹水初期阶段 (快速区),是决定整个淹水周期内上覆水体 DOC 浓度的关键阶段.

尽管 DOM 由淹水土壤/沉积物向上覆水迁移,土-水界面间的浓度梯度差是主要驱动机制;但在本研究中观察到 DOC 和 CDOM 增大过程中,发生的上下波动直至动态平衡,表明土壤释放 DOM 的过程仍受到多方面影响: ①DOM 从土壤固相界面的

解吸释放,导致浓度增加; ②但同时受到微生物降解、胶体与颗粒物的吸附沉淀、金属离子共沉淀、水解^[7,9,18,19]等去除作用,导致浓度降低. 最终的稳定是体系中各种作用相互平衡的结果. 根据近 3 年观测数据,库区消落带水体 DOC 浓度总体为 2 ~ 5 mg·L⁻¹,CDOM 浓度为 2 ~ 6 m⁻¹. 本研究上覆水 DOM 浓度与观测浓度相近,进一步证明土壤淹水释放是库区水体 DOM 重要来源.

CDOM 是 DOM 中可吸光部分,是 DOM 重要组成成分,它能显著改变水下光场,影响水体初级生产力,具有重要环境作用^[20~22]. 有研究发现,在海洋、湖泊等水体中,DOC 与 CDOM 之间存在显著线性相关^[23,24]. 本研究中,无论是厌氧还是正常淹水,所有土壤样本淹水后上覆水体的 DOC 与 CDOM 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$) (图 3). 对两种淹水条件下,4 个土壤样本 (FL、SB、TJ、KX) 分别以 CDOM 为因变量,DOC 为自变量,进行单因子线性回归拟合 (图 3),其决定系数 R^2 分别为 0.51、0.98、0.97、0.83 (厌氧淹水) 和 0.45、0.74、0.82、0.78 (正常淹水),在厌氧淹水时,DOC 变化可以解释平均 82.25% 的 CDOM 浓度差异,其解释度远高于正常淹水 (69.75%),这说明正常淹水条件下 DOM 组成

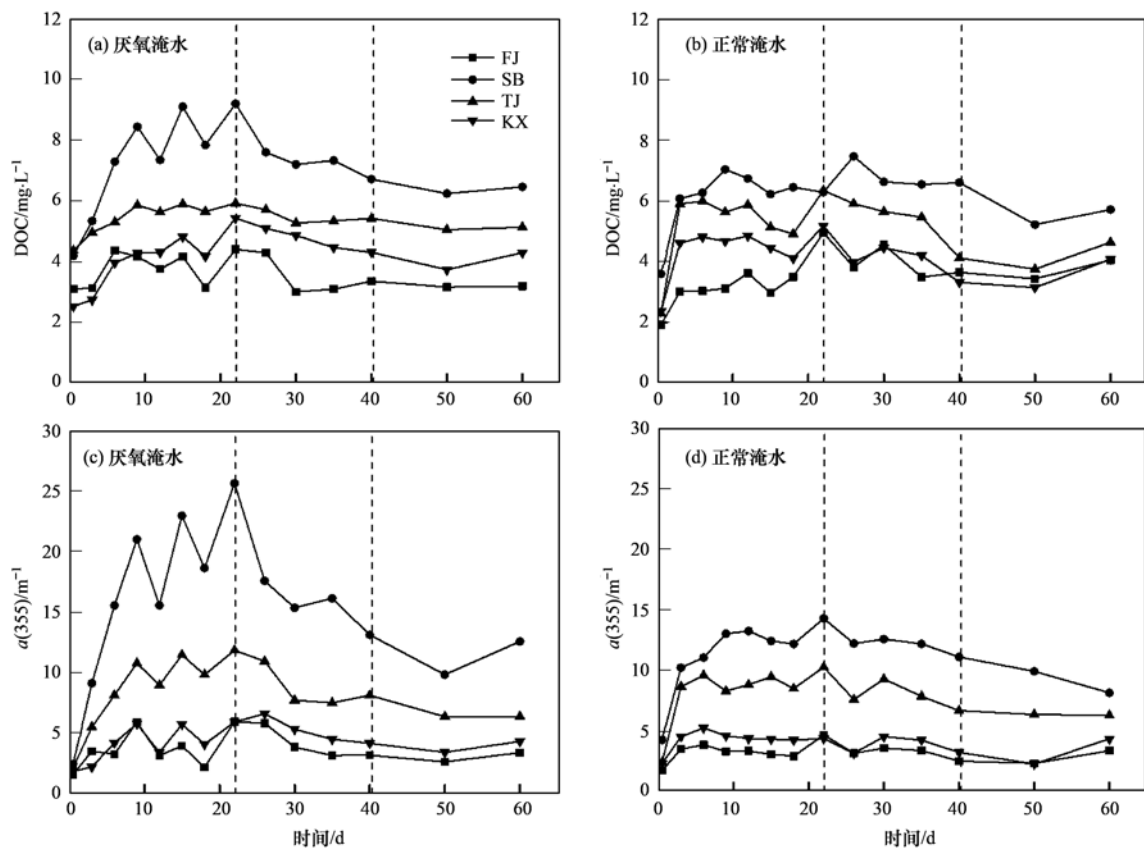


图2 两种处理上覆水 DOC 和 CDOM 浓度变化

Fig. 2 Changes of DOC and CDOM in overlying waters of two submerging treatments

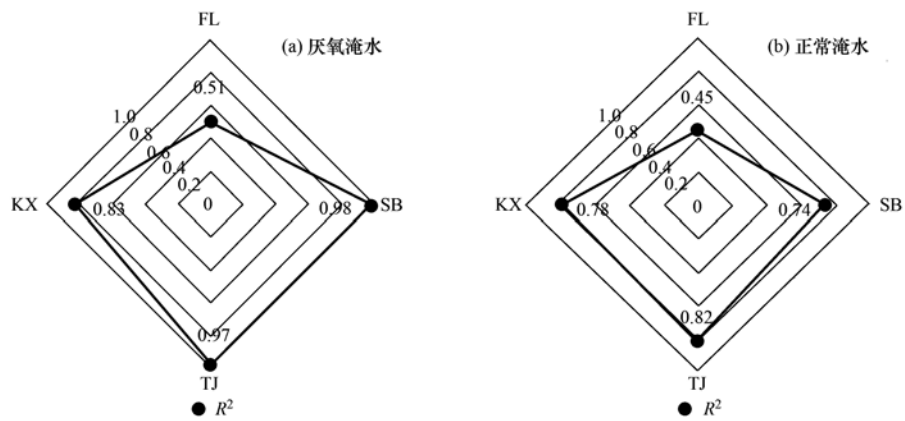


图3 两种处理上覆水 DOC 与 CDOM 回归拟合的决定系数 R^2

Fig. 3 The R^2 of regression fitting between DOC and CDOM from two individual flooding experiments

较厌氧淹水复杂,体系中除了 CDOM 外,还有较多非生色 DOM 存在,这可能与两种处理下体系中的微生物代谢活动及固相界面吸附有关。

2.2 DOC 浓度估测模型

由于 CDOM 和 DOC 存在较好相关性,根据文献[13]中三波长模型对两种淹水处理,建立 DOC 浓度估测模型为:

$$\ln[a^*(355)] = A \times \ln[a(275)] + B \times \ln[a(295)] + C$$

式中, $a^*(355) = a(355)/\text{DOC}$, 而 $a(355)$ 、 $a(275)$ 和 $a(295)$ 分别为对应波长处吸光系数, A 、 B 、 C 为常数。拟合结果如表3所示。很明显,两个淹水处理的模型拟合 R^2 变化差异明显,厌氧条件下更高,其原因在于厌氧淹水中,释放的 DOM 中大多属于

CDOM,微生物分解和矿物颗粒吸附的“去除”作用相对较弱. 这和前文所提到的单因子线性拟合及相关性分析的结论是一致的. 因此,在利用短波建

立的 DOC 反演模型中^[13,25,26],氧化-还原水平也会影响反演模型预测精度,在实际工作中需要酌情考虑.

表 3 三波长模型回归拟合相关参数

Table 3 Multiple linear regression coefficients of three-wavelength model for DOC estimation						
处理	土壤样本	A	B	C	R ²	P
厌氧	FL	0.139	0.439	-1.304	0.659	<0.01
	SB	-0.426	1.016	-1.263	0.970	<0.01
	TJ	0.515	0.240	-2.021	0.984	<0.01
	KX	-0.266	0.615	-0.718	0.685	<0.01
正常	FL	-5.935	6.072	1.362	0.297	>0.05
	SB	-4.042	4.427	0.352	0.637	<0.01
	TJ	-3.070	3.295	0.623	0.724	<0.01
	KX	0.425	-0.283	-0.506	0.070	>0.05

2.3 紫外-可见参数特征

光谱斜率比值(S_R)与 DOM 浓度无关,常用来评估 DOM 结构变化, S_R 值与分子量呈反比,即 S_R 值越高,DOM 分子量越低^[17,22]. 另外,以 $SUVA_{280}$ 表征 DOM 芳香性大小,值越大,DOM 芳香化程度越高^[10,27]. 由图 4,两种淹水条件下, S_R 先减小后增大,即上覆水 DOM 分子量先增大后减小最后逐渐

稳定. $SUVA_{280}$ 变化趋势与 S_R 变化相似:随着淹水实验的进行,芳香性先增后降最终趋于稳定. 淹水初期,有机质分解导致 DOM 芳香性增加,分子量增大;而随后不断明显的去除作用(包括微生物分解和矿物颗粒吸附)使得 DOM 芳香性减小,分子量减小;这种“源-汇”的不断交换最终达到动态平衡.

对比两种淹水处理,水体含氧水平是控制释放

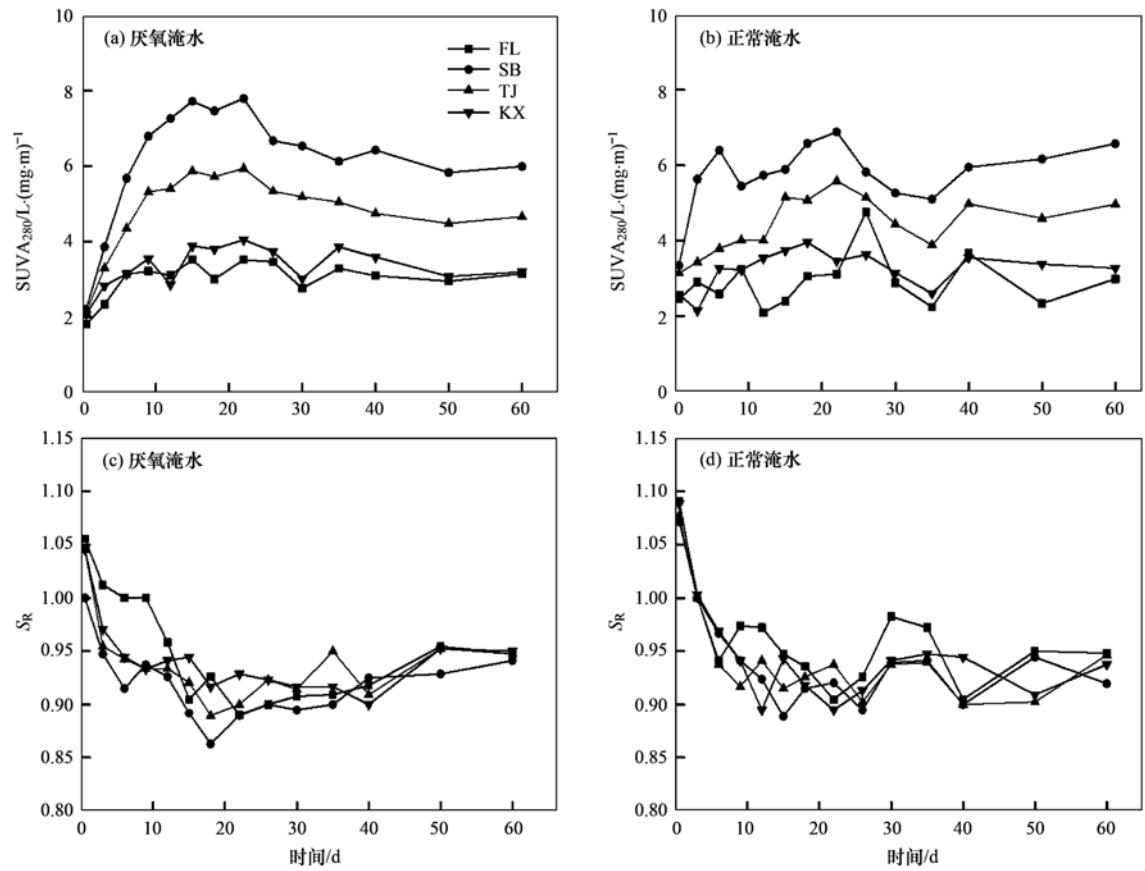


图 4 两种处理上覆水紫外-可见参数变化

Fig. 4 UV-Vis spectra index changes of DOM in overlying waters from two individual flooding experiments

DOM 特征的重要因素. 在淹水初期, 厌氧淹水导致的微生物不完全分解, 使得 DOM 芳香性较高 (SUVA 高); 而正常淹水中较高含氧量一方面有利于微生物对 DOM 氧化分解, 尤其是稳定性较高的组分 (例如芳香结构)^[14,28,29]; 另一方面也有利于铁、锰氧化物形成从而提供对 DOM 的吸附^[1,2]. 因此整体上, $SUVA_{280}$ 为厌氧淹水 > 正常淹水, 但 S_R 对不同淹水条件不敏感, 处理间无显著差异 ($P > 0.05$).

2.4 DOM 释放速率与通量

DOC 释放速率按公式计算:

$$R = [(c_n - c_{n-1})V] / [S \cdot (t_n - t_{n-1})]$$

式中, R 为释放速率; V 为上覆水体积 (L); c_n 、 c_{n-1} 为第 n 及 $n-1$ 次采样时 DOC 浓度; S 为土-水接触面积 (m^2); t_n 、 t_{n-1} 为第 n 及 $n-1$ 次采样所对应时

间 (d). 结合图 2, 本研究中淹水初期为快速释放期, 随后受微生物降解、土壤/颗粒吸附等的影响进入波动期并缓慢增加 (图 5), 此过程表现为上覆水 DOM 的“源”, 该过程为 22 d 左右, 与前面的研究相似; 随着上覆水 DOC 浓度的增大, 沉积物-上覆水间浓度梯度减小, 水体 DOM 的去除、分解及转化机制作用高于沉积物的释放作用, 水体 DOM 浓度开始减小, 速率为负, 沉积物此时表现为上覆水 DOM 的“汇”, 最终基本 40d 后达到平衡 (图 5). 沉积物 DOM 厌氧淹水释放速率为 $-13.13 \sim 273.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 均值为 $(17.00 \pm 59.21) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 正常淹水为 $-9.35 \sim 225.31 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 均值为 $(13.34 \pm 43.31) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

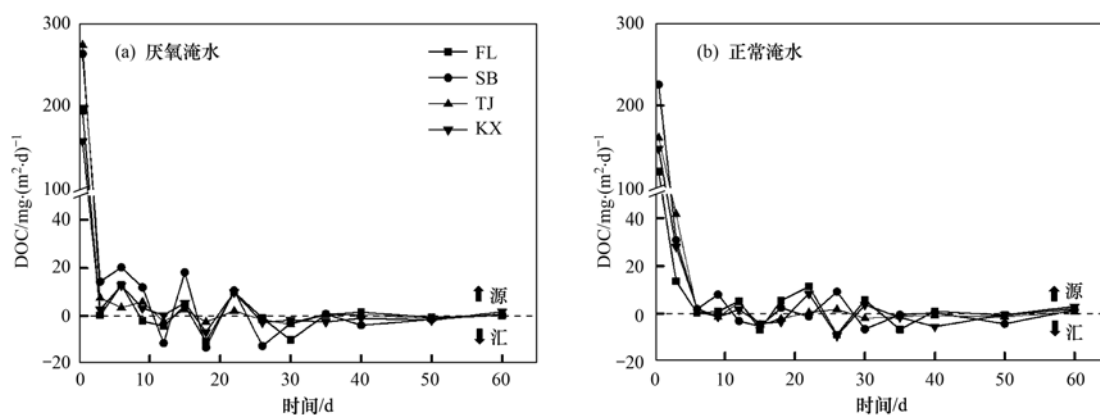


图 5 两种处理上覆水 DOC 释放速率

Fig. 5 DOC releasing rates from two individual flooding experiments

与已有研究相比, 就释放速率而言和“源-汇”关系变化趋势而言, 不同区域的研究结果不尽相同, 存在明显差异, 这与不同研究区域土壤/底泥性质、水文情况、微生物/浮游植物活动, 甚至人为活动干扰等密切相关. 本研究中 DOM 释放速率与 Uiam 湖 (韩国)^[9]、St. Lawrence 下游河口 (美国)^[30]、Chesapeake 湾 (美国)^[7,8,31] 相近, 但较乌梁素海、岱海低 (表 4)^[32]. Yang 等^[9]研究表明, 在整个淹水过程中厌氧与好氧两种处理的 DOC 释放速率正、负有所波动, 和本文类似; 但文献^[32]中, 乌梁素海柱芯 DOM 的释放速率始终为正, 总体上表现为 DOM “源”; 而岱海柱芯释放速率为负, 表现为 DOM “汇”. 另外, 三峡库区消落带为水生生态系统和陆地生态系统的衔接过渡地带, 存在一个复杂的非季节性淹水环境, 在其落干后的涨水过程中土壤淹水状况与上覆水体情况极其复杂. 因此, 为了排除上覆水影响, 更直观地说明土壤在不同淹水环境下 DOM 的释放过程,

本研究中选取了用纯水作为淹水的介质. 而实验结果表明, 本研究中 DOC、CDOM 释放速率波动幅度要大于已有报道的区域^[7,8,31,33,34], 由此说明在三峡库区消落带, 土壤淹水释放 DOM 的 (“源”) 及去除 (“汇”) 转化机制更为复杂.

在本课题组前期研究^[10]及本研究均表明, 库区消落带土壤 DOC、CDOM 含量均高于水体, 可经地表径流、淋溶等途径进入水体, 是水体 DOC、CDOM 的重要来源之一; 而当淹水发生时, 释放也成为另一重要 DOM 源. 另外, 三峡库区消落带面积为 349 km^2 , 其中干流占全区消落带面积 47.96% , 其他支流消落带面积占 52.04% , 可估算干流面积为 167.34 km^2 , 支流面积为 181.62 km^2 ^[35,36], 本研究中 4 个采样点中 FL、SB 为干流, TJ、KX 为支流. 由于缺乏每个采样点详细消落带面积的相关报道, 因此本研究用 FL、SB 与 TJ、KX 的均值代表干流与支流上覆水 DOM 浓度, 粗略估算淹水后沉积物向上覆

水释放 DOM 的总量:干流释放的 DOC 量分别为 $0.88 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ (厌氧)和 $0.55 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ (正常),支流为 $0.56 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ (厌氧)和 $0.44 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ (正常),对照文献[7,9,37,38]中其他区域的 DOC 估算通量,三峡库区干流消落带约占全球内

陆淹水土壤/底泥 DOC 释放通量 ($0.1 \times 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$)的0.008 8‰(厌氧)和0.005 5‰(正常);支流约占0.005 6‰(厌氧)和0.004 4‰(正常);远远小于海岸带沉积物/底泥 DOC 释放通量 ($0.35 \times 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$) [39,40] .

表 4 不同水体 DOC 释放速率

Table 4 DOC releasing rates from different water environments

地点	DOC 释放速率/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	释放趋势	文献
三峡库区(厌氧)	-13.13 ~ 273.13	波动(“源-汇”)	本研究
三峡库区(正常)	-9.35 ~ 225.31	波动(“源-汇”)	本研究
Uiam Lake(厌氧)	-108.00 ~ 392.00	波动(“源”)	[9]
Uiam Lake(好氧)	-55.00 ~ 342.00	波动(“源”)	[9]
乌梁素海	852.84 ~ 2 221.08	持续释放(“源”)	[32]
岱海	-17 736.96 ~ 1 869.00	持续沉降(“汇”)	[32]
Laurentian Channel	15.60 ~ 25.20	/ ¹⁾	[30]
Anticosti Channel	46.20	/	[30]
Chesapeake Bay	-1.40 ~ 37.00	/	[7,8,31]
Temperate Australian Estuaries	~ 600	波动(“源-汇”)	[33]
Mexican margin	3.00 ~ 4.80	/	[34]

1) “/”表示文章未提及

2.5 不同区域对比

对比 4 个区域土壤淹水释放 DOM 相关参数(表5),两种处理下, S_R 值均无差异,而 DOC 含量均差异显著; $SUVA_{280}$ 仅有 FL 与 KX 间差异不显著, $CDOM[a(355)]$ 在厌氧淹水下 FL 与 KX 间无差异. SB 土样淹水后上覆水 DOC、CDOM 含量最大,FL 最小,这与土壤有机质含量大小一致. 因此,在土壤淹水条件下,相比于土壤 DOM 而言,土壤/底泥有机质含量是决定 DOM 在土-水界面间释放的重要因素之一,这与文献[41]观点类似: Kaiesr 等^[41]对温带气候区 125 种森林土壤研究发现,在

无外加 DOM 情况下从土壤中释放的 DOM 量取决于土壤本身有机质含量高低. 值得注意的是,4 个区域中仅有 SB 样本在两种处理下差异显著 ($P < 0.05$),表明土壤有机质含量越高,在不同的淹水环境中释放的强度与受去除机制等的影响可能越大,受氧化-还原的影响越明显. 位于长江干流的忠县石宝寨(SB),沿岸土壤以农田坡耕地和林地为主,大量种植经济作物,植被丰富,土壤中有有机质含量较高;同时由于粪肥大量施用,土壤中营养物质积累,微生物活动较活跃,这有利于淹水时微生物对有机物的分解释放.

表 5 不同区域土壤淹水释放 DOM 的各参数对比¹⁾

Table 5 Comparisons of different DOM paramters among four sampling sites in two individual flooding experiments

地点	厌氧淹水				正常淹水			
	DOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$CDOM[a(355)]$	$SUVA_{280}$	S_R	DOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$CDOM[a(355)]$	$SUVA_{280}$	S_R
FL	$3.60 \pm 0.56d$	$3.70 \pm 1.35c$	$3.03 \pm 0.46c$	$0.95 \pm 0.05a$	$3.51 \pm 0.73d$	$3.20 \pm 0.70d$	$2.91 \pm 0.69c$	$0.96 \pm 0.04a$
SB	$7.17 \pm 1.35a$	$15.43 \pm 5.96a$	$6.17 \pm 1.52a$	$0.92 \pm 0.03a$	$6.21 \pm 0.92a$	$11.23 \pm 2.53a$	$5.78 \pm 0.87a$	$0.93 \pm 0.05a$
TJ	$5.40 \pm 0.43b$	$8.29 \pm 2.6b$	$4.83 \pm 1.04b$	$0.93 \pm 0.04a$	$5.12 \pm 1.10b$	$7.88 \pm 1.99b$	$4.45 \pm 0.74b$	$0.94 \pm 0.05a$
KX	$4.22 \pm 0.80c$	$4.41 \pm 1.39c$	$3.34 \pm 0.54c$	$0.94 \pm 0.03a$	$4.16 \pm 0.76c$	$4.00 \pm 0.88c$	$3.26 \pm 0.50c$	$0.95 \pm 0.05a$

1) 同一参数同一列中的相同字母表示该两者间的差异性不显著 ($P > 0.05$)

另外,需要特别说明的是,土壤淹水释放 DOM 的过程并非简单地物理扩散过程,也并不仅仅是由土壤有机质含量决定,而其他因素,包括土壤易溶解 DOC(土壤 DOM)、无机矿物组成、以及微生物多样性和代谢活性等是如何影响不同区域土壤释放 DOM,还需做进一步研究.

2.6 DOM 释放特征的环境意义:以汞为例

如前文所述,淹水初期(快速期)是 DOM 释放关键阶段(22d 左右),DOM 呈现高 DOC 浓度和高芳香性特征. 随淹水时间持续,微生物降解、无机矿物吸附等去除机制导致 DOC 和芳香性降低. 而这种释放模式如何解释污染物环境行为? 本文作为

“天然有机质-汞相互作用关系”研究项目的一部分, 因此以汞为例对该问题进行回答。

较高芳香性和分子量的 DOM 对汞的甲基化存在 3 个方面影响: ①稳定 HgS 纳米颗粒, 有利于微生物吸收并甲基化^[42~44]; ②直接与无机汞结合后, 可能因其较强亲水性, 及分子尺寸过大等原因, 汞无法跨膜, 导致微生物可利用性降低^[45,46]; ③较多功能基团(例如巯基)利于无机汞和甲基汞(MeHg)的迁移。在之前库区(忠县石宝寨)淹水汞释放及甲基汞生物积累的模拟实验中^[47], 21 d 的淹水周期中(相当于 DOM 释放实验的淹水快速期), 土壤总汞(THg)含量下降, 而水体 THg 不断增加; 而土壤和水体中 MeHg 持续增加。对照 DOM 释放实验数据, 高 DOC 和芳香性一方面可以有助于 Hg 释放, 同时也利于 HgS 等稳定促进甲基化; 而较高微生物代谢活动, 需要持续利用 DOM 作为电子供体, 因此 DOM 在降低无机汞生物可利用性上无明显影响; 整体表观上看, DOM 呈现出促进汞释放和甲基化的作用。进一步, 通过斑马鱼毒理学试验发现, 在该淹水周期内, 鱼体内不同位置均出现 MeHg 富集, 其积累量与 DOC 存在显著相关性($P < 0.05$)。尽管有研究报道了 DOM 对 Hg 生物积累的抑制效应^[48,49], 但对本研究而言, DOM 表现出促进甲基汞的生物积累^[50~52]。而 DOM 在性质上的变动差异性也正是解释这种不同野外观察现象的关键, 这与文献^[53,54]的观点相同。由此可知, 淹水初期的快速释放在 DOM 的环境角色中至关重要。因此对于以“干湿交替”为主的陆地系统而言, 当淹水发生时, 有效控制初期有机碳释放, 可能会有助于减轻汞的甲基化及在土-水间的迁移。

3 结论

(1)消落带 4 个区域土壤淹水是水体 DOM 的重要来源之一, 均呈现相似释放规律: 快速释放-下降-动态平衡。结合淹水汞释放和生物富集, 淹水初期的快速释放在 DOM 的环境角色中至关重要。

(2)受 DOM 生色组分的去除效率不同影响, 厌氧淹水时, DOC 和 CDOM 的相关性明显高于正常淹水; 而 DOC 的三波长估测拟合模型也证明氧化-还原水平对 DOC 和 CDOM 的相互关系存在影响。

(3)水体含氧水平是控制释放 DOM 特征的重要因素, 尽管两种处理中, DOC 和 CDOM 无显著差异, 但厌氧淹水 DOM 芳香性($SUVA_{280}$)高于正常淹水, 而 S_R 对不同淹水条件不敏感。通过释放速率和

通量计算, 三峡库区消落带土壤淹水释放 DOM 呈现出“源-汇动态交换”特征。

(4)各区域土壤淹水释放 DOM 存在差异, 尽管土壤有机质含量是影响各区域土壤淹水释放 DOM 差异的重要原因之一, 但其他地化因素(例如土壤中无机矿物)仍需考虑。

(5)综上所述, 单纯考虑淹水释放的 DOC 浓度, 并不能完全描述 DOM 释放特征; 其中非生色组分(例如小分子有机酸、多糖等)和生色组分均对表观 DOC 浓度有所贡献。而利用紫外-可见吸收光谱分析, 可以部分解析 DOM 的动态特征变化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] O'Loughlin E J, Chin Y P. Quantification and characterization of dissolved organic carbon and iron in sedimentary porewater from Green Bay, WI, USA [J]. *Biogeochemistry*, 2004, **71**(3): 371-386.
- [4] 王永娟, 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.
- [5] 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.
- [6] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, *et al.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. *Science*, 2005, **308**(5720): 376-380.
- [7] Burdige D J, Homstead J. Fluxes of dissolved organic carbon from Chesapeake Bay sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(16): 3407-3424.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 皮广洁, 唐书源. 农业环境监测原理与应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998. 74-82.
- [16] Chin Y P, Aiken G, O'Loughlin E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. Environmental Science & Technology, 1994, **28**(11): 1853-1858.
- [17] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(3): 955-969.
- [18] Fukushima, Park J C, Imai A, *et al.* Dissolved organic carbon in a eutrophic lake; dynamics, biodegradability and origin[J]. Aquatic Sciences, 1996, **58**(2): 139-157.
- [19] Stevenson F J. Humus chemistry: genesis, composition, reactants[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [20] Sulzberger B, Durisch-Kaiser E. Chemical characterization of dissolved organic matter (DOM): a prerequisite for understanding UV-induced changes of DOM absorption properties and bioavailability[J]. Aquatic Sciences, 2009, **71**(2): 104-126.
- [21] Mopper K, Kieber D J. Photochemistry and the cycling of carbon, sulfur, nitrogen and phosphorus[A]. In: Hansell D A, Carlson C A (Eds.). Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter[M]. Amsterdam: Academic Press, 2002. 455-489.
- [22] 朱伟健, 沈芳, 洪官林. 长江口及邻近海域有色溶解有机物(CDOM)的光学特性[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2292-2298.
- [23] 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 Hydrochemica et Hydrobiologica, 2005, **33**(4): 315-323.
- [24] 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.
- [25] Twardowski M S, Boss E, Sullivan J M, *et al.* Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter[J]. Marine Chemistry, 2004, **89**(1-4): 69-88.
- [26] Fichot C G, Benner R. A novel method to estimate DOC concentrations from CDOM absorption coefficients in coastal waters[J]. Geophysical Research Letters, 2011, **38**(3): 103610.
- [27] 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 & Technology, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [28] Cowie G L, Hedges J I. A comparison of organic matter sources, diagenesis and preservation in oxic and anoxic coastal sites[J]. Chemical Geology, 1993, **107**(3-4): 447-451.
- [29] Swietlik J, Sikorska E. Application of fluorescence spectroscopy in the studies of natural organic matter fractions reactivity with chlorine dioxide and ozone[J]. Water Research, 2004, **38**(17): 3791-3799.
- [30] Alkhatib M, Giorgio P A D, Gelinas Y, *et al.* Benthic fluxes of dissolved organic nitrogen in the lower St. Lawrence estuary and implications for selective organic matter degradation[J]. Biogeosciences, 2013, **10**(11): 7609-7622.
- [31] Burdige D J, Zheng S L. The biogeochemical cycling of dissolved organic nitrogen in estuarine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(8): 1796-1813.
- [32] 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 等. 湖泊水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量及耦合关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3674-3682.
- [33] Maher D T, Eyre B D. Benthic fluxes of dissolved organic carbon in three temperate Australian estuaries: implications for global estimates of benthic DOC fluxes[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, **115**(G4): G04039.
- [34] Holcombe B L, Keil R G, Devol A H. Determination of pore-water dissolved organic carbon fluxes from Mexican margin sediments[J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(2): 298-308.
- [35] 牛志明, 解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J]. 科技导报, 1998, (4): 61-62, 6.
- [36] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析[J]. 水土保持学报, 2008, **28**(1): 46-49.
- [37] Dean W E, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands[J]. Geology, 1998, **26**(6): 535-538.
- [38] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, *et al.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments[J]. Limnology and Oceanography, 2006, **51**(5): 2388-2397.
- [39] Burdige D J, Komada T. Sediment pore waters[A]. In: Hansell D, Carlson C A (Eds.). Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter (2nd ed.)[M]. Amsterdam: Academic Press, 2014. 536-569.
- [40] Chen M L, Hur J. Pre-treatments, characteristics, and biogeochemical dynamics of dissolved organic matter in sediments: a review[J]. Water Research, 2015, **79**: 10-25.
- [41] Kaiser K, Zech W. Rates of dissolved organic matter release and sorption in forest soils[J]. Soil Science, 1998, **163**(9): 714-725.
- [42] Deonarine A, Hsu-Kim H. Precipitation of mercuric sulfide nanoparticles in NOM-containing water: implications for the natural environment[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(7): 2368-2373.
- [43] Zhang T, Kim B, Levard C, *et al.* Methylation of mercury by

- bacteria exposed to dissolved, nanoparticulate, and microparticulate mercuric sulfides[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(13): 6950-6958.
- [44] Chiasson-Gould S A, Blais J M, Poulain A J. Dissolved organic matter kinetically controls mercury bioavailability to bacteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(6): 3153-3161.
- [45] Hammerschmidt C R, Fitzgerald W F, Balcom P H, *et al.* Organic matter and sulfide inhibit methylmercury production in sediments of New York/New Jersey Harbor [J]. *Marine Chemistry*, 2008, **109**(1-2): 165-182.
- [46] Hammerschmidt C R, Fitzgerald W F. Geochemical controls on the production and distribution of methylmercury in near-shore marine sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(5): 1487-1495.
- [47] 李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 等. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2721-2727.
- [48] Mason R P, Reinfelder J R, Morel F M M. Uptake, toxicity, and trophic transfer of mercury in a coastal diatom [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(6): 1835-1845.
- [49] Gorski P R, Armstrong D E, Hurley J P, *et al.* Influence of natural dissolved organic carbon on the bioavailability of mercury to a freshwater alga [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(1): 116-123.
- [50] Haines T A, Komov V T, Jagoe C H. Mercury concentrations in perch (*Perca fluviatilis*) as influenced by lacustrine physical and chemical factors in two regions of Russia[A]. In: Watras C J, Huckabee J W (Eds.). *Mercury Pollution: Integration and Synthesis*[M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1994. 397-407.
- [51] Haines T A, Komov V T, Matey V E, *et al.* Perch mercury content is related to acidity and color of 26 Russian lakes[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1995, **85**(2): 823-828.
- [52] Pickhardt P C, Stepanova M, Fisher N S. Contrasting uptake routes and tissue distributions of inorganic and methylmercury in mosquitofish (*Gambusia affinis*) and redear sunfish (*Lepomis microlophus*) [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2006, **25**(8): 2132-2142.
- [53] Hollweg T A, Gilmour C C, Mason R P. Methylmercury production in sediments of Chesapeake Bay and the mid-Atlantic continental margin [J]. *Marine Chemistry*, 2009, **114**(3-4): 86-101.
- [54] Chen C Y, Borsuk M E, Bugge D M, *et al.* Benthic and pelagic pathways of methylmercury bioaccumulation in estuarine food webs of the Northeast United States [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(2): e89305.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} 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 _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional 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 _{2.5} 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 ₂ 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 ₃ O ₄ 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 Electrochemical 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 ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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 γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	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