

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

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

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O₃来源识别 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)

厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)

近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)

稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)

气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H₂)浓度 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)

小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO₂特征及扩散通量 张永领, 杨小林, 张东(40)

夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)

基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)

温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)

人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)

太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)

鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)

影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)

水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)

蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)

汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)

三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)

三峡库区农林畜复合小流域水体汞的时空变化特征 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)

环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)

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 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)

舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)

太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)

厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)

两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)

大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)

铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)

铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)

一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)

磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)

腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)

降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)

FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)

微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)

微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)

舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)

四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)

铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)

外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)

厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)

洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)

不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)

畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)

华南某市生活垃圾组成特征分析 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)

生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)

基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)

一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)

典型黄土区油松树干液流变化特征分析 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)

利用巨藻发酵联产氢气与挥发性有机酸的研究 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)

人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 李曼璐, 姜玥璐(365)

《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236,243,273,300)

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

高洁¹, 江韬^{1,2*}, 李璐璐¹, 陈雪霜¹, 魏世强^{1,2}, 王定勇^{1,2}, 闫金龙¹, 赵铮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 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 利用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术, 结合荧光区域积分法, 分析了三峡库区消落带土壤 DOM 的理化特征。结果表明, 各区县消落带土壤 CDOM 平均浓度大小顺序为: 忠县 > 丰都 > 涪陵 > 万州 > 巫山 > 云阳 > 奉节 > 开县, 其中, 忠县、丰都和涪陵土壤 CDOM 浓度 [$a(355)$]、芳香性 (SUVA₂₅₄) 和疏水组分 (SUVA₂₆₀) 明显高于其它区县, 而其腐殖化程度 (HIX) 均低于其它区县。三峡库区消落带土壤 DOM 中含有类腐殖质荧光团 A、C、M 和类色氨酸荧光团 T, 其中紫外区类腐殖质荧光团 A 的荧光区域积分比例最大。另外, 类色氨酸荧光团 T 与 $a(355)$ 呈极显著相关 ($r=0.674, P<0.01$), 影响 CDOM 浓度变化的主要因素是类蛋白荧光峰 T。3D-EEM 总荧光强度 (TOT) 可作为表征三峡库区消落带土壤 CDOM 荧光团浓度的指标。消落带土壤 DOM 腐殖化程度较低, 生物可利用性较高。另外, 消落带干湿交替作用对不同高程土壤 DOM 理化特征影响的差异较小, 这可能与当地农业活动、沿岸植物生长以及 DOM 矿化过程有关。

关键词: 三峡库区; 溶解性有机质; 干湿交替; 紫外-可见吸收光谱; 三维荧光光谱

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0151-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.020

Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region

GAO Jie¹, JIANG Tao^{1,2*}, LI Lu-lu¹, CHEN Xue-shuang¹, WEI Shi-qiang^{1,2}, WANG Ding-yong^{1,2}, YAN Jin-long¹, ZHAO Zheng¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: Ultraviolet-visible (UV-Vis) absorption spectroscopy and three-dimensional fluorescence spectroscopy, combined with fluorescence regional integration were conducted to investigate the geochemical characteristics of DOM extracted from soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir Region. The results showed that the average CDOM concentrations in soils were in order of Zhongxian > Fengdu > Fuling > Wanzhou > Wushan > Yunyang > Fengjie > Kaixian. Additionally, in Zhongxian, Fengdu and Fuling, the CDOM concentration [$a(355)$], aromaticity (SUVA₂₅₄) and hydrophobicity (SUVA₂₆₀) were all much higher than those at the other sampling sites, but the humification index (HIX) was lower. Four fluorophores were observed in all soil DOM samples, including three humic-like fluorescence peaks (A, C and M respectively) and one tryptophan-like fluorescence peak (T). Proportion of fluorescence regional integration of ultraviolet region humic-like A fluorophore was the highest as compared with the others. More importantly, tryptophan-like fluorophore (T) and $a(355)$ showed significant correlation ($r=0.674, P<0.01$), indicating the variance of CDOM concentration was possibly dependent on T fluorophore. Meanwhile, the total integrated fluorescence intensity (TOT) of 3D-EEM was an appropriate parameter to characterize the total contributions of fluorophores in DOM. Furthermore, the humification degree of DOM in soils was low in comparison with higher biological availability. Conclusively it seemed that the influence of "alternation of wetting and drying" resulted from water-level fluctuation on the geochemical characteristics of soil DOM was not significant as expected. It might be related to local agricultural activity, littoral plant growth and DOM mineralization process.

Key words: Three Gorges Reservoir Region; dissolved organic matter; alternation of wetting and drying; ultraviolet-visible spectra; three-dimensional fluorescence spectroscopy

收稿日期: 2014-06-07; 修订日期: 2014-07-26

基金项目: 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: 高洁 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: ajjyze1208@126.com

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

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是生态系统重要组成部分^[1],对全球碳循环有重要影响^[2],对生态系统的能量输入和物质转化也具有重要作用.它普遍存在于土壤、沉积物及各类水体等自然环境中,可以通过离子交换、吸附、氧化还原等反应改变土壤、沉积物和水体中重金属迁移转化、生物毒性及空间分布等^[3,4].土壤DOM主要来自植物残体、根系分泌物及土壤有机质中的腐殖质等^[5],它经地表径流、淋溶及淹水释放等途径进入水体,成为水体DOM一部分.

三峡库区消落带以其独特的干湿交替特征成为重要的生态系统,一直受到广泛关注^[6,7].消落带是因水库调节水位导致非季节性的水位涨落,使土地被周期性淹没和出露形成干湿交替的水陆衔接地带,一年内在三峡库区垂直落差达30 m.三峡库区消落带是库区周边水、陆生态系统能量、物质和信息转移与转化的活跃地带,具有缓冲带的功能和植物护岸功能,同时对外界环境的变化十分敏感.受水位消涨影响,消落带土壤周期性淹没和出露使其DOM演化过程和旱地、森林等土壤DOM并不一致.当三峡水库蓄水时,消落带水位上升,土壤中DOM会释放进入水体,从而影响库区污染物的环境化学行为.因此,了解干湿交替环境下DOM的形成和来源,是认识该特殊环境下天然有机质(尤其是DOM)在污染物迁移转化过程中所扮演角色的重要前提.

目前,国内利用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱研究海洋、湖泊、河口、水库等水体DOM来源、组成、性质及其时空变化特征的工作已开展多年^[8-13],但利用该技术研究土壤中DOM地化特征的工作较少,尤其针对三峡库区消落带DOM的研究鲜有报道,仅李璐璐等^[14]采用紫外-可见吸收光谱研究了三峡库区消落带土壤和沉积物DOM的芳香性差异及光漂白潜能等;杨艳^[15]研究了三峡库区开县消落区土壤中DOM的荧光性质、时空变化等.

基于此,本研究选择三峡库区重庆段巫山、奉节、云阳、开县等8个区县消落带,通过紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术,结合荧光区域积分法(fluorescence regional integration, FRI)分析消落带土壤DOM地化特征,探讨不同淹水高程土壤DOM差异,以期为深入研究干湿交替作用下,DOM对污染物迁移转化的影响提供理论依据和数据支持.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2012年7~8月在三峡库区8个区县(巫山、奉节、云阳、开县、万州、忠县、丰都、涪陵)消落带采集160 m、170 m高程土样各24个(图1).样品经风干、研磨处理并过60目筛后,避光保存.土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,土壤pH采用电位法测定^[16].

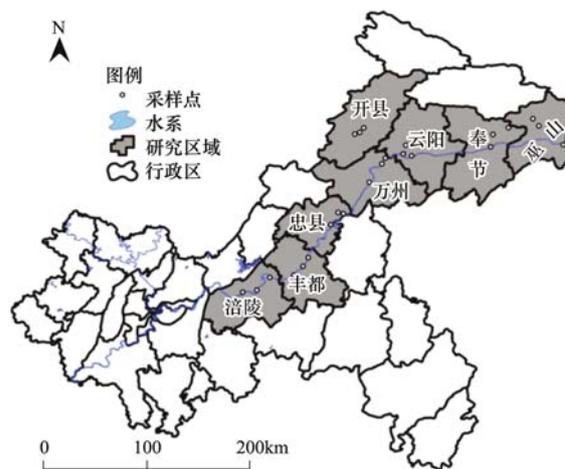


图1 采样点示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

1.2 DOM 样本提取

DOM样本提取采用水土振荡提取法^[14,17].准确称取5.00 g风干土于离心管中,按水土比10:1加入一定量超纯水(Milli-Q,电阻率为18.2 MΩ·cm),25℃下在黑暗处200 r·min⁻¹振荡提取16 h后,再4 000 r·min⁻¹离心30 min,然后用0.45 μm醋酸纤维滤膜过滤,滤液即为DOM,4℃保存在棕色瓶中.

1.3 吸收光谱和荧光光谱分析

DOM浓度以溶解性有机碳(DOC)表示,DOC采用GE InnovOx[®] Laboratory TOC分析仪测定(表示为mg·L⁻¹).吸收光谱和三维荧光光谱(3D-EEM)均采用Horiba公司Aqualog[®]荧光光谱仪进行测定.Aqualog[®]荧光光谱仪是目前全球唯一一款可以同时测定吸收和荧光的光谱仪.紫外-可见吸收光谱方法:以Milli-Q水为空白,用10 mm石英比色皿在230~800 nm范围内扫描,间隔1 nm,以355 nm处吸收系数 $a(355)$ 表示有色溶解性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)相对浓度.研究中相关吸收光谱参数如表1所示.

表 1 紫外-可见吸收光谱参数描述

Table 1 Description of ultraviolet-visible absorption spectrum parameters

紫外-可见吸收光谱参数	计算公式	公式参数	描述
吸收系数 $a(355)$	$a(\lambda) = 2.303D(\lambda)/r^{18}$	$a(\lambda)$ 为波长 λ 吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光程路径 (m)	表示 CDOM 相对浓度 ^[12,13,19]
光谱斜率比值 S_R	$S_R = S_{(275-295)}/S_{(350-400)}$ $a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)]^{[20,21]}$	$a(\lambda)$ 是 DOM 吸收系数 (m^{-1}), λ 是波长 (nm), λ_0 是参照波长 (nm)	反映 DOM 来源与类型, 包括富里酸 (FA)/胡敏酸 (HA) 比例、分子量大小、自生源与陆源特征、光漂白活性等 ^[20]
SUVA ₂₅₄	$SUVA_{254} = a(254)/DOC^{[22]}$	$a(254)$ 为 254 nm 波长处的吸收系数, DOC 为溶解性有机碳 ($mg \cdot L^{-1}$)	表征 DOM 芳香性强弱 ^[23]
SUVA ₂₆₀	$SUVA_{260} = a(260)/DOC^{[22]}$	$a(260)$ 为 260 nm 波长处的吸收系数, DOC 为溶解性有机碳 ($mg \cdot L^{-1}$)	表征 DOM 疏水性组分含量 ^[24]

荧光光谱方法: 以 Milli-Q 水为空白, 激发波长 (E_x) 范围为 230 ~ 450 nm, 增量 5 nm, 发射波长 (E_m) 范围为 250 ~ 620 nm, 扫描信号积分时间为 3

s, 光源为 150 W 无臭氧氙弧灯, Aqualog[®] 系统自动校正瑞利和拉曼散射. 本研究中相关荧光参数如表 2 所示.

表 2 荧光光谱参数描述

Table 2 Description of fluorescence spectrum parameters

荧光光谱参数	定义	描述
$F_n(355)$	激发波长为 355 nm, 发射波长为 450 nm 时的荧光信号强度 ^[25]	表示 DOM 荧光强度
荧光指数 (fluorescence index, FI)	激发波长为 370 nm 时, 荧光发射光谱强度在 470 nm 和 520 nm 处比值 ($f_{470/520}$) ^[26]	常用来研究和表征 DOM 中类腐殖质来源 ^[26] , FI > 1.9 表征 DOM 主要源于细菌和藻类活动, 属于内源生产 (DOM 自生源特征较为明显); FI < 1.4 源于陆生植物和土壤有机质, 属于外源 (陆源) 输入 (DOM 异生源特征较为明显) ^[27]
腐殖化指数 (humification index, HIX _a)	254 nm 激发波长下, 发射波长 435 ~ 480 nm 间区域积分值 ($\int_{435-480}$) 除以 300 ~ 345 nm 间区域积分值 ($\int_{300-345}$) ^[28]	常用来表征 DOM 腐殖化程度, 高 HIX 值表明腐殖化程度较高, DOM 较稳定 ^[29] ; HIX _b 是 HIX _a 的改进形式, 其目的在于避免内滤效应干扰
腐殖化指数 (humification index, HIX _b)	254 nm 激发波长下, 发射波长 435 ~ 480 nm 间区域积分值 ($\int_{435-480}$) 除以 300 ~ 345 nm 间区域积分值 ($\int_{300-345}$) 与 435 ~ 480 nm 间区域积分值 ($\int_{435-480}$) 之和 ^[29]	
自生源指标 (autochthonous index, BIX)	310 nm 激发波长下, 发射波长 380 nm 与 430 nm 处荧光强度的比值 ^[30]	BIX > 1 时, 表明 DOM 主要为自生来源且有机质为新近产生, BIX 在 0.6 ~ 0.7 之间表明自然水体 DOM 生产力较低 ^[30]
$r_{(A/C)}$	紫外区类腐殖质荧光强度与可见区类腐殖质荧光强度比值	与有机质结构和成熟度有关, 且与有机质分子量大小、溶液 pH 等有关 ^[31]
$r_{(T/C)}$	类蛋白荧光峰 T 与类腐殖质荧光峰 C 荧光强度的比值	评价内源贡献比重, 近几年该值也用于评估水体污染情况 ^[12]

1.4 荧光区域积分法

本研究 Aqualog[®] 荧光谱峰是基于 Origin 软件, 采用荧光区域积分法识别. 3D-EEM 总荧光强度 (total integrated fluorescence intensity, TOT) 是对三维荧光全光谱的荧光强度进行积分^[32]; 各荧光团 (峰) 荧光强度是对各荧光团 (峰) 相应波长范围内荧光强度进行积分, 具体方法如下.

将 3D-EEM 区域分成 4 个部分^[32,33] (表 3), 分别在相应波长范围内, 对 3D-EEM 选 i 区域进行积分, 公式如下:

$$\Phi_i = \int_{\lambda_{ex}} \int_{\lambda_{em}} I(\lambda_{ex}, \lambda_{em}) d\lambda_{ex} d\lambda_{em} \quad (1)$$

式中, Φ_i 为 i 区域的积分值, λ_{ex} 为激发波长 (nm), λ_{em} 为发射波长 (nm), $I(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$ 是相对应的荧光强度.

各荧光团(峰)占总荧光强度的比例为:

$$P_i = \Phi_i / \text{TOT} \times 100\% \quad (2)$$

式中, P_i 为各荧光团(峰)的区域积分比例, TOT 为总荧光强度.

表 3 3D-EEM 中各荧光团(峰)区域积分范围

Table 3 Integral integration ranges of each fluorophore(peak) in 3D-EEM

荧光谱峰	荧光团(峰)	荧光强度积分范围
A	紫外区类腐殖质荧光峰	$\lambda_{\text{ex}} = 250 \sim 260 \text{ nm}; \lambda_{\text{em}} = 380 \sim 480 \text{ nm}$
C	可见区类腐殖质荧光峰	$\lambda_{\text{ex}} = 330 \sim 350 \text{ nm}; \lambda_{\text{em}} = 420 \sim 480 \text{ nm}$
M	海洋来源类腐殖质荧光峰	$\lambda_{\text{ex}} = 310 \sim 320 \text{ nm}; \lambda_{\text{em}} = 380 \sim 420 \text{ nm}$
T	类色氨酸	$\lambda_{\text{ex}} = 270 \sim 280 \text{ nm}; \lambda_{\text{em}} = 320 \sim 350 \text{ nm}$
TOT	总荧光强度	$\lambda_{\text{ex}} = 230 \sim 450 \text{ nm}; \lambda_{\text{em}} = 250 \sim 620 \text{ nm}$

2 结果与讨论

2.1 CDOM 与 FDOM

表 4 为本研究各区县消落带土壤 DOM 浓度分布,土壤有机质以每 kg 土壤含碳量计. 各区县消落带土壤 DOC 浓度在 $22.57 \sim 84.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,均值为 $44.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 14.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变异系数为 33.17%. 土壤有机质含量在 $4.29 \sim 44.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $17.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 7.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为 45.42%. DOC 占土壤有机质的质量分数在 0.77% ~ 8.75% 之间,二者相关性不高 ($P > 0.05$).

表 4 三峡库区消落带土壤 DOM 浓度描述统计

Table 4 Descriptive statistics of DOM concentration in soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir Region

区县	$a(355)/\text{m}^{-1}$	变异系数 /%	$F_n(355)/\text{a. u.}$	变异系数 /%	DOC $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	变异系数 /%	土壤有机质 $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%
巫山	19.71 ± 16.08	81.58	$9\,976.84 \pm 6\,588.17$	66.03	45.27 ± 9.31	20.57	18.40 ± 6.23	33.87
奉节	10.45 ± 8.22	78.70	$10\,639.88 \pm 5\,591.71$	52.55	33.29 ± 5.38	16.17	21.98 ± 11.64	52.97
云阳	15.55 ± 7.49	48.20	$9\,603.27 \pm 1\,511.69$	15.74	47.63 ± 16.09	33.79	14.80 ± 4.11	27.77
开县	7.92 ± 7.54	95.18	$9\,584.03 \pm 3\,672.88$	38.32	32.53 ± 12.76	39.22	15.24 ± 13.08	85.84
万州	22.89 ± 16.58	72.43	$12\,884.65 \pm 10\,062.46$	78.10	43.16 ± 12.35	28.62	13.51 ± 5.47	40.51
忠县	191.19 ± 336.53	176.02	$28\,655.19 \pm 46\,950.77$	163.85	54.33 ± 18.50	34.05	17.95 ± 6.52	36.34
丰都	137.43 ± 181.24	131.88	$9\,295.44 \pm 5\,405.60$	58.15	54.67 ± 15.13	27.68	15.86 ± 6.62	41.77
涪陵	126.72 ± 149.42	117.91	$12\,743.60 \pm 7\,335.19$	57.56	42.96 ± 13.52	31.47	19.39 ± 5.01	25.85
均值	66.48 ± 150.92	227.00	$12\,922.86 \pm 17\,367.15$	134.39	44.23 ± 14.67	33.17	17.14 ± 7.78	45.42

表 5 土壤 CDOM 与其它水体的比较

Table 5 Comparison of soils CDOM and other waters

采样点	$a(355)/\text{m}^{-1}$	文献 ¹⁾
珠江口和南海北部湾	0.069 ~ 0.788	[35]
太湖河口区	3.38 ~ 5.65	[12]
太湖开敞区	1.42 ~ 2.46	[12]
长江口口外近岸区	0.80 ~ 3.09	[13]
长江口口外远岸区	0.01 ~ 1.58	[13]
Chesapeake 海湾(淡水)	2.3 ~ 4.1	[1]
Chesapeake 海湾(海水)	0.4 ~ 1.5	[1]
石头口门水库 6 月	2.492 ~ 14.734	[36]
石头口门水库 9 月	3.602 ~ 9.062	[36]
珠江河口	0.24 ~ 1.93	[19]
Barataria 河口丰水期	3.25 ~ 20.76	[37]
Barataria 河口枯水期	1.48 ~ 25.45	[37]
珠江河口	0.34 ~ 1.40	[38]
三峡库区消落带土壤	0.96 ~ 874.89	本研究

1) 文献[1]保留小数点后 1 位,文献[35,36]保留小数点后 3 位

CDOM 是 DOM 的重要组成部分. 用吸收系数 $a(355)$ 表征 CDOM 浓度,各区县消落带土壤 $a(355)$ 变化范围为 $0.96 \sim 874.89 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $66.48 \text{ m}^{-1} \pm 150.92 \text{ m}^{-1}$. CDOM 平均浓度大小顺序为: 忠县 > 丰都 > 涪陵 > 万州 > 巫山 > 云阳 > 奉节 > 开县. 忠县、丰都和涪陵土壤 $a(355)$ 明显高于其它区县. 不同区县消落带土壤 CDOM 浓度变异系数有较大差异(表 4),其中,忠县、丰都和涪陵的变异系数最大,变异系数最小的是云阳,为 48.20%. 与其它水体 CDOM 浓度相比(表 5),土壤 CDOM 浓度较高,说明土壤较水体而言是有机碳的主要碳库^[34],土壤

CDOM 经地表径流、淋溶和淹水释放等途径可进入水体,是水体 CDOM 的重要来源之一.

荧光溶解性有机物(fluorescent dissolved organic matter, FDOM)是 CDOM 中吸收紫外-可见光后发出荧光的部分,是了解 DOM 结构性质的一个重要前提. 消落带土壤 DOM 荧光强度 $F_n(355)$ 变化范围为 $1\,318.88 \sim 122\,975.30 \text{ a. u.}$, 均值为 $12\,922.86 \text{ a. u.} \pm 17\,367.15 \text{ a. u.}$. DOM 荧光强度大小顺序为: 忠县 > 万州 > 涪陵 > 奉节 > 巫山 > 云阳 > 开县 > 丰都. 忠县最大,为 $28\,655.19 \text{ a. u.} \pm 46\,950.77 \text{ a. u.}$; 丰都最小,为 $9\,295.44 \text{ a. u.} \pm 5\,405.60 \text{ a. u.}$. 不同区县消落带土壤 DOM 荧光强度变异系数有较大差异,其中,忠县的变异系数超过 100%,变异系数最小的是云阳,为 15.74%. 本研究中,土壤 DOM 浓度

变异系数较高,非荧光组分变化较大, $F_n(355)$ 与 DOC 相关性不显著($P > 0.05$). 但 $F_n(355)$ 与 $a(355)$ 仍呈极显著相关($r = 0.744, P < 0.01$),表明即使 DOM 来源和化学组成差异很大,但 DOM 荧光团与生色团间均存在显著线性相关^[37].

CDOM 浓度与荧光强度的区域分布并不一致,可能是因为: ①三峡库区退水后,消落带土壤 DOM 受农业耕作、居民生活、植被覆盖类型等影响,外源输入强度不同,使得荧光组分的区域分布存在差异; ② FDOM 是 CDOM 吸光后发出荧光的部分,但并非所有 CDOM 吸光后都会发出荧光,且不同区县土壤所受微生物活动和光照的影响也不同.

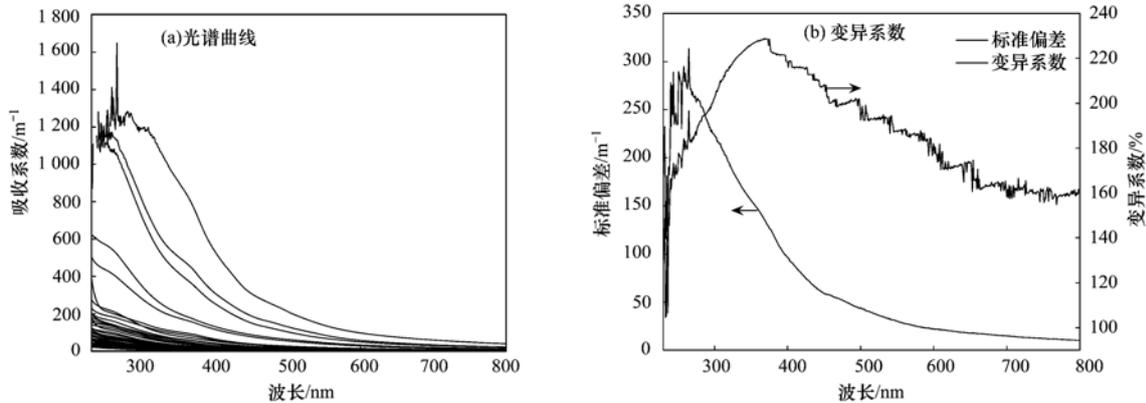


图 2 三峡库区消落带土壤 DOM 紫外-可见吸收光谱和变异系数

Fig. 2 Ultraviolet-visible spectroscopy and variable coefficients of DOM in soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir Region

DOM 的分子量大小、芳香性以及疏水性可以通过土壤溶液的光谱特征参数来表征(表 6). 光谱斜率比值 S_R 是对光谱斜率 S 的改进^[20,21],与 DOM 浓度无关^[40],能够定性反映 DOM 地化特征^[20],例如分子量和光化学潜能. S_R 值与分子量呈反比^[20,21,41]. 本研究各区县消落带土壤 DOM 的 S_R 变化范围为 0.12 ~ 1.60,均值为 0.96 ± 0.34 . 云阳 S_R 最大,为 1.19 ± 0.33 ,开县 S_R 最小,为 0.69 ± 0.27 . 已有研究表

2.2 紫外-可见吸收光谱特征

从 DOM 吸收光谱曲线可以看出[图 2(a)],总体上吸收系数随波长增加呈指数形式递减. 当 DOM 共轭结构较多、腐殖化程度较高时,吸光能力也较强,吸收光谱向长波方向移动(红移). 消落区土壤 DOM 吸收系数的变异系数在 104.57% ~ 228.80% 之间[图 2(b)],表明消落区土壤 DOM 的光谱特征均存在较大地域差异. 其中,忠县、丰都、涪陵分别有 1 个样本的吸收曲线在 250 ~ 260 nm 段存在明显的较强吸收峰,表明其体系中可能含有两个双键的共轭体系,例如共轭二烯、 α, β -不饱和酮等^[39].

明^[42], S 值的变化一般来自于 CDOM 组成的差异,其值也可作为区分 CDOM 来源和组成的参数,本研究各区县消落带土壤 CDOM 的 S_R 值大小不一,因而认为各区县消落带土壤 CDOM 组成存在差异.

SUVA₂₅₄ 越大,DOM 芳香化程度越高^[23]. 三峡库区消落带土壤 DOM 的 SUVA₂₅₄ 变化范围为 0.29 ~ 27.31 L·(mg·m)⁻¹,均值为 $3.32 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1} \pm 5.24 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$,忠县、丰都和涪陵明显高于其

表 6 S_R 、SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀ 的描述统计

Table 6 Descriptive statistics of S_R , SUVA₂₅₄ and SUVA₂₆₀

区县	S_R	变异系数/%	SUVA ₂₅₄ /L·(mg·m) ⁻¹	变异系数/%	SUVA ₂₆₀ /L·(mg·m) ⁻¹	变异系数/%
巫山	1.09 ± 0.22	20.31	1.29 ± 0.57	43.87	1.23 ± 0.55	44.46
奉节	0.75 ± 0.38	49.92	1.13 ± 0.66	58.41	1.08 ± 0.64	59.10
云阳	1.19 ± 0.33	27.43	1.39 ± 0.91	65.35	1.33 ± 0.87	65.67
开县	0.69 ± 0.27	39.73	1.01 ± 0.44	43.72	0.97 ± 0.43	44.28
万州	1.01 ± 0.53	52.85	1.97 ± 1.45	73.62	1.88 ± 1.38	73.71
忠县	0.88 ± 0.39	44.06	7.06 ± 10.11	143.28	7.67 ± 11.87	154.71
丰都	0.99 ± 0.16	15.87	5.29 ± 5.48	103.44	5.14 ± 5.34	103.96
涪陵	1.09 ± 0.16	14.44	7.41 ± 7.55	101.90	7.16 ± 7.30	102.03
均值	0.96 ± 0.34	35.78	3.32 ± 5.24	157.93	3.31 ± 5.61	169.70

它区县. $SUVA_{260}$ 与疏水性有机质所占比例成正比^[24], 三峡库区消落带土壤 DOM 的 $SUVA_{260}$ 变化范围为 $0.27 \sim 31.61 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$, 均值为 $3.31 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1} \pm 5.61 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$, 忠县、丰都和涪陵明显高于其它区县.

从相关性分析来看(表 7), 消落带土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$ 与 $SUVA_{260}$ 呈显著正相关关系 ($P < 0.01$),

表 7 紫外-可见吸收光谱参数与土壤有机质、pH 的相关性¹⁾

Table 7 Correlations among ultraviolet-visible absorption spectrum parameters, soil organic matter and pH

	S_R	$SUVA_{254}$	$SUVA_{260}$	DOC	土壤 pH	土壤有机质
S_R	1					
$SUVA_{254}$	0.014	1				
$SUVA_{260}$	-0.025	0.995 **	1			
DOC	0.222	0.150	0.136	1		
土壤 pH	-0.150	-0.292 *	-0.277	-0.145	1	
土壤有机质	-0.140	-0.124	-0.129	0.023	0.010	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

2.3 荧光光谱特征

3D-EEM 总荧光强度(TOT)和各荧光团(峰)荧光强度的积分方法是对 3D-EEM 进行定量分析的一种有效手段, 有助于研究 DOM 荧光团变化^[32]. 本研究各区县消落带土壤 DOM 的 3D-EEM 均表现出相似荧光指纹(图 3): 存在两类 4 个荧光峰, 分别是类腐殖质荧光峰 A、C、M 和类蛋白荧光峰 T.

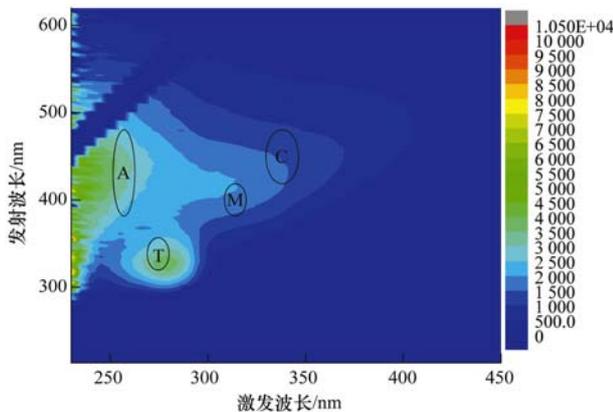


图 3 土壤 DOM 的典型 3D-EEM 谱图

Fig. 3 Typical 3D-EEM spectra of soil DOM

各区县消落带土壤 DOM 的 TOT 大小顺序为: 忠县 > 万州 > 云阳 > 丰都 > 巫山 > 奉节 > 开县 > 涪陵, 尽管与 $F_n(355)$ 大小顺序不一致, 但通过相关性分析, TOT 与 DOM 单点荧光强度 $F_n(355)$ 呈极显著相关 ($r = 0.959, P < 0.01$), 与 $a(355)$ 也呈极显著相关 ($r = 0.793, P < 0.01$), 同时, TOT 考虑了 CDOM 中每个荧光团的贡献, 能全面反映 CDOM 荧光团浓度, 因此, TOT 也可作为表征三峡库区消落带土壤

表明疏水性和芳香结构关系密切, 即芳香性结构主要存在于疏水组分中. $SUVA_{254}$ 与 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 可能是由于土壤 pH 低, 土壤有机质的矿化速率降低^[43], 土壤 DOM 保留的芳香性结构更多; 另外, 较低的 pH 值可以导致土壤中有有机物-金属体系溶解, 原来通过内层结合(inner-sphere)等方式作用的芳香性结构得到释放^[44].

CDOM 荧光团含量的指标.

各区县消落带土壤 DOM 各荧光团(峰)占总荧光强度的比例如表 8 所示, 类腐殖质荧光峰 A 所占比例最高. 峰 C 荧光区域积分比例较小, 可能是由于可见光区类腐殖质主要由一些相对稳定高分子量腐殖组分组成, 光漂白潜力较高, 发生光化学降解的程度较大^[20,30,41], 导致其区域积分比例较小. 从整体来看, 本研究消落带土壤类腐殖质含量相对较高, 这可能与库区退水后人类农业生产活动产生的植物枯落物、土壤微生物活动产生的有机物有关; 而类蛋白荧光强度也相对较高, 这可能与生活污水、工业废水的大量输入、农业施肥及土壤中微生物产生的类蛋白质物质等有关.

利用 SPSS 19.0 对整个区域样本的 DOC、 $a(355)$ 和各荧光组分含量作主成分分析, 识别出的两个主因子解释了这些参数变化的 84.0% (图 4). 其中, 主因子 1 解释了 61.2% 的变化, 并且与各荧光组分、 $a(355)$ 正相关, 与 DOC 负相关. 表 9 列出了各荧光峰之间相关性, 三峡库区消落带土壤 DOM 各荧光峰之间均达到极显著相关 ($P < 0.01$), 表明它们可能有着相同来源、或相似化学结构. 另外, T 峰与 $a(355)$ 的关系较密切(图 4), 而 A、C、M 峰与 $a(355)$ 距离较远, 表明类蛋白峰 T 对 CDOM 组分的影响较大. 由此可知, 所有样本中类腐殖质组分相对稳定, 而影响 CDOM 浓度差异的主要因素是类蛋白质物质. 各荧光峰与 DOC 相关性不显著(表 9), 可能是因为三峡库区退水后, 消落区土壤 DOM 受农业耕作(例如农家肥的施用、作物种植等)、居民生

表 8 3D-EEM 各荧光团(峰) 占总荧光强度的比例/%

Table 8 Proportion of 3D-EEM fluorophores (peaks) in total fluorescence intensity/%

区县	A/TOT	变异系数	C/TOT	变异系数	M/TOT	变异系数	T/TOT	变异系数
巫山	39.27 ± 27.85	70.91	10.29 ± 5.95	57.82	8.87 ± 5.83	65.74	17.41 ± 29.26	168.02
奉节	31.66 ± 10.89	34.38	10.48 ± 3.77	36.00	8.26 ± 2.78	33.66	4.71 ± 1.25	26.59
云阳	27.90 ± 8.68	31.10	7.21 ± 2.55	35.36	5.60 ± 1.90	33.94	3.86 ± 0.73	18.96
开县	35.67 ± 6.78	19.00	10.57 ± 2.11	19.98	7.48 ± 1.37	18.27	5.29 ± 0.87	16.39
万州	26.15 ± 12.70	48.59	7.87 ± 3.98	50.60	5.90 ± 2.83	47.88	3.35 ± 1.14	33.99
忠县	20.84 ± 13.03	62.54	5.81 ± 3.82	65.72	4.40 ± 2.65	60.31	5.74 ± 6.36	110.80
丰都	23.81 ± 17.31	72.73	6.58 ± 5.14	78.01	5.03 ± 3.94	78.32	4.08 ± 1.38	33.89
涪陵	28.85 ± 19.98	69.25	7.52 ± 5.79	77.00	5.73 ± 4.11	71.81	6.75 ± 3.46	51.25
均值	29.27 ± 15.83	54.10	8.29 ± 4.39	52.91	6.41 ± 3.52	54.86	6.40 ± 10.77	168.42

活等影响,外源输入强度不同,一方面使得荧光组分变化存在差异;另一方面使得非荧光物质在 DOM 中所占比例不同,因此导致不同样本 DOC 与荧光强度相关性并不一致. 另外,CDOM 可以通过光化学过程被降解,转变成非吸光组分^[45];微生物也可以吸收非吸光组分,产生吸光组分^[46]. 因此,单纯的 DOC 指标并不足以全面描述 DOM 的地化特征变化.

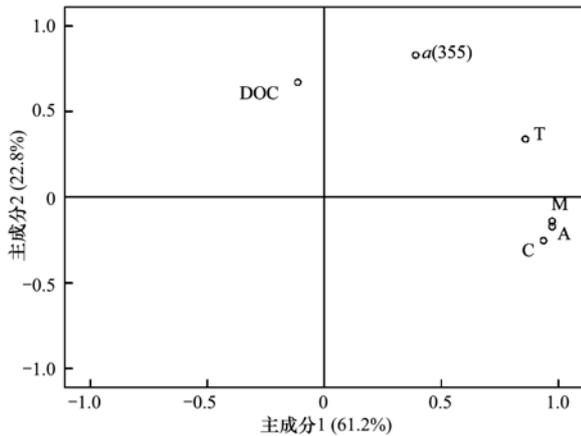
图 4 DOM 各荧光峰、DOC、 $a(355)$ 主成分分析Fig. 4 Principal component analysis of fluorescent peaks, DOC and $a(355)$ 表 9 DOM 不同荧光峰之间相关性¹⁾

Table 9 Correlations among different fluorescence components of DOM

	A	C	M	T	DOC
A	1				
C	0.974 **	1			
M	0.985 **	0.987 **	1		
T	0.742 **	0.633 **	0.732 **	1	
$a(355)$	0.216	0.097	0.198	0.674 **	
DOC	-0.104	-0.121	-0.128	-0.071	1

1) ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

FI 反映了芳香氨基酸与非芳香物对 DOM 荧光强度的相对贡献率,可以作为 DOM 来源及降解程度的评价指标^[27,47]. 本研究消落带土壤 DOM 的 FI 在 1.39 ~ 1.84 之间,变异系数为 6.54%. 各区县 FI 平均值更接近陆源特征值 1.4 (表 10).

HIX 表征 DOM 腐殖化程度, HIX 值越高, DOM 腐殖化程度越高. 为便于数据对比,本研究采用 HIX_a 和 HIX_b 两种形式来进行表征 (表 10). 消落区土壤 DOM 的 HIX_a 在 0.15 ~ 7.75 之间,均值为 2.84 ± 1.69. 各区县 HIX_a 平均值均小于 5,表明其土壤的腐殖化程度均不高. Huguet 等^[30]指出,当 HIX_a 小于 4 时, DOM 腐殖化程度较弱,主要由微生

表 10 FI、HIX_a、HIX_b、BIX 的描述统计Table 10 Descriptive statistics of FI, HIX_a, HIX_b and BIX

区县	FI	变异系数/%	HIX _a	变异系数/%	HIX _b	变异系数/%	BIX	变异系数/%
巫山	1.64 ± 0.13	8.20	2.05 ± 1.40	68.30	0.59 ± 0.24	41.61	0.83 ± 0.17	20.00
奉节	1.63 ± 0.09	5.71	3.17 ± 1.11	35.07	0.74 ± 0.08	10.13	0.75 ± 0.11	14.13
云阳	1.48 ± 0.06	3.78	3.35 ± 1.50	44.70	0.75 ± 0.07	9.54	0.68 ± 0.09	13.64
开县	1.43 ± 0.04	2.96	4.10 ± 1.08	26.37	0.80 ± 0.03	4.32	0.59 ± 0.01	2.14
万州	1.54 ± 0.08	5.17	4.21 ± 1.97	46.87	0.79 ± 0.07	8.90	0.67 ± 0.07	10.22
忠县	1.54 ± 0.08	5.08	2.26 ± 1.99	87.99	0.56 ± 0.28	49.36	0.82 ± 0.21	26.10
丰都	1.56 ± 0.07	4.42	2.12 ± 1.56	73.49	0.58 ± 0.26	45.80	0.83 ± 0.27	32.00
涪陵	1.49 ± 0.06	4.05	1.48 ± 1.15	77.87	0.53 ± 0.19	37.03	0.76 ± 0.12	16.31
均值	1.54 ± 0.10	6.54	2.84 ± 1.69	59.41	0.67 ± 0.20	29.76	0.74 ± 0.16	21.97

物活动产生. 为避免内滤效应干扰, 采用改进 HIX 值(HIX_b)得出消落带土壤 DOM 的 HIX_b 在 0.13 ~ 0.89 之间, 均值为 0.67 ± 0.20 , 也进一步证明该结果.

BIX 是反映 DOM 自生源相对贡献的重要指标, 也用来评价其生物可利用性高低. 消落带土壤 DOM 的 BIX 在 0.57 ~ 1.36 之间, 均值为 0.74 ± 0.16 . 除开县, 各区县 BIX 平均值在 0.7 ~ 0.8 左右 (表 10), 表明所有样本均具有中度新近自生源特征, 即自生源特征较显著, 生物可利用性较高, 因此有利于土壤微生物群落生成. 而土壤微生物活性较高, 有利于增加土壤 DOM 中类蛋白组分, 这也正可以解释前文中 CDOM 浓度和类蛋白组分较高相关性 (表 9).

紫外光区荧光(A 峰)主要由一些低分子量(高荧光效率)腐殖物质引起; 而可见光区荧光(C 峰)则来自相对稳定高分子量腐殖组分^[30,48], 因此, $r_{(A/C)}$ 值可用来反映 DOM 中腐殖组分发育程度^[30,31]. 本研究消落带土壤 DOM 的 $r_{(A/C)}$ 分布在 2.48 ~ 7.66 之间, 均值为 3.73 ± 0.85 . 各区县消落带土壤 DOM 的 $r_{(A/C)}$ 平均值均较高 (表 11), 这可能和 DOM 频繁的光化学行为有关, 类腐殖质 C 峰的光化学活性强于 A 峰, 更易发生光降解^[20,41], 7 ~ 8 月正值三峡库区消落带太阳辐照强度最高时段, 结构复杂的大分子有机质被光降解成低分子量有机质

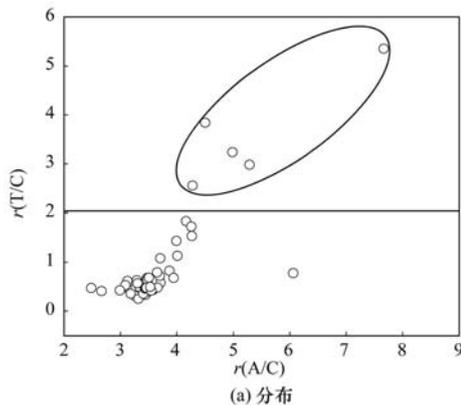


表 11 $r_{(A/C)}$ 、 $r_{(T/C)}$ 的描述统计

Table 11 Descriptive statistics of $r_{(A/C)}$ and $r_{(T/C)}$

区县	$r_{(A/C)}$	变异系数/%	$r_{(T/C)}$	变异系数/%
巫山	3.71 ± 0.49	13.17	1.31 ± 1.30	99.88
奉节	3.04 ± 0.38	12.38	0.47 ± 0.08	16.93
云阳	3.98 ± 1.03	25.75	0.58 ± 0.18	30.68
开县	3.38 ± 0.09	2.73	0.51 ± 0.11	21.08
万州	3.37 ± 0.22	6.41	0.49 ± 0.17	34.04
忠县	3.89 ± 0.74	19.00	1.43 ± 1.24	86.59
丰都	4.36 ± 1.64	37.70	1.57 ± 1.93	123.29
涪陵	4.11 ± 0.63	15.35	1.30 ± 0.93	71.52
均值	3.73 ± 0.85	22.74	0.96 ± 1.02	106.97

时 $r_{(A/C)}$ 升高.

$r_{(T/C)}$ 是类蛋白荧光与类腐殖质荧光的比值, 可用以评价内源贡献比重, DOM 受人为排放影响的 $r_{(T/C)}$ 值 > 2.0 ^[48,49]. 本研究消落带土壤 DOM 的 $r_{(T/C)}$ 分布在 0.25 ~ 5.35 之间, 均值为 0.96 ± 1.02 . 从表 11 可看出, 巫山、忠县、丰都和涪陵 $r_{(T/C)}$ 的变异系数较大, 主要是由于以上 4 个区县有 5 个采样点的 $r_{(T/C)} > 2.0$ [图 5(a)]. 结合采样点周边的土地利用类型, 这 5 个采样点主要为农田生态系统 (玉米地和菜地), 农业活动导致大量氮、磷及蛋白质等进入土壤系统, 为微生物活动提供充足的营养物质, 导致土壤 DOM 的类蛋白质组分较高. 而其它采样点为草地生态系统, 尤其是落干期, 植被大量生长 [图 5(b)], 成为土壤 DOM 的重要来源.



(b) 沿岸植被生长情况

图 5 DOM 的 $r_{(A/C)}$ - $r_{(T/C)}$ 分布图及沿岸植被生长情况

Fig. 5 Distribution of $r_{(A/C)}$ - $r_{(T/C)}$ of DOM and riparian vegetations growth in sampling sites

将本研究土壤 DOM 的荧光参数与其它研究进行对比 (表 12) 发现, 其腐殖化程度, 较 Limagne 平原土壤、Poland 土壤、Elliott 土壤 (IHSS) DOM、北方森林土壤孔隙水 DOM (陆源输入为主) 和 Gironde 河口 DOM (陆源输入为主) 低, 与污泥堆肥 DOM (自生源为主)、乌梁素海沉积物孔隙水、厦门雨水相差不大.

另外, BIX 值稍低于其他自生源为主的样本. 由此可见, 本研究区域土壤 DOM 样本自生源特征较高, 腐殖化程度较低, 微生物活动导致的类蛋白质变化可能是 DOM 地化特征改变的主要驱动力; 结合当地情况, 人为活动 (包括农作及生活) 的影响, 也是该区域 DOM 类蛋白组分特征明显的重要原因.

表 12 不同来源 DOM 荧光参数的对比

Table 12 Comparison of fluorescence spectrum parameters of DOM from different sources

DOM 来源	FI	HIX _a	HIX _b	BIX	文献
Limagne 平原土壤	— ¹⁾	—	0.841	—	[50]
Poland 土壤	—	—	0.835	—	
Elliott 土壤(IHSS)	—	—	0.800	—	
洞穴水和泉水	>1.6	<5	—	0.5~3.0	[51]
北方森林土壤孔隙水	1.23~1.27	—	0.94~0.96	—	[52]
雾水	1.42~1.83	1.76~6.79	—	0.64~1.02	[53]
乌梁素海沉积物孔隙水	—	2.52~5.64	—	0.77~0.94	[54]
乌梁素海沉积物	1.74~1.96	—	—	—	[55]
Gironde 河口	1.17~1.21	2.6~15.2	—	0.61~0.92	[56]
Gironde 河口	1.14~1.24	2~17	—	0.60~0.95	[30]
污泥堆肥(+小麦秸秆炭)42 d	1.74	—	0.69	0.80	[57]
污泥堆肥(+花生壳炭)42 d	2.02	—	0.53	1.04	
北太平洋海水	1.54~1.77	0.92~1.80	—	0.88~1.38	[58]
厦门雨水	—	<4	<0.8	>0.7	[59]
三峡库区消落带土壤	1.39~1.84	0.15~7.75	0.13~0.89	0.57~1.36	本研究

1) “—”表示文献中未明确告知

2.4 消落带干湿交替作用对不同高程土壤 DOM 地化特征的影响

三峡库区消落带每年存在较明显水位消涨,夏季落干而冬季淹水,每年5~9月,消落带处于落干期. 160 m 和 170 m 高程土壤 DOM 的紫外-可见吸收参数 [S_R , $SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$] 及荧光参数 [FI, HIX_a/HIX_b , BIX, $r_{(A/C)}$, $r_{(T/C)}$] 不存在显著差异,即消落带干湿交替作用对不同高程土壤 DOM 地化特征影响的差异较小,这和笔者之前的研究结果一致^[14]. 尽管 160 m 高程土壤淹水时间较 170 m 长约 3 个月(图 6),但一方面本研究采样时间在 7~8 月,正值太阳辐照强度较高时段,160 m 和 170 m 高程消落带土壤 DOM 受光漂白过程和生物降解过程影响较为强烈;另一方面,库区消落带退水后,草本植被生长产生枯落物及根系分泌物,人类农业生产活动产生的植物枯落物,生活污水、工业废水通过径流等过程进入土壤,均会干扰土壤 DOM 所经历的地化过程,从而导致不同高程土壤 DOM 差异性不显著.

通过 T 检验 (T -test) 发现 160 m 高程土壤 CDOM 浓度 ($46.95 \text{ m}^{-1} \pm 98.02 \text{ m}^{-1}$) 显著低于 170 m ($86.02 \text{ m}^{-1} \pm 190.10 \text{ m}^{-1}$) ($P < 0.01$),这与 CDOM 浓度的主要贡献者——类蛋白质有关. 由于 170 m 高程土壤出露时间较 160 m 长,有机质分解较为旺盛,植物蛋白(例如糖蛋白)分解进入土壤^[60];同时农业翻耕和植被生长会使得该高程土壤微生物活性增强,土壤中蛋白质含量增加,从而导致 170 m 高程土壤 DOM 中类蛋白质组分含量较多.

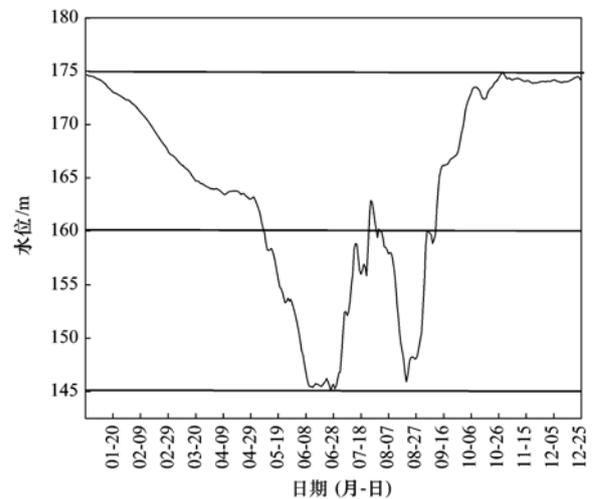


图 6 2012 年三峡库区消落带水位的变化

Fig. 6 Water level variation of water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir Region in 2012

表征 DOM 来源的 3 个荧光指标中,FI 与 HIX、BIX 表征的结果不一致. 本研究采样时段光照强度大,陆源特征为主 DOM 和自生源特征为主 DOM 相比,发生光漂白的潜力更大. 光降解可将结构复杂的大分子有机质分解成微生物可利用的小分子有机质,这一过程会在 HIX、BIX 上有所反映,而 FI 易受 DOM 来源、光学特性和历史光照等影响^[58],较为不稳定. 因此,采用 FI 值评估 DOM 性质时,需进一步结合采样点生态环境和周边土地利用类型等进行分析.

通过与国内水库、河流、湖泊及海洋水体 DOM 荧光光谱峰的对比^[9,12,35,61,62],发现土壤 DOM 中含有

的荧光峰与水体 DOM 相似. 因此,当三峡水库涨水时,土壤中 DOM 通过水动力学过程释放到水体中,会成为水库水体 DOM 的重要来源之一. 本研究是三峡库区消落带土壤 DOM 地化特征长期观测工作的重要组成部分,今后还将对更大范围、更多高程,且生物地球化学特征、植被覆盖存在差异的土壤进行研究,以进一步全面评估干湿交替作用对消落带不同高程土壤 DOM 地化特征、水体 DOM 地化特征及水体中污染物迁移转化的影响.

3 结论

(1)各区县消落带土壤 CDOM 平均浓度大小顺序为:忠县>丰都>涪陵>万州>巫山>云阳>奉节>开县,其中,忠县、丰都和涪陵土壤 CDOM 浓度 [$a(355)$]、芳香性 ($SUVA_{254}$) 和疏水组分 ($SUVA_{260}$) 明显高于其它区县,而其腐殖化程度 (HIX) 较其它区县偏低,这可能与土壤有机质矿化速率较高有关.

(2)三峡库区消落带土壤 DOM 中含有类腐殖质荧光团 A、C、M 和类色氨酸荧光团 T. 3D-EEM 总荧光强度 (TOT) 可作为表征三峡库区消落带土壤 CDOM 荧光团含量的指标.

(3)所有 DOM 样本均呈现出腐殖化程度较低、生物可利用性较高的特征. DOM 中类腐殖质组分较为稳定,影响 CDOM 浓度变化的主要因素是类蛋白质,除受人为农作活动影响外,还可能和土壤较高微生物活性及落干期植被生长有关.

(4)库区 160 m 和 170 m 高程消落带土壤 DOM 地化特征无明显差异,表明干湿交替过程对该区域土壤 DOM 地化特征影响不显著. 而关于土地利用类型、沿岸植被生长、光漂白和生物降解等对该区域土壤 DOM 地化特征的具体影响还需作进一步研究.

参考文献:

- [1] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41.
- [2] Battin T J, Luyssaert S, Kaplan L A, *et al.* The boundless carbon cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 598-600.
- [3] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(6): 1083-1087.
- [4] O'Driscoll N J, Siciliano S D, Peak D, *et al.* The influence of forestry activity on the structure of dissolved organic matter in lakes; implications for mercury photoreactions[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(2-3): 880-893.
- [5] 周艳翔, 吕茂奎, 谢锦升, 等. 深层土壤有机碳的来源、特征与稳定性[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2013, **8**(1): 48-55.
- [6] 冯孝杰, 魏朝富, 谢德体, 等. 周期性淹水对消落区水环境的影响及控制对策[J]. *中国农学通报*, 2005, **21**(10): 356-359.
- [7] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2004, **18**(6): 120-123.
- [8] 吴丰昌. 天然有机质及其与污染物的相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] 傅平青, 吴丰昌, 刘丛强, 等. 高原湖泊溶解有机质的三维荧光光谱特性初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 2007, **38**(6): 512-519.
- [10] Zhang Y L, Yin Y, Feng L Q, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis[J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5110-5122.
- [11] Gao L, Fan D D, Li D J, *et al.* Fluorescence characteristics of chromophoric dissolved organic matter in shallow water along the Zhejiang coasts, southeast China [J]. *Marine Environmental Research*, 2010, **69**(3): 187-197.
- [12] 刘明亮, 张运林, 秦伯强. 太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸收和三维荧光特征[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 234-241.
- [13] 闫丽红, 陈学君, 苏荣国, 等. 2010 年秋季长江口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 51-59.
- [14] 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): 933-939.
- [15] 杨艳. 三峡库区消落区土壤溶解有机质荧光特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [19] Hong H S, Wu J Y, Shang S L, *et al.* Absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Marine Chemistry*, 2005, **97**(1-2): 78-89.
- [20] 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.
- [21] Zhang Y L, Liu M L, Qin B Q, *et al.* Photochemical degradation of chromophoric-dissolved organic matter exposed to simulated

- UV-B and natural solar radiation[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1): 159-168.
- [22] 苏冬雪,王文杰,邱岭,等. 落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2012, **32**(21): 6705-6714.
- [23] 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.
- [24] Jaffrain J, Gérard F, Meyer M, *et al.* Assessing the quality of dissolved organic matter in forest soils using ultraviolet absorption spectrophotometry[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(6): 1851-1858.
- [25] 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.
- [26] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [27] 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.
- [28] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al.* Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(1): 45-50.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [32] Kowalczyk P, Stoń-Egiert J, Cooper W J, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Baltic Sea by excitation emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2005, **96**(3-4): 273-292.
- [33] Parlanti E, Wörz K, Geoffroy L, *et al.* Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(12): 1765-1781.
- [34] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, **478**(7367): 49-56.
- [35] 王福利,郭卫东. 秋季南海珠江口和北部湾溶解有机物的光降解[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(3): 606-612.
- [36] 姜广甲,刘殿伟,宋开山,等. 长春市石头口门水库 CDOM 的光学特性[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2009, **26**(5): 640-646.
- [37] Singh S, D'Sa E, Swenson E. Seasonal variability in CDOM absorption and fluorescence properties in the Barataria Basin, Louisiana, USA [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(10): 1481-1490.
- [38] Chen Z Q, Li Y, Pan J M. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, **24**(16): 1845-1856.
- [39] Pretsch E, Bühlmann P, Badertscher M. Structure determination of organic compounds: tables of spectral data[M]. (4th ed.). Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [40] 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.
- [41] Xiao Y H, Sara-Aho T, Hartikainen H, *et al.* Contribution of ferric iron to light absorption by chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(2): 653-662.
- [42] Carder K L, Steward R G, Harvey G R, *et al.* Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(1): 68-81.
- [43] Guggenberger G, Glaser B, Zech W. Heavy metal binding by hydrophobic and hydrophilic dissolved organic carbon fractions in a spodosol A and B horizon[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1994, **72**(1-4): 111-127.
- [44] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils; a review[J]. *Soil Science*, 2000, **165**(4): 277-304.
- [45] Vodacek A, Blough N V, DeGrandpre M D, *et al.* Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: Terrestrial inputs and photooxidation [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 674-686.
- [46] Nelson N B, Carlson C A, Steinberg D K. Production of chromophoric dissolved organic matter by Sargasso Sea microbes [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 273-287.
- [47] Mladenov N, McKnight D M, Macko S A, *et al.* Chemical characterization of DOM in channels of a seasonal wetland [J]. *Aquatic Sciences*, 2007, **69**(4): 456-471.
- [48] Baker A, Curry M. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills[J]. *Water Research*, 2004, **38**(10): 2605-2613.
- [49] 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.
- [50] Nkhili E, Boguta P, Bejger R, *et al.* Photosensitizing properties of water-extractable organic matter from soils[J]. *Chemosphere*, 2014, **95**: 317-323.

- [51] Birdwell J E, Engel A S. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-Vis absorbance and fluorescence spectroscopy[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(3): 270-280.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 郭旭晶, 彭涛, 王月, 等. 湖泊沉积物孔隙水溶解性有机质组成与光谱特性[J]. *环境化学*, 2013, **32**(1): 79-84.
- [55] 冯伟莹, 焦立新, 张生, 等. 乌梁素海沉积物溶解性有机质荧光光谱特性[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(6): 1068-1074.
- [56] Huguet A, Vacher L, Saubusse S, *et al.* New insights into the size distribution of fluorescent dissolved organic matter in estuarine waters[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(6): 595-610.
- [57] 闫金龙, 江韬, 赵秀兰, 等. 含生物质炭城市污泥堆肥中溶解性有机质的光谱特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 459-465.
- [58] 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.
- [59] 邓荀, 郭卫东, 卓健富. pH 值对雨水中溶解有机物荧光光谱特征的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(1): 137-141.
- [60] Philben M, Kaiser K, Benner R. Does oxygen exposure time control the extent of organic matter decomposition in peatlands? [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(5): 897-909.
- [61] 方芳, 翟端端, 郭劲松, 等. 三峡水库小江回水区溶解有机物的三维荧光光谱特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(3): 323-327.
- [62] 黄文丹, 周立旻, 郑祥民, 等. 长江河口不同分子量溶解有机物的三维荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(4): 1000-1004.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《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1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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