

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
苾芴胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征

江韬^{1,2}, 卢松¹, 王齐磊¹, 白薇扬^{1,3}, 张成¹, 王定勇^{1*}, 梁俭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; 3. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054)

摘要: 溶解性有机质(DOM)是湖泊生态系统重要组成部分,其性质和结构决定了其在污染物(例如汞)环境行为中扮演着重要角色。本研究选取三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊——长寿湖,采用吸收光谱表征方法,通过1年时间对DOM地球化学变化规律进行了定性定量分析,并结合汞观测数据,讨论了DOM对不同形态汞浓度的影响。结果表明,和1月相比,长寿湖4~11月DOC差异性低于CDOM,4~11月间差异性不显著。有色组分变化是解释DOM季节性变化的重要原因。DOM中主要生色团仍然来自于大分子量的芳香性组分。而CDOM三波长模型可较好对DOC的年际观测进行反演。同时, S_{254} 和 $S_{275-295}$ 季节性变化特征较明显,1月芳香性和分子量均最小,4月上升。与其他类型湖泊相比,长寿湖水体DOM芳香性和分子量大小均低于森林湖泊,但高于高原湖泊。周边生态系统和土地利用类型对湖泊DOM差异影响明显。另外, S_{254} 和DOC与各形态Hg无明显相关性,但水体生色组分和分子量大小是控制溶解态和活性汞的重要因素;而湖区甲基汞变化可能与湖泊初级生产力导致的有机质富集和迁移关系密切。

关键词: 三峡库区; 长寿湖; 溶解性有机质; 天然有机质; 吸收光谱; 汞; 甲基汞

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2073-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.010

Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters

JIANG Tao^{1,2}, LU Song¹, WANG Qi-lei¹, BAI Wei-yang^{1,3}, ZHANG Cheng¹, WANG Ding-yong^{1*}, LIANG Jian¹

(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; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) is an important component in lake eco-systems. It plays a crucial role in the environmental fate of pollutants such as mercury (Hg), because of its specific characteristics and functional structures. In this study, a typical reservoir lake from inland of Three Gorges Reservoir areas, Changshou Lake was selected to track the changes of DOM geochemical properties for one year by using UV-Vis absorption spectroscopy technique. Meanwhile, based on observed Hg data in Changshou Lake, it further validated the key environmental implications of DOM for Hg distributions in lake. The results showed that as compared to January, other months including April, June and September had significantly higher CDOM, but also higher DOC with a slightly decreasing significance. Dynamics of chromophoric component is an important reason to explain the seasonal changes of DOM concentration in Changshou Lake. Chromophores of DOM were mainly derived from high molecular weight (MW) materials with high aromaticity. Also, three wavelengths fitting model of CDOM could be used for inversion of DOC concentration in annual monitoring. Meanwhile, seasonal differences of S_{254} and $S_{275-295}$ were significant. Lowest aromaticity and MW size were observed in January following an obvious increase from April. In contrast to other types of lakes, DOM aromaticity and MW size in Changshou Lake were lower than forest lakes, but higher than plateau lakes. Eco-system and land use types surrounding lakes could have a heavily impact on the heterogeneous properties of DOM. Importantly, no clear differences between concentrations of Hg species and S_{254} and DOC respectively were observed, however chromophoric component and MW size controlled the dissolved Hg and reactive Hg in lake. Additionally, enrichment and migration of organic matter resulted from primary productivity in lake may be a substantial reason to

收稿日期: 2015-12-28; 修订日期: 2016-01-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB430004); 国家自然科学基金项目(41403079, 41373113); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA20021); 中央高校基本科研业务费专项基金重点项目(XDJK2015B035); 重庆市博士后科研项目(Xm2014023)

作者简介: 江韬(1984~),男,博士,讲师,主要研究方向为天然有机质的环境地球化学, E-mail: jiangtower666@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

explain the methylmercury changes.

Key words: Three Gorges Reservoir Areas; Changshou Lake; dissolved organic matter (DOM); natural organic matter; absorption spectrum; mercury; methylmercury

溶解性有机质 (DOM) 作为天然有机质的重要组成部分,广泛存在于土壤、水和大气环境中,尤其在湖泊水生生态环境中扮演着重要作用. 一方面是微生物代谢活动基础^[1],影响水体初级生产力;另一方面有色 DOM (CDOM) 能显著改变水下光场,诱发或介导一系列重要环境光化学反应^[2,3],例如甲基汞光降解^[4]. DOM 不仅作为碳循环组成,对全球气候变化也会产生重要影响,而且深刻影响着污染物的迁移转化^[5]. 湖泊 DOM 的化学组成和性质与其来源密切相关,主要来源包括地表径流和淋溶主导的外源输入和内源贡献(微生物、藻类和浮游植物产生)^[2,6~11];同时湖泊底泥有机质在土-水界面的迁移释放也不容忽视^[12]. 另外,DOM 的化学反应活性和其自身结构密切相关,通过建立“结构-反应活性”(Structure-Reactivity)相关性,可进一步解释 DOM 在水环境、尤其是湖泊环境中,对污染物环境行为的影响^[13~15]. 因此,了解 DOM 地化特征是进一步深入认识其生态环境效应的关键.

长期以来,对于拦坝建库截流形成的水库型湖泊(例如三峡库区和乌江水库),被认为是污染物环境行为较为活跃的“热点”地区^[16~20];而 DOM 在诸多地化反应中的核心角色不容忽视^[5,21]. 基于此,本文作为“三峡库区天然有机质-汞相互作用关系”研究项目一部分,通过 DOM 吸收光谱特征,对三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊——长寿湖 DOM 的部分地化特征进行了定量定性表征和分析;同时以汞为例,结合 2014 年 1~7 月水体各形态汞数据^[22],对汞和 DOM 地化特征进行了相关性分析,以

期解释汞的变化情况.

本研究所选长寿湖是和三峡库区具有类似共性的湖泊生态系统,均因修建水库而成. 作为一种“模式湖区”,尽管不能完全反映库区情况,但研究结果仍有助于深入了解三峡库区 DOM 地化过程和环境角色;同时其科学数据和实践经验也可丰富湖泊的生物地球化学研究,特别是对于因修建水库、河坝形成的湖泊中 DOM 而言.

1 材料与方法

1.1 样品采集

作为三峡库区内陆腹地的重要湖泊,长寿湖水库(E107°14'~107°25',N29°54'~30°50')位于重庆市江津区内,是我国西南地区最大的人工湖(图 1). 长寿湖修建于我国建国初期,是“一五”期间重点工程狮子滩水电站拦河大坝建成以后而形成的人工淡水湖,水库流域面积 3 248 km²,水域面积 65.5 km² (约 10 万亩),库容 10 亿 m³,上游龙溪河为主要湖水补给河流. 长寿湖属于中亚热带湿润气候区,气候湿润,景区内常年平均气温为 17.7℃. 湖周边土地利用形式复杂,以人工林、果园、耕地、居民用地为主.

在长寿湖湖区内设 5 个采样点(图 1). 于 2014 年 1、4、7 和 11 月共开展 4 次采样. 水样装入 HDPE 材质水样瓶 4℃ 冷藏箱保存,24 h 内送回实验室. 采用 HANNA 多参数水质分析仪 (HI98130) 现场测定水样 pH、EC 和 TDS 等指标. 实验室内及时对水样进行水样过滤 (Millipore® 0.45 μm PVDF 材

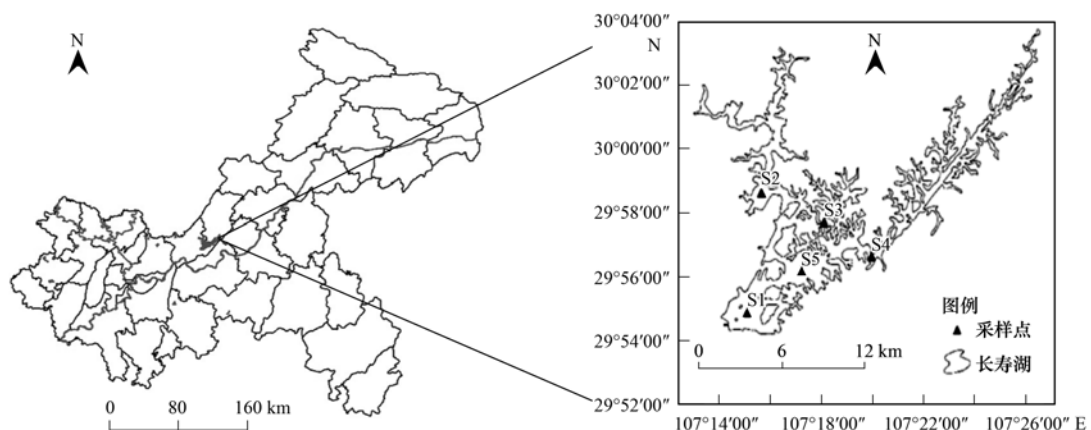


图 1 长寿湖采样点示意

Fig. 1 Sampling locations in a typical reservoir lake, Changshou Lake, Chongqing

质滤膜)后,棕色水样瓶 4℃ 保存备用。

1.2 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 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。DOM 紫外-可见吸收光谱采用日本 Horiba Aqualog® 荧光光谱仪进行扫描。吸收光谱具体扫描步骤为:以 Millipore® 一级水作空白,用石英比色皿(光程 0.01 m)在 230 ~ 800 nm 波长范围内进行吸收扫描。有报道指出 Fe 浓度高于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时会引起较明显吸收干扰^[13,23],但在本研究中,大部分 DOM 样本 Fe 浓度远低于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0.05 \sim 0.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),故不考虑铁的吸收干扰;而仅对少部分样本($[\text{Fe}] > 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)吸收光谱进行校正^[24]。

吸收系数公式:

$$a(\lambda) = 2.303A(\lambda)/l$$

式中, $a(\lambda)$ 为波长 λ 时吸收系数(m^{-1}), $A(\lambda)$ 为吸光度, l 为光程路径(m)。以 355 nm 处吸收系数 $a(355)$ 表示有色溶解性有机质(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)相对浓度^[6,10]。275 ~ 295 nm 吸光区间光谱斜率计算为:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)]$$

式中, λ 是测定波长(nm), λ_0 是参照波长(nm)。 $S_{275 \sim 295}$ 是 DOM 吸收光谱模型中重要参数,为 275 ~ 295 nm 波段光谱斜率,能提供 DOM 组成特征信息,例如分子量大小以及光化学反应活性等^[9,25~27],与分子量大小呈反比。特征参数 $\text{SUVA}_{254} = a(254)/[\text{DOC}]$,为 254 nm 处吸光系数与 DOC 浓度比值,值越大表示 DOM 芳香性越强^[13,24]。

1.3 汞分析及数据分析

用于测汞水样和 DOM 水样相互独立。水样装入硼硅玻璃瓶中,现场酸化后 4℃ 送回实验室。未过滤样测定总汞 (THg),活性汞 (RHg) 和总甲基汞 (TMeHg);过滤样($0.45 \mu\text{m}$)测定溶解态汞 (DHg) 和溶解态甲基汞 (DMeHg)。汞分析参照美国环境保护署(EPA)标准方法 1630 和 1631。采用“氯化溴 (BrCl)(氧化)-氯化亚锡 (SnCl_2)(还原)-金管富集-冷原子荧光(CVAFS)”测定未过滤和过滤后水样中无机汞,分别为 THg 和 DHg;“直接氯化亚锡 (SnCl_2)(还原)-金管富集-冷原子荧光(CVAFS)”测定为过滤水样中 RHg;“蒸馏-乙基化-气相-冷原子荧光”测定未过滤和过滤后水样中有机汞,分别为 TMeHg 和 DMeHg。

非特别注明外,全文均采用 Origin 2015 进行数据统计和图形制作,部分图片制作由 Microsoft Excel

2016 完成。

2 结果与讨论

2.1 DOC 和 CDOM

如图 2,长寿湖 DOC 年均浓度为 $(5.92 \pm 2.70) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (范围 $3.76 \sim 27.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); CDOM 浓度 [$a(355)$] 全年均值为 $(4.93 \pm 1.73) \text{ m}^{-1}$,波动范围为 $1.39 \sim 1.64 \text{ m}^{-1}$ 。1 月和 4 ~ 11 月相比,CDOM 差异明显 ($P = 0.0366$),高于 DOC ($P = 0.0567$);但在 4 ~ 11 月间无显著差异 ($P > 0.05$)。DOC 最高值发生在 4 月底,这可能和春末夏初水温分层导致的藻类及浮游植物大量繁殖有关;同期也观测到水体叶绿素 a 浓度出现最大值 ($54.77 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),这与梅梁湾、大太湖^[8]和 Chesapeake 湾^[6]观测类似。夏季(4 ~ 7 月)内源贡献明显,雨季导致陆源有机质的外源输入增加;而温跃层变化也有利于湖泊底泥 DOM 在土-水界面的交换和扩散,因此 CDOM 上升。但是一系列 DOM 的耗损机制,包括光降解、生物降解、以及 DOM 在矿物固相(例如悬浮颗粒物、底泥等)上的吸附等,又可能导致水体 DOC 减少,降低季节差异性。

同时,本研究对 CDOM 进行归一化处理,得到单位 DOC 含量中 CDOM 相对浓度 [CDOM/DOC , $\text{L}\cdot(\text{mg}\cdot\text{m})^{-1}$],CDOM 与 CDOM/DOC 极显著正相关 ($P < 0.01$) [图 2(d)],这和新安江水库^[28]和波罗的海^[29]情况类似。因此,就长寿湖而言,DOM 含量的季节性变化主要来自于 CDOM 波动。

对于单次采样 DOC 和 CDOM 之间存在相关性偏离 ($P > 0.05$),其可能原因为:①样本量较少, $36 > n > 26$;②季节性变化导致非生色组分变异程度较大,例如藻类和浮游植物产生的小分子有机酸、多糖等物质^[30]。而尤其在夏季(4 月末 ~ 7 月底),较强光照辐射导致 DOM 发生“光漂白”,也可能导致 CDOM 含量损失^[2];同时水温升高导致微生物代谢活动提高,而微生物对 CDOM 降解也是 DOC 和 CDOM 之间缺少相关性的重要原因^[31]。尽管单次采样缺少相关性,但对全年数据而言,CDOM 和 DOC 相关性显著增加 ($P = 0.05$) [图 3(a)];这说明对于年际观测而言,CDOM 变化依然是影响 DOC 波动的重要原因;而 CDOM 的耗损机制影响有限。因此对长寿湖 DOC 年际变化采用 CDOM 反演预测是可行的。同时,这也可能是 7 ~ 11 月 DOC 和 CDOM 变化无显著差异 ($P > 0.05$) 的重要原因。

另外,在湖泊和海洋环境的水色遥感研究中,常

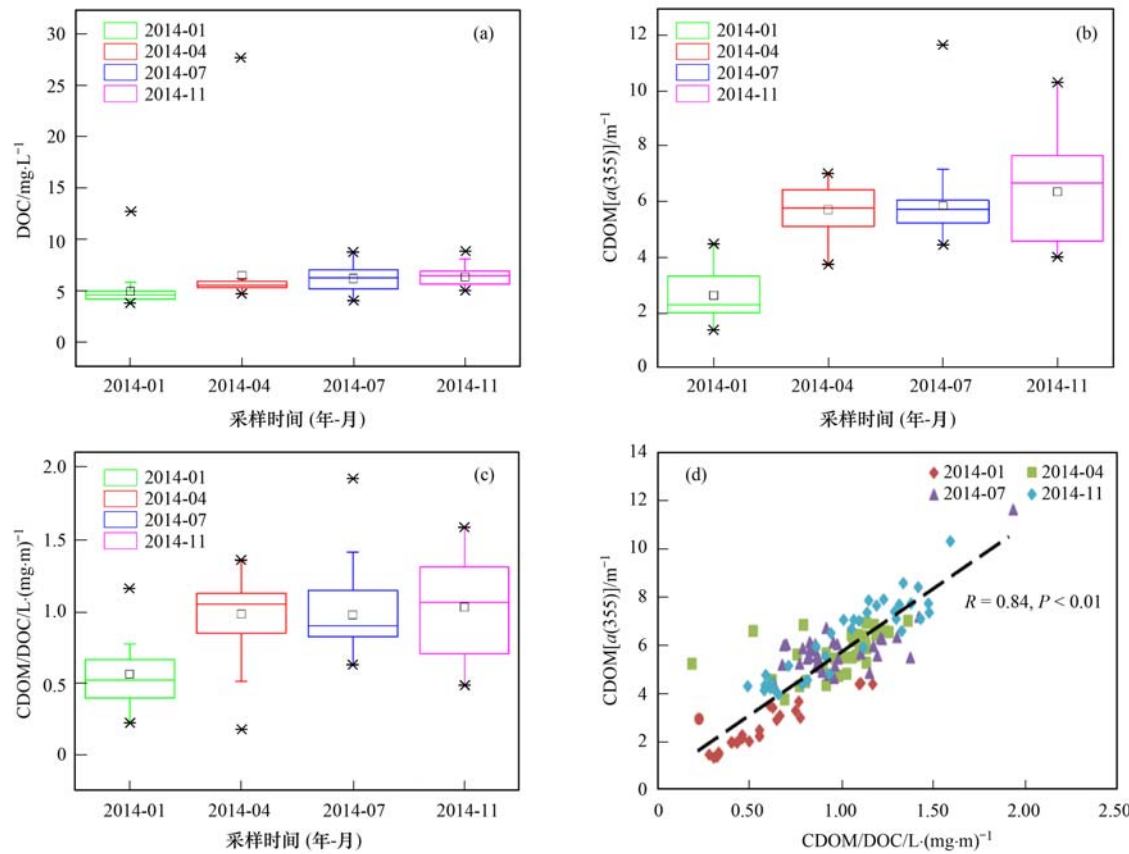


图2 DOC、CDOM 及 CDOM/DOC 变化情况及相关性

Fig. 2 Changes of DOC, CDOM and CDOM/DOC, and correlation plot

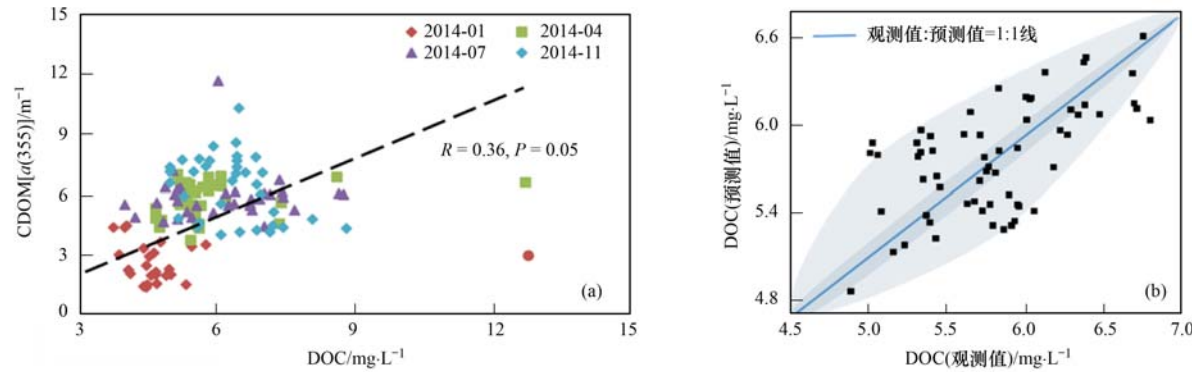


图3 DOC 和 CDOM 相关性以及回归模型验证

Fig. 3 Correlation between DOC and CDOM, and validation of DOC regression fitting model

利用 CDOM 对 DOC 浓度进行反演^[32]. 之前研究发现,采用三波长模型^[9]可以较好反映这种反演关系. 因此,本研究采用如下模型对长寿湖全年数据进行 DOC 估测:

$$\ln[a(355)/\text{DOC}] = A \times \ln[a(275)] + B \times \ln[a(295)] + C$$

式中, $a(355)$ 、 $a(275)$ 和 $a(295)$ 分别为对应波长的吸光系数, A 、 B 、 C 均为常数. 表 1 为模型拟合结果.

表 1 三波长模型回归拟合相关参数

Table 1 Multiple linear regression coefficients of three-wavelength model for DOC estimation

项目	A	B	C	R ²	P
DOM	-3.327	4.140	-1.107	0.65	<0.01

进一步从 2014 年 11 月~2015 年 4 月的 DOM 样本(未用于建模)中,随机抽取 61 个,对该回归模型进行验证[图 3(b)]. 除个别点外,所有样本观测

值(DOC_{obs})和预测值(DOC_{est})间相对误差(RSD) < 10%; 采用 DOC_{obs} 和 DOC_{est} 之间的相对均方根误差(RRMSM)和平均相对误差(MRE)来检验模型精度,分别为 6.86% 和 5.53%,说明该模型在该 DOC 浓度范围内($4.5 \sim 7.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),可以较好地 DOC 浓度进行反演。

2.2 SUVA_{254} 和 $S_{275-295}$

如图 4,长寿湖 SUVA_{254} 年均值(4.87 ± 1.08) $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ [范围 $1.00 \sim 6.91 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$], 季节变化差异显著($P < 0.05$),4 月值最大,7~11 月持续下降,但仍高于 1 月。 $S_{275-295}$ 全年均值为 0.019 ± 0.002 , 范围为 $0.015 \sim 0.025$; 季节差异显著($P < 0.05$),呈持续下降。和 CDOM 变化原因类似,初夏开始(4 月末)雨季导致大量陆源输入,因此

SUVA_{254} 上升,分子量增大($S_{275-295}$ 降低);但同时持续回升的气温导致水体内源代谢活跃,使得在湖区开展的人为活动频繁,带入大量类蛋白物质^[11],也可能导致大分子 DOM 的输入。另外,有研究认为水体周边生态系统和土地利用类型会对 DOM 地化特征产生明显影响^[33]。长寿湖周边土地利用类型包括林地、居民用地和农业用地等,春耕夏作可能导致大量氮磷随径流进入水体系统中,从而使得水体初级生产力增加。由此可进一步推测,7~11 月 SUVA_{254} 下降是由 DOM 的耗损机制起主导作用;而 DOM 分子量增大是因为外源非芳香性大分子物质(例如蛋白质)输入造成的。但基于湖区沿岸不同生态系统对 DOM 地化特征影响分析,还有待作进一步研究。

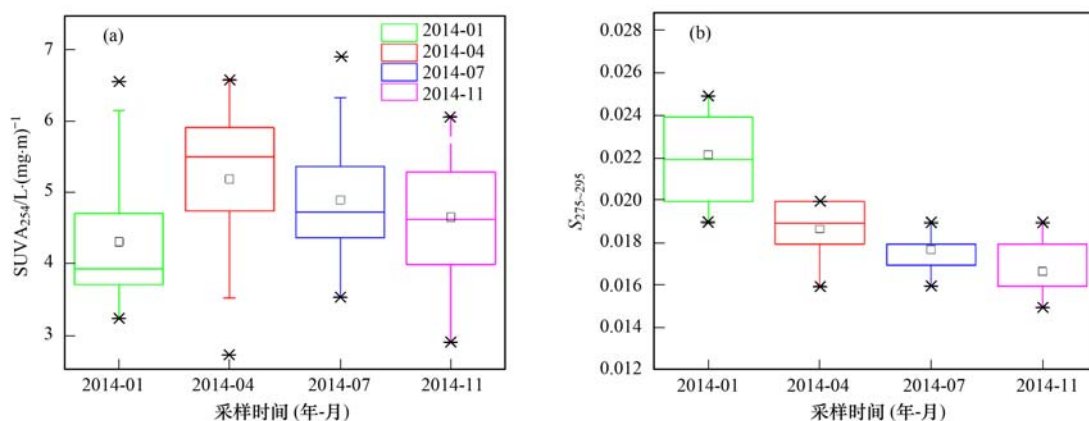


图 4 SUVA_{254} 和 $S_{275-295}$ 的变化情况

Fig. 4 Variations of SUVA_{254} and $S_{275-295}$

$S_{275-295}$ 不仅可表征 DOM 分子量大小;由于对光辐射较为敏感,也常用来反映 DOM 光降解程度^[9,25]。本研究中(图 5),无论是单次采样还是年际整体观测, $S_{275-295}$ 和 CDOM 均存在极显著负相关($P < 0.01$),这和文献报道类似^[34];同时,和 SUVA_{254} 也呈极显著负相关($P < 0.01$)。这说明在长寿湖,水体 DOM 中主要生色团仍然来自于大分子量的芳香性组分;同时也证明“光漂白”是引起长寿湖 CDOM 和 SUVA_{254} 降低的重要机制。CDOM 和 SUVA_{254} 的显著正相关($P < 0.01$)也进一步证明该观点。但实际上 7~11 月 CDOM [图 2(b)] 和 SUVA_{254} [图 4(a)] 值显著高于 1 月,因此可以推断:虽然 4~7 月光辐射较强,理论上应导致两指标降低,但强降雨期导致大量陆源输入是引起两指标“逆向”增高的主要原因;而最近也有研究发现光照可能导致 DOM 形成新的芳香结构,尤其在 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ (光 Fenton) 存在的情况下^[35]。

2.3 文献对比

通过对比发现(表 2),长寿湖 DOM 与太湖^[8,36] 以及江苏省西部过水性湖泊^[37] 数据近似,但与瑞典^[7,38]、加拿大^[39] 以及我国哈巴雪山林线下的森林湖泊^[40] 存在明显差异。森林湖泊大部分属于贫营养型湖泊,DOM 严重依赖于陆源输入,内源贡献有限;含有较高芳香性组分的腐殖质等通过地表径流和渗流等途径进入水体。长寿湖沿岸土地利用类型丰富^[11],人为干扰较大;相比于森林湖泊有限的日光辐照,长寿湖湖面开阔,光照充足,频繁的光化学行为也可能导致 DOM 降解程度更高;因此长寿湖 DOM 芳香性特征和 CDOM 含量均低于森林湖泊,分子量也较小。

另外,巴西 Barra Bonita 湖为典型热带富营养化湖泊^[43],和长寿湖类似,属于水库型湖泊,两者数据相近,这可能和两湖类似的地化条件有关。俄罗斯远东地区湖泊^[42] 属于典型冰碛湖,尽管周边森林

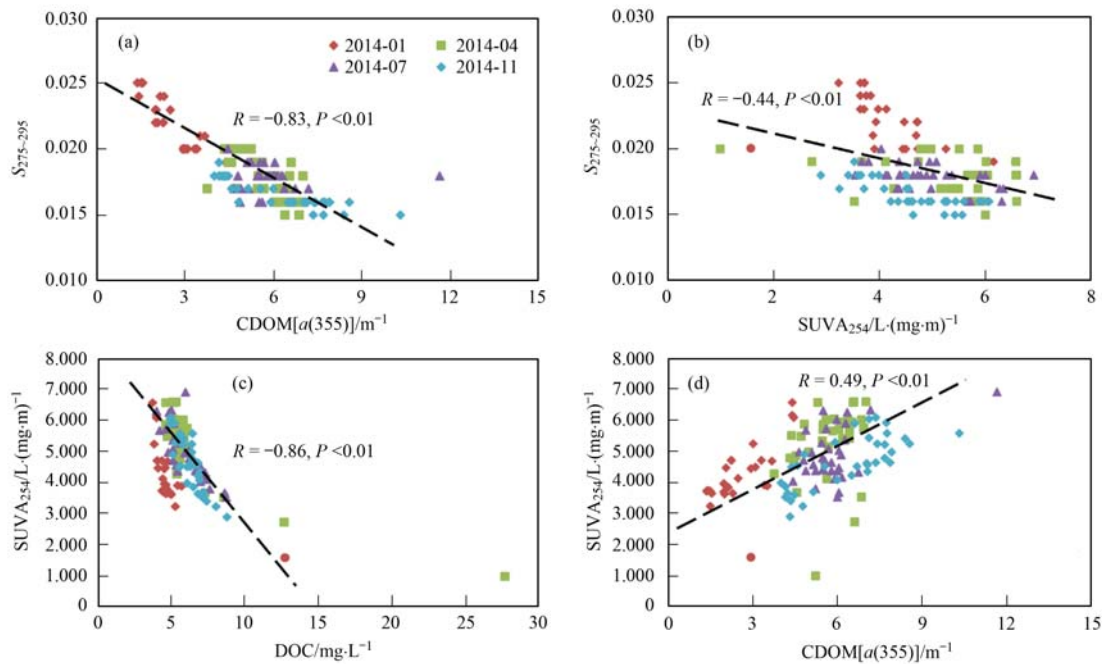


图 5 SUVA₂₅₄、S₂₇₅₋₂₉₅、DOC and CDOM 的相关性分析

Fig. 5 Correlations among SUVA₂₅₄, S₂₇₅₋₂₉₅, DOC and CDOM

表 2 不同湖泊 DOM 浓度及紫外-可见光谱指标对比

Table 2 Comparisons of DOC and other relevant UV-Vis spectral parameters among different lakes

湖泊	DOC /mg·L ⁻¹	CDOM [a(355)]/m ⁻¹	SUVA ₂₅₄ ¹⁾ /L·(mg·m) ⁻¹	S ₂₇₅₋₂₉₅	文献
中国梅梁湾	5.17 ~ 12.42	2.57 ~ 6.77	— ²⁾	—	[8]
瑞典全国湖泊 ³⁾	0.3 ~ 76.4	—	1.04 ~ 12.90 *	0.011 ~ 0.025	[38]
瑞典中南部湖泊 ⁴⁾	3.6 ~ 32.6	—	2.89 ~ 8.73 *	—	[38]
加拿大魁北克 Rouyn-Noranda 湖	0.8 ~ 13.4	—	约 13.82 ~ 27.40	—	[7]
加拿大安大略 Sudbury 地区湖泊	0.8 ~ 6.0	—	约 6.22 ~ 23.72	—	[7]
加拿大魁北克森林湖泊	11.34 ~ 15.27	30.44 ~ 40.68	4.40 ~ 4.81 *	0.010 ~ 0.012	[39]
中国太湖	3.00 ~ 6.34	1.64 ~ 4.36	—	—	[36]
中国青藏高原纳木错湖	3.13	—	0.67	—	[41]
中国青藏高原羊措雍湖	4.57	—	0.69	—	[41]
俄罗斯 Blagodat 湖	3.0 ~ 8.4	—	6.22 ~ 10.25 *	—	[42]
俄罗斯 Golubichnoe 湖	5.2 ~ 8.2	—	5.76 ~ 9.65 *	—	[42]
俄罗斯 Vaskovskoe 湖	2.3 ~ 5.1	—	约 7.15 ~ 9.56 *	—	[42]
中国云南哈巴雪山林线以上湖泊 ⁵⁾	1.02 ~ 2.62	—	约 1.15 ~ 6.91 *	0.009 ~ 0.031	[40]
中国云南哈巴雪山林线以下湖泊 ⁶⁾	4.14 ~ 9.06	—	约 5.76 ~ 16.12 *	0.013 ~ 0.015	[40]
巴西 Barra Bonita Reservoir 湖	19.22	—	2.1	—	[43]
中国江西省西部湖泊 ⁷⁾	6.16 ~ 24.35	—	1.21 ~ 5.85 *	0.015 ~ 0.028	[37]
中国长寿湖	3.76 ~ 27.73	1.39 ~ 11.64	1.00 ~ 6.91	0.015 ~ 0.025	本研究

1) 由于 SUVA₂₅₄ 有两种计算公式: $A_{254}/[DOC]$ 和 $a(254)/[DOC]$, 其中 $a(254) = A_{254} \times 2.303/l$, l 为光程路径(m), 为便于和本文数据比较, 采用前者公式计算的数据(标注为*), 均 $\times 2.303$ 进行校正; 2) “—”表示原文未给出; 3) 该数据为瑞典 983 个湖泊 DOM 均值; 4) 瑞典中南部 6 个典型森林湖泊, 包括 Lumpen 湖、Stensjön 湖、Siggeforasjön 湖、Valloxen 湖、L. Sångaren 湖以及 Ljustjärn 湖; 5) 海拔高度大约高于 4 200 m 以上; 6) 海拔高度低于 3 860 m 但高于海平面高度; 7) 中国江西省 9 个西部湖泊, 包括固城湖、石臼湖、邵伯湖、高邮湖、宝应湖、白马湖、洪泽湖、骆马湖及天岗湖

土壤腐殖化程度较高,但降雨量有限,陆源补给相对有限;同时水深较浅(4~9 m),DOM 光降解较易发生,因此其芳香性高于长寿湖,但仍低于前文提及的

“传统”森林湖泊^[7,38~40]. 我国青藏高原湖泊^[41]的水源补给主要来自冰川和降雨,周边土壤腐殖质发育程度较低,DOM 内源特征较强,生物可利用性高;

而较强紫外线诱导的光降解使得 DOM 的更新周期 (turnover) 较其他湖泊更短,因此 DOC 和 $SUVA_{254}$ 值处于低水平范围内。

2.4 长寿湖 DOM 地化特征的环境意义:以汞为例

表征 DOM 结构性质的光谱参数常用来与 DOM 的光漂白潜力、金属配位能力、光化学活性等进行相关性分析。尤其是表征芳香性大小的 $SUVA_{254}$ 。通常地,DOM 芳香性越强,意味其结构越复杂,参与环境地球化学反应的活性越高^[44~46]。有研究发现,DOM 疏水性组分以及 A_{254} 与 DHg 也存在较高的相关性 ($R > 0.9$)^[46];同时流域水体中汞的输出也与水色 (CDOM) 密切相关^[47]。但也有研究认为, $SUVA$ 值与 DOM 的化学反应活性间并无显著相关性^[13,15]。本研究中,均未发现 $SUVA_{254}$ 值分别与 THg ($P = 0.83$)、DHg ($P = 0.33$)、RHg ($P = 0.22$)、TMeHg ($P = 0.77$)、DMeHg ($P = 0.76$) 的显著相关性。这可能和 DOM 中非芳香性结构有关,一些脂肪链烃结构也会与汞结合,例如小分子有机酸,叶绿素等,这些组分无法通过 $SUVA$ 值来加以体现。另外,悬浮颗粒物 (suspended particulate matter, SPM) 对汞分布,尤其是 THg 的影响更为显著^[48~50]。另一方面,DOM 介导的一系列汞地球化学过程,例如光降解及生物吸收等^[51],也是解释 $SUVA_{254}$ 与汞分布无相关性的重要原因。

另外,DHg 和 RHg 分别与 CDOM 显著正相关 ($P < 0.05$, 表 3),而与 $S_{275 \sim 295}$ 显著负相关 ($P < 0.05$)。这说明尽管 $SUVA_{254}$ 所反映的芳香结构对汞分布影响不大,但 DOM 中大分子量的 CDOM 组分仍然是控制溶解态和活性 Hg 库的重要因素。而 RHg 与 CDOM/DOC 显著相关 ($P < 0.05$) 进一步证明 CDOM 的作用:①活跃的光化学特性导致 Hg^{2+} 光致还原使得溶解性气态汞 (DGHg) 饱和度增加;②相比于有限的巯基 (强基团),大量含 O/N 基团 (弱基团) 与汞结合,一方面增加了活性 Hg 库含量 (可被 $SnCl_2$ 还原)^[52,53],另一方面也促进了 Hg 扩散迁移;③DOM 介导的甲基汞光降解^[4]也有可能引起 RHg 增加。

同时,DHg、TMeHg、DMeHg 与叶绿素显著相关 ($P < 0.05$)。长寿湖为中等富营养化湖泊,水体藻类和浮游植物的初级生产力,以及局部湖区的少量网箱养鱼,是水体 DOM 重要来源,对湖泊底泥中有机质有重要贡献。一方面,高有机质造成的厌氧环境、以及作为电子供体促进微生物代谢活动,均可能促进 Hg 甲基化^[54];而以叶绿素为代表的水色

组分,可以作为 DOM 载体,与汞结合后利于其迁移,这正可以解释不同富营养程度湖泊之间各形态汞的差异性^[16]。

表 3 汞与 DOM 关键地化特征指标的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlations among different Hg species and key geochemical parameters of DOM

	DHg	RHg	TMeHg	DMeHg
CDOM	+ *	+ *	NC	NC
$S_{275 \sim 295}$	- *	- **	NC	NC
CDOM/DOC	NC	+ *	NC	NC
叶绿素 a	+ *	NC	+ *	+ *

1) “NC”表示无显著相关 ($P > 0.05$); “+”和“-”表示正相关或负相关; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

值得注意的是,长寿湖并未发现 DOC 与所有形态汞浓度存在相关性^[22],这与贵州百花湖类似^[17]。实际上,在大量研究中利用 DOC 量和污染物浓度之间建立相关性的方法^[17,22,55],并不能准确反映 DOM 与污染物迁移转化的关联性。由此可见,DOM 与污染物 (例如汞) 的相互关系可能比预想更复杂。因此基于 DOM 地球化学特征的分析,是进一步深入分析以 DOM 为代表的天然有机质是如何影响污染环境行为的重要前提和关键。

3 结论

(1) 和 1 月相比,长寿湖 4 ~ 11 月 DOC 差异性低于 CDOM。有色组分变化是解释 DOM 季节性变化的重要原因。DOM 中主要生色团仍然来自于大分子量的芳香性组分。尽管“光漂白”是引起长寿湖 DOM 耗损的重要机制,但夏季 (4 ~ 7 月) 强降雨期导致的大量陆源输入,仍是导致 CDOM 和 $SUVA_{254}$ 高于 1 月的重要原因。对 DOC 的年际观测,可采用 CDOM 三波长模型进行反演。

(2) $SUVA_{254}$ 和 $S_{275 \sim 295}$ 季节性变化特征较明显。1 月芳香性和分子量均最小,4 月上升。和 4 月相比,陆源输入、内源贡献以及人为活动导致的营养盐输入,是 7 ~ 11 月 DOM 分子量增强的重要原因;但耗损机制在 7 ~ 11 月主导了其芳香性特征下降。通过对比,长寿湖水体 DOM 和世界其他类型湖泊存在差异,芳香性和分子量大小均低于森林湖泊,但高于高原湖泊。不同湖泊 DOM 差异和周边生态系统和土地利用类型密切相关。

(3) 和文献不同, $SUVA_{254}$ 和 DOC 与各形态 Hg 无明显相关性,但 CDOM、CDOM/DOC 和分子量大小是控制溶解态和活性汞的重要因素;而湖泊初级生产力导致的有机质富集和迁移,可能是解释湖区

甲基汞变化的关键。

致谢：在此向西南大学 NOM 地球化学实验室闫金龙博士和陈学霜同学在样本采集及分析期间给予的无私帮助表示感谢。同时感谢贵州省环境监测中心站赵铮博士在采样图绘制上的大力协助。

参考文献：

- [1] Findlay S E G, Sinsabaugh R L, Sobczak W V, *et al.* Metabolic and structural response of hyporheic microbial communities to variations in supply of dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(4): 1608-1617.
- [2] 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.
- [3] Sharpless C M, Aeschbacher M, Page S E, *et al.* Photooxidation-induced changes in optical, electrochemical, and photochemical properties of humic substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(5): 2688-2696.
- [4] Fernández-Gómez C, Drott A, Björn E, *et al.* Towards universal wavelength-specific photodegradation rate constants for methyl mercury in humic waters, exemplified by a boreal lake-wetland gradient[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(12): 6279-6287.
- [5] Aiken G R, Hsu-Kim H, Ryan J N. Influence of dissolved organic matter on the environmental fate of metals, nanoparticles, and colloids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(8): 3196-3201.
- [6] 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.
- [7] Muller K K, Fortin C, Campbell P G C. Spatial variation in the optical properties of dissolved organic matter (DOM) in lakes on the Canadian Precambrian Shield and links to watershed characteristics[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2012, **18**(1): 21-44.
- [8] 张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析[J]. *水科学进展*, 2007, **18**(3): 415-423.
- [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] 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] 卢松, 江韬, 张进忠, 等. 两个水库型湖泊中溶解性有机质三维荧光特征差异[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 516-523.
- [12] 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.
- [13] 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]. *Environment Science & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [14] Alkhatib M, Schubert C J, del Giorgio P A, *et al.* Organic matter reactivity indicators in sediments of the St. Lawrence Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, **102-103**: 36-47.
- [15] Jones D L, Simfukwe P, Hill P W, *et al.* Evaluation of dissolved organic carbon as a soil quality indicator in national monitoring schemes[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(3): e90882, doi: 10.1371/journal.pone.0090882.
- [16] Meng B, Feng X B, Chen C X, *et al.* Influence of eutrophication on the distribution of total mercury and methylmercury in hydroelectric reservoirs[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(5): 1624-1635.
- [17] 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.
- [18] 冯新斌. 乌江流域水库汞的生物地球化学过程及环境效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [19] Lam P K S. Environmental threats to the Three Gorges Reservoir Region: are mutagenic and genotoxic substances important[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **38**(12): 172-174.
- [20] Floehr T, Scholz-Starke B, Xiao H X, *et al.* Yangtze Three Gorges Reservoir, China: a holistic assessment of organic pollution, mutagenic effects of sediments and genotoxic impacts on fish[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **38**: 63-82.
- [21] Hsu-Kim H, Kucharzyk K H, Zhang T, *et al.* Mechanisms regulating mercury bioavailability for methylating microorganisms in the aquatic environment: a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(6): 2441-2456.
- [22] 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.
- [23] Inamdar S, Finger N, Singh S, *et al.* Dissolved organic matter (DOM) concentration and quality in a forested mid-Atlantic watershed, USA[J]. *Biogeochemistry*, 2012, **108**(1-3): 55-76.
- [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] 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.
- [26] Ficht C G, Benner R. The spectral slope coefficient of chromophoric dissolved organic matter ($S_{275-295}$) as a tracer of terrigenous dissolved organic carbon in river-influenced ocean margins[J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(5): 1453-1466.

- [27] 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.
- [28] 殷燕, 吴志旭, 张运林, 等. 新安江水库夏季 CDOM 吸收光谱特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3207-3214.
- [29] Kowalczyk P, Zabłocka M, Sagan S, *et al.* Fluorescence measured in situ as a proxy of CDOM absorption and DOC concentration in the Baltic Sea[J]. *Oceanologia*, 2010, **52**(3): 431-471.
- [30] 刘丽贞, 秦伯强, 吴攀, 等. 太湖北部不同湖区春、夏季溶解性酸性多糖分布[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(9): 966-971.
- [31] Obernosterer I, Benner R. Competition between biological and photochemical processes in the mineralization of dissolved organic carbon[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(1): 117-124.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Asmala E, Stedmon C A, Thomas D N. Linking CDOM spectral absorption to dissolved organic carbon concentrations and loadings in boreal estuaries[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, **111**: 107-117.
- [35] Chen H M, Abdulla H A N, Sanders R L, *et al.* Production of black carbon-like and aliphatic molecules from terrestrial dissolved organic matter in the presence of sunlight and iron[J]. *Environmental Science & Technology Letter*, 2014, **1**(10): 399-404.
- [36] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 145-155.
- [37] 陈小锋, 揣小明, 刘涛, 等. 江苏省西部湖泊溶解性有机物光谱学特征和来源解析[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 259-266.
- [38] Erlandsson M, Futter M N, Kothawala D N, *et al.* Variability in spectral absorbance metrics across boreal lake waters[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(10): 2643-2652.
- [39] Glaz P, Gagné J P, Archambault P, *et al.* Impact of forest harvesting on water quality and fluorescence characteristics of dissolved organic matter in eastern Canadian Boreal Shield Lakes in summer[J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(23): 6999-7011.
- [40] Su Y L, Chen F Z, Liu Z W. Comparison of optical properties of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in alpine lakes above or below the tree line: insights into sources of CDOM[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2015, **14**(5): 1047-1062.
- [41] Spencer R G M, Guo W D, Raymond P A, *et al.* Source and biolability of ancient dissolved organic matter in glacier and lake ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, **142**: 64-74.
- [42] Lutsenko T N, Chernova E N, Lysenko E V, *et al.* Organic matter in the small lakes of the Sikhote-Alin biosphere reserve [J]. *Achievements in the Life Sciences*, 2015, **9**(1): 32-36.
- [43] Bittar T B, Stubbins A, Vieira A A H, *et al.* Characterization and photodegradation of dissolved organic matter (DOM) from a tropical lake and its dominant primary producer, the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* [J]. *Marine Chemistry*, 2015, **177**: 205-217.
- [44] Chin Y P, Aiken G R, Danielsen K M. Binding of pyrene to aquatic and commercial humic substances: the role of molecular weight and aromaticity [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(6): 1630-1635.
- [45] Westerhoff P, Aiken G, Amy G, *et al.* Relationships between the structure of natural organic matter and its reactivity towards molecular ozone and hydroxyl radicals [J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2265-2276.
- [46] Dittman J A, Shanley J B, Driscoll C T, *et al.* Ultraviolet absorbance as a proxy for total dissolved mercury in streams[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(6): 1953-1956.
- [47] Mierle G, Ingram R. The role of humic substances in the mobilization of mercury from watersheds[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 1991, **56**(1): 349-357.
- [48] Mason R P, Lawson N M, Lawrence A L, *et al.* Mercury in the Chesapeake Bay[J]. *Marine Chemistry*, 1999, **65**(1-2): 77-96.
- [49] Lawson N M, Mason R P, Laporte J M. The fate and transport of mercury, methylmercury, and other trace metals in Chesapeake Bay tributaries[J]. *Water Research*, 2001, **35**(2): 501-515.
- [50] Han S, Gill G A, Lehman R D, *et al.* Complexation of mercury by dissolved organic matter in surface waters of Galveston Bay, Texas[J]. *Marine Chemistry*, 2006, **98**(2-4): 156-166.
- [51] 阴永光, 李雁宾, 马旭, 等. 天然有机质介导的汞生物地球化学循环: 结合作用与分子转化[J]. *化学进展*, 2013, **25**(12): 2169-2177.
- [52] Miller C L, Liang L Y, Gu B H. Competitive ligand exchange reveals time dependant changes in the reactivity of Hg-dissolved organic matter complexes[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **9**(6): 495-501.
- [53] Miller C L, Southworth G, Brooks S, *et al.* Kinetic controls on the complexation between mercury and dissolved organic matter in a contaminated environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(22): 8548-8553.
- [54] Graham A M, Aiken G R, Gilmour C C. Dissolved organic matter enhances microbial mercury methylation under sulfidic conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(5): 2715-2723.
- [55] 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.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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