

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
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	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

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

李璐璐¹, 江韬^{1,2*}, 闫金龙¹, 郭念¹, 魏世强^{1,2}, 王定勇^{1,2}, 高洁¹, 赵铮¹

(1. 西南大学资源环境学院, 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: 溶解性有机质 (DOM) 是陆地生态系统的重要组成部分, 在环境地球化学中扮演着重要角色. 在测定三峡库区典型消落带土壤及沉积物 DOM 的紫外-可见光谱基础上, 通过特征参数及光谱模型来获取 DOM 的地化特征和信息. 紫外-可见光谱特征参数表明土壤 DOM 的芳香性、疏水组分及腐殖化程度都明显低于上层沉积物, 与高程和土地利用类型无关; 而所选择的 4 种吸收光谱模型中以模型 2 为最优. 同时, 不同模型和不同拟合波段均对 DOM 光谱曲线斜率 (S) 有影响; S 值随波长增加而减小; 而不同波段 S 值相关性存在差异, 表明各波段 S 值仅反映 DOM 部分信息, 而非全部. 此外, 特征斜率之比 (S_R) 反映出表层沉积物所受降解程度 (光漂白或生物降解) 小于土壤和往年沉积物, 其芳香性更高, 分子量更大, 参与降解的反应活性也更大; 这表明 DOM 越新鲜, 其受到的光照和生物作用相对较小, 降解潜力越大.

关键词: 溶解性有机质; 紫外-可见光谱; 吸收光谱模型; 三峡库区; 消落带; 光漂白; 生物降解

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0933-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.017

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

LI Lu-lu¹, JIANG Tao^{1,2}, YAN Jin-long¹, GUO Nian¹, WEI Shi-qiang^{1,2}, WANG Ding-yong^{1,2}, GAO Jie¹, ZHAO Zheng¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) is a very important component in terrestrial ecosystem, which also plays a key role in geo-environmental chemistry. A number of DOM samples were extracted from soils and sediments samples obtained from typical water-level fluctuation zones of Three Gorges reservoir areas. Ultraviolet-visible (UV-Vis) absorption spectra were recorded for unveiling the geochemical characteristics of DOM based on specific absorption parameters and fitting models. Through the results of specific absorption parameters, it was suggested that the aromaticity, hydrophobicity and humification degree were lower in soils than in the surface sediments, which were also independent of the sampling location height and land-use types. Among the four absorption models selected, model 2 was the optimal. Meanwhile, different models and fitting wavelengths also significantly affected the absorption spectral slope (S value); S increased with the decreasing wavelength. Additionally, the correlation among different S values obtained from different fitting wavelength ranges was significantly different suggesting that the S values in various wavelength ranges only indicated the tip of the iceberg of DOM characteristics instead of the entirety. Furthermore, the ratio of specific spectral slope (S_R) indicated lower degradation (photo-bleaching or microbial degradation) degree in the surface sediments as compared to those in soils and older sediments. The surface sediments had higher aromaticity, hydrophobicity, molecular weight and photochemical/biodegradation activity potentials, suggesting fresher DOM, lower effect of photobleaching and microbial degradation activities.

Key words: dissolved organic matter (DOM); UV-Vis spectra; absorption spectra model; Three Gorges Reservoir areas; water-level fluctuation zones; photobleach; biodegradation

溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM)^[1] 是陆地生态系统的重要组成部分, 普遍存在于土壤、沉积物和水体中^[2]. 土壤 DOM 可通过地表径流和淋溶等途径进入水体, 是水体 DOM 的来源之一^[3]; 不仅能参与污染物的迁移转化, 在环境地球化学中扮演着不可或缺的角色^[4, 5]; 同时还作为重要碳库, 对全球碳循环发挥重要作用^[6]. 三

峡库区消落带独特的“干湿交替”特征作为重要的生态系统, 一直受到广泛关注^[7, 8]. 由于受库水周

收稿日期: 2013-07-05; 修订日期: 2013-10-22

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: 李璐璐 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染控制化学, E-mail: lululee407@gmail.com

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

期性淹没、冲刷影响,土壤及沉积物 DOM 会释放成为水体 DOM 的一部分,从而影响库区污染物质的环境化学行为,对库区生态环境有着重要意义. 因此了解 DOM,尤其是消落带土壤及沉积物 DOM 地化特征,是进一步认识其生态环境效应的重要前提.

近年来,采用紫外-可见光谱对 DOM 进行特征辨析已成为重要研究手段之一,但大多数工作还局限在水体 DOM 中,例如湖泊、海洋^[9~13],对土壤及沉积物 DOM 关注较少,尤其是针对大型水库消落带的研究还鲜有报道. 通过光谱特征参数,可以获得 DOM 分子结构、组成等信息;而吸收光谱模型也被广泛用以反映 DOM 地化特征,尤其是其特征斜率(S)可反映 DOM 的性质^[14~18]. 以往研究中,不同研究在计算 S 值时所用的波段、模型以及拟合方式均不相同^[12, 19],导致各研究结果的 S 值差异究竟来源于 DOM 组成成分差异,还是来源于模型或拟合波段的不同还不甚清楚,使得不同研究结果间缺乏对比性.

本研究测定了三峡库区典型消落带土壤和沉积物样品 DOM 的紫外-可见吸收光谱,通过吸收光谱参数了解三峡库区土壤和沉积物 DOM 的宏观特征;通过对比不同模型、不同波段的特征斜率 S 值,探讨影响特征斜率 S 值的因素;进一步揭示 S 值在表征土壤 DOM 特征信息中的作用. 为认识三峡库区消落带 DOM 的特征、评估 DOM 对消落带生态环境影响提供理论基础,对其他周期性淹水(如湿地、水稻土、冰河带、潮滩等)土壤 DOM 特征的研究也具有重要参考价值,同时进一步丰富了紫外-可见光谱在表征 DOM 地化特征中的应用.

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

2012 年 7 月在三峡库区消落带 5 个地区(巫山、奉节、云阳、丰都、万州)选择了 11 个站点(图 1),分别采集 150、160、170 m 高程土壤和土壤上层的表层沉积物样品(其中奉节有一点在 150 m 高程采集了当年和往年两种沉积物样品),以及 180 m 处土壤样品(对照). 所有样品采集后,立即封袋带回实验室.

1.2 样品提取及测定

称取一定量的风干土,按土水比 1:5 加入 Millipore 水,在 25℃ 下振荡 24 h 后,4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,上清液过 0.45 μm 混合纤维素酯水系

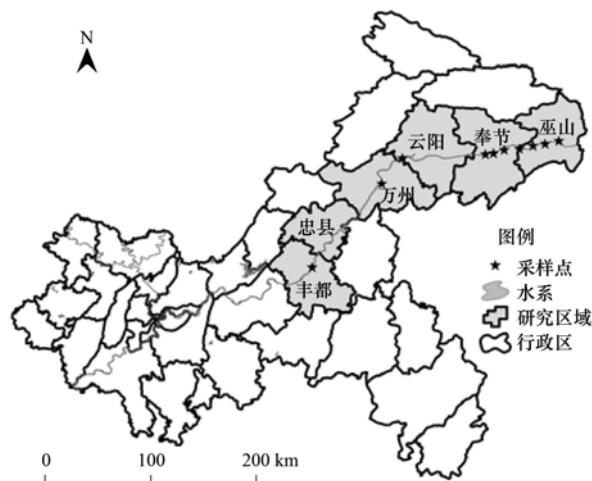


图 1 采样点示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

滤膜,得到土壤 DOM 溶液^[20, 21]. 采用 GE InnovOx® Laboratory TOC 分析仪测定 DOC 浓度.

1.3 光谱扫描及数据分析

用 Hitachi U-1800 型紫外-可见分光光度计测定 DOM 吸收光谱(Millipore 水作空白),扫描 200~800 nm(2 nm 间隔)波长范围的吸光度 A ,根据式(1)计算吸收系数:

$$a_g(\lambda) = 2.303 \times A/l \quad (1)$$

式中, λ 为波长(nm); $a_g(\lambda)$ 是波长 λ 处的吸收系数(m^{-1}); l 为光程路径(m).

国内外对于 DOM 光谱性质的研究常用吸光度表征 DOM 地化性质,如用 250 nm 和 365 nm 处吸光度之比(E_2/E_3)表征 DOM 分子量大小^[22, 23],而 465 nm 与 665 nm 处的吸光度之比(E_4/E_6)则反映出 DOM 腐殖化程度和芳香性^[24]. 除此之外,有研究还提出用 254 nm 处的摩尔吸光度($\text{SUVA}_{254 \text{ nm}}$)示踪 DOM 芳香性^[25, 26]. $\text{SUVA}_{254 \text{ nm}}$ 是 DOM 在 254 nm 的平均摩尔吸收率,为 254 nm 吸光系数与 DOC 浓度之比^[10], $\text{SUVA}_{254 \text{ nm}}$ 越大,芳香化程度越高^[27, 28]. 此外,有研究指出 260 nm 的 UV 吸光度可表征 DOM 疏水组分比例^[27],该值越大,DOM 疏水组分比例越高.

由于 DOM 吸收系数光谱呈指数衰减趋势,故常用指数模型对吸收光谱进行拟合. 本研究选择 4 种吸收光谱模型(表 1),分别计算 UV_A (320~400 nm)、 UV_B (275~320 nm)、 UV_C (200~275 nm)以及全紫外波段 UV_R (200~400 nm)内的 S 值,根据决定系数 R^2 评价模型拟合效果. 在 SPSS 20.0 上进行回归分析和其他相关性分析.

表1 DOM 吸收光谱的 4 种经验统计模型

模型名称	表达式	参数	拟合方式	文献
1	$a_g(\lambda) = a_g(400) e^{-S(\lambda-400)}$	S	非线性拟合	[29]
2	$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_r) e^{-S(\lambda-\lambda_r)}$	S	非线性拟合	[11]
3	$a_g(\lambda) = C e^{-S\lambda}$	S, C	非线性拟合	[17]
4	$a_g(\lambda) = C e^{\frac{S}{\lambda} \times 10^5}$	S, C	非线性拟合	[17]

模型 1 普遍用于海洋水色遥感, λ_r 是参考波长, 通常取 400 nm 或 440 nm^[29], $a_g(\lambda_r)$ 是参考波长的吸收系数, S 是吸收曲线斜率, C 为常数. 模型 2 和模型 1 相似, 只是选择显著性和相关性最高的波长作为参考波长: UV_R 为 350 nm, UV_A 为 360 nm, UV_B 为 288 nm, UV_C 为 282 nm. 模型 3 是单指数模型, 较多见于水体中有色物质吸收光谱的研究, S 值通常为一固定值, 如 0.014、0.015^[30]. 模型 4 是单指数变换模型.

有研究表明 275 ~ 295 nm 与 350 ~ 400 nm 波段 S 值之比 (S_R) 的相对稳定性较好, 常被用来表征 DOM 结构的变化, 即 S_R 值越高, DOM 分子量越低,

意味着 DOM 被光漂白及微生物降解的反应活性降低^[19,31~34].

2 结果与讨论

2.1 三峡库土壤 DOM 的光谱特征

从 DOM 吸收光谱曲线[图 2(a)]可以看出, 总体上吸收系数随波长增加呈指数形式递减, 650 nm 后吸收几乎为 0. 从图 2(b) 所示近紫外区(200 ~ 400 nm)的吸收系数来看, 其变异系数在 64.5% ~ 95.0% 之间, 表明 DOM 光谱特征存在较大地域差异, 而同一采样点的底层土壤和当年沉积物光谱特征也各不相同, 说明即使在同一位置, 由于所受水动力、光化学和生物化学过程的影响程度不同, DOM 光谱特征也会呈现较大差异^[35].

土壤 DOM 结构组成复杂, 吸收光谱没有明显特征峰, 仅在 280 nm 处有一个微小峰, 这与研究水体 DOM 吸收光谱相似^[15], 表明来源不同的 DOM 在光谱模型研究方法上可相互借鉴.

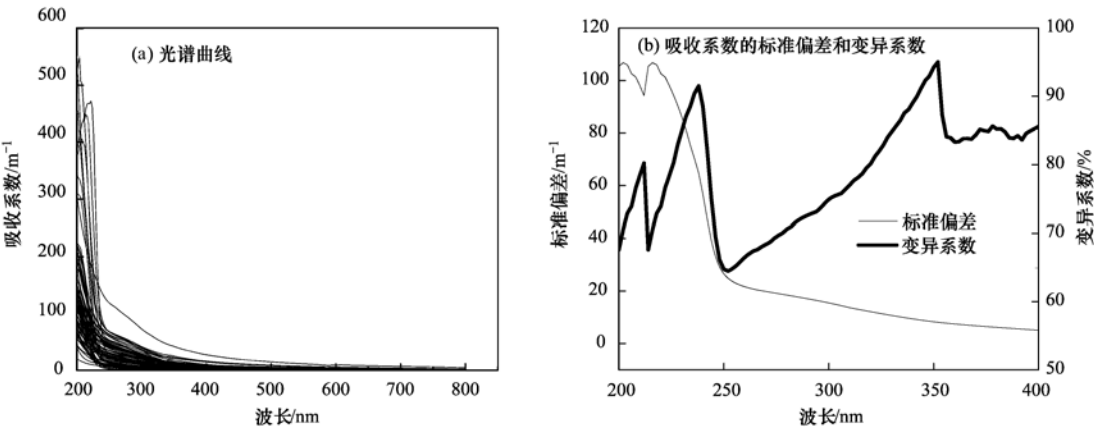


图2 三峡库区典型消落带土壤及沉积物 DOM 紫外-可见光谱

Fig. 2 Ultraviolet-visible spectroscopy of DOM in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas

本研究中, E_2/E_3 在 2.560 ~ 8.280 之间, 均值为 4.250 ± 1.130 , 这与 Peuravuori 等^[23] 研究水体 DOM 的 E_2/E_3 值较为接近, 说明土壤 DOM 和水体 DOM 分子量或胡敏酸 (humic acid, HA)/富里酸 (fulvic acid, FA) 相似. 而 E_2/E_3 越高, DOM 分子越小, FA 比例越高, 但对比土壤和沉积物 E_2/E_3 值时并未发现规律, 说明受环境中多种因素影响, 单一因子 (例如光辐射) 对 DOM 分子量的影响并不显著. E_4/E_6 在 2 ~ 14 之间, 均值为 3.640 ± 2.240 , 不同样点的腐殖化程度差异较大, 而该值越小腐殖化程度越高.

三峡库区消落带土壤和沉积物 DOC 浓度在

17.760 ~ 52.090 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $(38.427 \pm 7.355) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $SUVA_{254 \text{ nm}}$ 在 0.052 ~ 1.480 $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ 之间, 均值 $(0.361 \pm 0.265) \text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$, 变异系数为 73.2%. 经检验, 土壤和沉积物 $SUVA_{254 \text{ nm}}$ 值存在显著性差异 ($P < 0.05$), 比较同一地点土壤和沉积物的该值发现[图 3(a)], 土壤 $SUVA_{254 \text{ nm}}$ 值最小, 越新鲜的沉积物 $SUVA_{254 \text{ nm}}$ 值越大 (21 号点), 故该值反映出不同时期土壤和沉积物 DOM 组成上的差异. 这与林樱等^[36] 对比研究土壤和表层沉积物中富里酸芳香性的结果一致, 这可能是由于水环境中存在较多水生植物残体, 经微生物降解后产生大量芳香性化合物造成沉积物芳香性

较高^[31].

本研究中,土壤和沉积物 $A(260\text{ nm})$ 值存在显著性差异($P < 0.05$),沉积物 $A(260\text{ nm})$ 明显高于土壤[图 3(b)],往年沉积物小于当年沉积物. 而 DOM 疏水性和其环境反应活性密切相关^[14],意味着当年“新鲜”沉积物 DOM 参与污染物环境过程的活性较往年沉积物 DOM 和下层土壤 DOM 可能性更高.

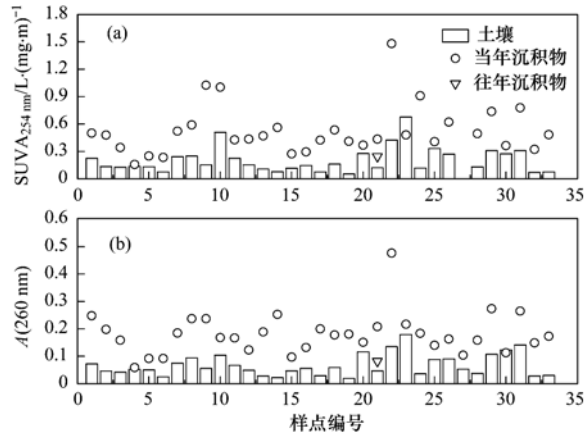


图3 三峡库区消落带土壤和沉积物的 $SUVA_{254\text{ nm}}$ 值和 $A(260\text{ nm})$ 值

Fig. 3 Variability of $SUVA_{254\text{ nm}}$ and $A(260\text{ nm})$ in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas

DOM 组成复杂,各结构特点间存在一定联系. 从相关性分析来看(表 2), E_2/E_3 与 E_4/E_6 呈显著正相关关系($r = 0.474, P < 0.01$),即相对分子量与腐殖化程度有一定关系,分子量高的 DOM 其腐殖化程度相对较高^[37]. $A(260\text{ nm})$ 与 $SUVA_{254\text{ nm}}$ 呈显著正相关关系($r = 0.875, P < 0.01$),进一步证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.

表2 $A(260\text{ nm})$ 、 $SUVA_{254\text{ nm}}$ 、 E_2/E_3 、 E_4/E_6 之间的相关性关系¹⁾

Table 2 Correlations between $A(260\text{ nm})$, $SUVA_{254\text{ nm}}$, E_2/E_3 , E_4/E_6

	$A(260\text{ nm})$	$SUVA_{254\text{ nm}}$	E_2/E_3	E_4/E_6
$A(260\text{ nm})$	1.000			
$SUVA_{254\text{ nm}}$	0.875 **	1.000		
E_2/E_3	-0.080	-0.220	1.000	
E_4/E_6	-0.030	-0.170	0.474 **	1.000

1) **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

同时,分析发现上述光谱特征与样本采集高程、土地利用类型无关. 在本研究样本采集区域,不同高程、不同土地利用类型之间差异并不明显,这可

能和样本量大小有关.

2.2 DOM 吸收光谱模型

为进一步描述 DOM 的光谱特征,故采用不同光谱方程进行拟合. 由表 3 可见,参考波长的选择明显影响方程拟合度^[38],模型 2 通过显著性分析找出相关性最高的波长作为参考波长,使 UV_B 、 UV_C 、 UV_R 波段模型拟合度(R^2)较模型 1 分别提高 0.065、0.183、0.075. 其次,参数个数对模型拟合度也有影响:参数越多拟合度越高;尽管模型 3 和 4 拟合度优于 1 和 2,但会增加对模型解释的难度.

因此,基于对参考波长、模型参数个数以及波长范围的对比,笔者认为,考虑较少参数个数和相对较高拟合精度时,模型 2 可较好的描述三峡库区土壤和沉积物 DOM 吸收光谱特征,同时计算吸收光谱曲线斜率(S)等参数更加精确、方便.

2.3 S 值

吸收光谱曲线斜率(S)是光谱模型中重要的信息之一,它能提 DOM 组成特征信息,包括 HA/FA 比、分子量大小以及光化学反应活性(例如光漂白)等^[34,39-41]. 由表 4 可以看出,不同研究结果的 S 值差异较大,其原因可能和不同研究模型、不同波段有关;同时与 DOM 类型和来源(水体 DOM 或土壤 DOM)有关.

从光谱模型角度来看,对土壤和沉积物 DOM 采用不同模型拟合,得到的 S 值大小及变异系数差异明显(表 3),但彼此之间的相关性却十分显著(表 5). 说明各模型 S 值从数值上看大小不同,但在描述土壤 DOM 特征时仍有较好的一致性.

从波长角度来看, S 值随波长增加而减小(表 3). 因此, S 值波段范围越大,DOM 吸收光谱估测误差也越大^[15]. 但不同模型受波长变化影响程度不一:模型 4 最稳定,其 S 值近乎为一固定常数 0.014,这与有研究将 S 值设为 0.014 一致^[50]. 除此之外,不同波段 S 值的相关性也存在差异(表 6), UV_C 和 UV_R 呈显著正相关关系($r = 0.952, P < 0.01$),但二者与 UV_A 呈负相关关系. 这也解释了为何不同研究结果 S 值在描述 DOM 某个结构特征时会出现矛盾结论^[19].

由表 6 可知,某些波段 S 值存在负相关关系,这可能是由于土壤 DOM 中所含的氨基酸、碳水化合物以及 HA 和 FA 等物质在不同波段吸收强度不一^[51]. 进一步,由于模型 2 拟合度较好、参数少且计算方便,因此用模型 2 的 4 个波段 S 值(4 种模型)与土壤 DOM 特征值 [E_2/E_3 、 E_4/E_6 、

表 3 4 种模型在不同波段拟合的决定系数和 S 值统计结果

Table 3 Statistics of determination coefficient and S from four models at different wavelength ranges									
波段	模型	R^2				S			
		极小值	极大值	均值	变异系数 /%	极小值 /nm ⁻¹	极大值 /nm ⁻¹	均值 /nm ⁻¹	变异系数 /%
UV _A	1	0.072	0.996	0.903 ± 0.183	20.3	0.003	0.023	0.010 0 ± 0.003 8	38.2
	2	0.073	0.996	0.898 ± 0.196	21.8	0.002	0.018	0.009 3 ± 0.003 5	38.1
	3	0.223	0.996	0.915 ± 0.160	17.5	0.002	0.020	0.009 6 ± 0.003 7	38.4
	4	0.206	0.999	0.910 ± 0.164	18.1	0.003	0.024	0.011 9 ± 0.004 5	37.7
UV _B	1	0.715	0.999	0.927 ± 0.071	7.6	0.007	0.023	0.012 1 ± 0.003 3	27.2
	2	0.968	0.999	0.992 ± 0.007	0.7	0.010	0.023	0.015 5 ± 0.002 8	18.0
	3	0.983	0.999	0.995 ± 0.004	0.4	0.010	0.022	0.015 4 ± 0.002 7	17.4
	4	0.842	0.997	0.978 ± 0.034	3.5	0.009	0.019	0.013 4 ± 0.002 3	16.8
UV _C	1	0.497	0.978	0.773 ± 0.117	15.2	0.009	0.021	0.014 9 ± 0.003 1	20.5
	2	0.822	0.988	0.956 ± 0.022	2.3	0.015	0.052	0.027 2 ± 0.011 1	40.9
	3	0.846	0.989	0.963 ± 0.020	2.1	0.001	0.058	0.029 1 ± 0.012 6	43.4
	4	0.814	0.998	0.976 ± 0.027	2.8	0.008	0.027	0.014 6 ± 0.005 3	36.0
UV _R	1	0.655	0.994	0.871 ± 0.096	11.0	0.009	0.021	0.015 0 ± 0.003 1	20.7
	2	0.890	0.991	0.946 ± 0.024	2.6	0.011	0.038	0.020 6 ± 0.007 5	36.2
	3	0.900	0.994	0.964 ± 0.016	1.7	0.012	0.057	0.026 3 ± 0.012 8	48.9
	4	0.890	0.998	0.981 ± 0.017	1.7	0.008	0.026	0.014 2 ± 0.004 9	34.7

表 4 不同研究结果的 S 值

Table 4 The <i>S</i> values reported in various literature and current reasrch						
研究区	年份	<i>S</i> 值/nm ⁻¹	波段/nm	参考波长/nm	文献	
Great Dismal Swamp,Suwanee River,Atlantic Ocean	2005	0.013 0 ~0.020 4	300 ~ 700	NM ¹⁾	[19]	
Yangtze River(China)	2009	0.011 9 ~0.017 5	275 ~ 295	NM	[18]	
	2009	0.012 4 ~0.021 4	350 ~400			
Bohai Bay(China)	2009	0.009 9 ~0.022 0	275 ~ 295			
	2009	0.004 9 ~0.031 1	350 ~ 400			
Mississippi plume	1989	0.019 4 ±0.000 4	300 ~ 700	450	[42]	
Gulf loop intrusion	1989	0.018 4 ±0.001 7	300 ~ 700			
	1989	0.011 0 ±0.000 1	300 ~ 700			
South island	1989	0.015 0 ±0.002 0	300 ~ 460	NM	[43]	
diverse parts of ocean	1981	0.010 0 ~0.020 0	375 ~500	375	[1]	
southern and western coast of Florida and the eastern Gulf of Mexico	1991	0.012 0 ~0.034 0	290 ~800	NM	[44]	
Danish coastal waters	1999	0.018 0 ~0.023 0	300 ~650	NM	[45]	
胶州湾	2002	0.013 1 ~0.018 0	380 ~620	400	[46]	
黄东海	2003	0.017 5 ±0.012 0	380 ~500	440	[29]	
	2003	0.010 3 ±0.009 0	380 ~620			
	2003	0.013 0 ~0.022 7	275 ~295			
	2003	0.014 0 ~0.026 5	350 ~400			
	2007	0.016 4 ~0.026 0	240 ~400			
太湖	2007	0.013 5 ~0.028 3	320 ~400	350	[47]	
	2007	0.019 9 ~0.030 0	290 ~320	300		
	2007	0.012 1 ~0.015 9	240 ~290	250		
	2007	0.006 9 ~0.023 2	400 ~600	440		
IHSS HA	2009	0.010 1	275 ~295	NM	[49] ²⁾	
	2009	0.011 9	350 ~400			
Aldrich HA	2009	0.008 3	275 ~295			
	2009	0.010 5	350 ~400			
Soil HA	2009	0.009 6 ~0.015 2	275 ~295			
	2009	0.010 9 ~0.019 2	350 ~400			
Sediment HA	2009	0.007 4 ~0.009 5	275 ~295	350	本研究	
	2009	0.004 0 ~0.008 6	350 ~400			
三峡库区土壤和沉积物	2012	0.009 3 ±0.003 5	240 ~400			360
	2012	0.015 5 ±0.002 8	320 ~400			288
	2012	0.027 2 ±0.011 1	290 ~320			282
	2012	0.020 6 ±0.007 5	240 ~290			

1) NM: 文献中未注明 (no mention); 2) 除该文献和本研究为土壤和沉积物 DOM 外, 其余文献均以水体 DOM 为研究对象

SUVA_{254 nm}、A(260 nm)] 进行相关性分析,结果进一步证实(表 7),不同波段 S 值反映了 DOM 的不同特性.

表 5 4 种模型 S 值间的相关性关系¹⁾

Table 5 Correlations of S among the four models

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
模型 1	1.000			
模型 2	0.712 **	1.000		
模型 3	0.717 **	0.953 **	1.000	
模型 4	0.718 **	0.804 **	0.816 **	1.000

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

表 6 不同波段 S 值间的相关性分析¹⁾

Table 6 Correlations of S among different wavelength ranges

	UV _A	UV _B	UV _C	UV _R
UV _A	1.000			
UV _B	0.252 **	1.000		
UV _C	-0.284 **	0.430 **	1.000	
UV _R	-0.262 **	0.407 **	0.952 **	1.000

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

表 7 模型 2 S 值与特征值的相关性¹⁾

Table 7 Correlations between the S value of model 2 and the characteristic values

	E_2/E_3	E_4/E_6	SUVA _{254 nm}	A(260 nm)
UV _A	0.510 **	0.095	0.261 *	0.445 **
UV _B	0.774 **	0.346 *	-0.447 **	-0.356 **
UV _C	-0.095	-0.092	-0.441 **	-0.425 **
UV _R	-0.044	-0.048	-0.459 **	-0.440 **

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

其中 UV_A 段 S 值与 A(260 nm) 呈显著正相关 ($r=0.445, P<0.01$),说明 UV_A 段 S 值越大,DOM 疏水组分比例越大; UV_B 段 S 值与 E_2/E_3 值呈显著正相关 ($r=0.774, P<0.01$),与 E_4/E_6 值 ($r=0.346, P<0.05$) 也有正相关关系,说明 UV_B 段 S 值越小,FA 比例越低,DOM 分子量和腐殖化程度越高. UV_C、UV_R 段 S 值与 SUVA_{254 nm} 呈显著负相关(分别为 $r=-0.441, r=-0.459, P<0.01$),表明 UV_C、UV_R 段 S 值越大,芳香化程度越低. 同时,该相关性分析与前文采用特征参数描述 DOM 地化特征的结果是一致的. 另外,不同波段 S 值只能反映 DOM 的部分特征(例如芳香性、分子量或者 HA/FA). 因此笔者建议在采用吸收光谱模型计算 S 值时,应该从 4 个波段出发,以获取 DOM 更完整的信息.

2.4 S_R 值与 DOM 结构稳定性

自然条件下,土壤和沉积物 DOM 结构受太阳辐射影响(光漂白)和微生物活动(生物降解)会发生改变. 因此,基于模型 2 计算三峡库区消落带土壤和沉积物 S_R 值,均值为 1.838 ± 1.423 ,变异系数 77.4%. 如图 4 所示(极个别地区样品在 350~400 nm 波段 S 值为 0, S_R 值无意义,未在图中标示),土壤 S_R 值比沉积物大,而 21 号还反映出往年沉积物 S_R 值高于当年沉积物,这说明在周期性淹水过程中,不断有“新鲜”沉积物覆盖在经过光漂白或生物降解作用后的往年沉积物和土壤上,而沉积物越“新鲜”,其芳香性越高,分子量越大,发生光漂白或生物降解的可能性也越大. 这与前文紫外-可见特征参数对 DOM 的表征结果一致.

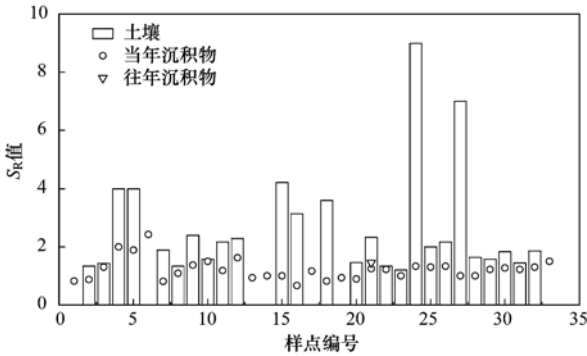


图 4 三峡库区消落带土壤和沉积物的 S_R 值

Fig. 4 Variability of S_R in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas

而有关光漂白和微生物降解对 DOM 光谱斜率的影响,有研究认为,无光照条件时微生物降解对光谱斜率几乎无影响^[52,53];但也有报道与此相反^[19]. 这种研究结果的差异性可能和 DOM 来源与性质有关. 对于陆源特征明显的 DOM 而言,其结构较自生源(微生物降解、藻类生产等)为主的 DOM 更为复杂,尤其在芳香性结构上差异明显($\pi-\pi^*$ 等不饱和和共轭双键都是生色团的重要组成部分),而这些组分的生物可利用性较差^[54,55]. 因此 DOM 以陆源输入特征为主时(芳香性和腐殖化程度高),微生物作用并不明显,而光漂白则成为主导^[56];在有光照参与时,光照先将结构复杂的大分子有机质分解成利于微生物利用的小分子有机质,即光照促进微生物的降解,而这一光降解过程会在 S 和 S_R 值上有所反映^[52]. 由此可推测,消落带土壤及沉积物在纵向分布上,上层芳香性结构大于下层,也更容易受光照辐射及微生物降解的影响,尤其是光漂白作用.

笔者认为,消落带落干期光照辐射对消落带土壤及沉积物性质的改变可能主要体现在三方面:

①对DOM的直接光漂白;②土温升高对微生物活性的提高;③光解产物的微生物利用。由于本研究工作采样时间为7月,光照强度大、时间充足,土温较高。表层沉积物DOM可能正经历降解过程;来年新覆盖沉积物会抑制太阳辐射对下层土壤(或沉积物)的影响,同时形成的厌氧环境也不利于DOM的进一步降解,所以“老”沉积物DOM降解潜力降低;而“新鲜”沉积物DOM的芳香性会高于往年土壤(沉积物),其降解潜力也更高。因此,当消落带进入淹水期时,表层土壤(沉积物)DOM的地化性质会对淹没水体中DOM结构与性质产生重要影响。

三峡水库“冬蓄夏泄”的水位调度方式,夏季落干而冬季淹水。每年5~9月,消落带处于落干期,同时光照强度正值一年中最强时段。和典型自然水体消落带(冬季落干、夏季淹水)相比,三峡库区消落带土壤和沉积物中DOM所经历的辐照周期更长,光漂白和生物降解过程也往往更为剧烈。由此可以推断,对三峡库区消落带土壤和沉积物DOM而言,由光照和微生物作用诱导的结构稳定性的变化,在其地化过程中起着十分重要的作用;而这种变化引起的间接环境效应:例如DOM降解导致其对环境污染物作用的改变,还需做更多研究工作。最重要的是,关于消落带土壤(沉积物)DOM降解过程中,光漂白和生物降解两个过程的相互关系,还值得进一步研究。

3 结论

(1)紫外-可见光谱特征参数表明土壤DOM的芳香性、疏水组分及腐殖化程度都明显低于上层沉积物。同时,基于三峡库区典型消落带土壤和沉积物DOM吸收光谱数据,对比分析常见4种光谱模型和4个波段范围内DOM吸收光谱曲线的拟合度;同时考虑较少参数个数,认为模型2是最优模型。

(2) S 值大小与模型和波长有关,不同模型 S 值差异较大,且随波长增加而衰减。从 S 值与不同模型和波长相关性来看,各模型 S 值在描述DOM特性较为一致;但不同波段 S 值的相关性存在差异,只能反映DOM部分特征。采用吸收光谱模型计算 S 值时,应考虑4个波段,以更完整获取DOM信息。

(3)由DOM光谱特征参数可知,三峡库区消落带土壤和沉积物DOM组成差异明显,沉积物芳香性和疏水组分比例均大于土壤。 S_R 值反映出新鲜沉积物受降解程度小于土壤和往年沉积物,故其芳香性、分子量更高,降解潜力更大。

(4)紫外-可见光谱特征在表征DOM地化特性的应用中,往往作为其他高级方法(例如荧光光谱、红外光谱、核磁共振、高效体积排阻色谱、电子自旋共振等)^[57, 58]的补充;当对DOM结构表征要求精度不过于苛刻时,采用紫外-可见光谱仍不失为一种快速简便的方法,尤其是光谱模型所蕴含的信息,有利于人们进一步认识DOM在自然系统中的角色和环境意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Tipping E, Woof C, Rigg E, *et al.* Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment [J]. *Environment International*, 1999, **25**(1): 83-95.
- [3] 王美丽, 李军, 朱兆洲, 等. 土壤溶解性有机质的研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, **29**(3): 304-310, 316.
- [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] 陈同斌, 陈志军. 土壤中溶解性有机质及其对污染物吸附和解吸行为的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, **4**(3): 201-210.
- [6] Neff J C, Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: synthesis and a model [J]. *Ecosystems*, 2001, **4** (1): 29-48.
- [7] 周永娟, 王效科, 吴庆标, 等. 三峡库区消落带生态脆弱性与生态保护模式 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [8] 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.
- [9] Du C F, Shang S L, Dong Q, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter in the nearshore waters of the western Taiwan Strait [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **88**(3): 350-356.
- [10] Granskog M A, Macdonald R W, Mundy C J, *et al.* Distribution, characteristics and potential impacts of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Hudson Strait and Hudson Bay, Canada [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, **27**(15): 2032-2050.
- [11] 沈红, 赵冬至, 付云娜, 等. 黄色物质光学特性及遥感研究进展 [J]. *遥感学报*, 2006, **10**(6): 949-954.
- [12] Del Vecchio R, Blough N V. Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter in natural waters: kinetics and modeling [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **78**(4): 231-253.
- [13] 胡春明, 张远, 于涛, 等. 太湖典型湖区水体溶解有机质的光谱学特征 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(11): 3022-3025.
- [14] Del Castillo C E, Coble P G, Morell J M, *et al.* Analysis of the

- optical properties of the Orinoco River plume by absorption and fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 1999, **66**(1-2): 35-51.
- [15] Loiselle S A, Bracchini L, Dattilo A M, *et al.* The optical characterization of chromophoric dissolved organic matter using wavelength distribution of absorption spectral slopes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(2): 590-597.
- [16] Fichot 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.
- [17] 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.
- [18] Chen H, Zheng B H, Song Y H, *et al.* Correlation between molecular absorption spectral slope ratios and fluorescence humification indices in characterizing CDOM [J]. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(1): 103-112.
- [19] 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.
- [20] Yu G H, Wu M J, Wei G R, *et al.* Binding of organic ligands with Al(III) in dissolved organic matter from soil: implications for soil organic carbon storage[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(11): 6102-6109.
- [21] Nierop K G J, Jansen B, Verstraten J M. Dissolved organic matter, aluminium and iron interactions: precipitation induced by metal/carbon ratio, pH and competition[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **300**(1-3): 201-211.
- [22] De Haan H, De Boer T. Applicability of light absorbance and fluorescence as measures of concentration and molecular size of dissolved organic carbon in humic Lake Tjeukemeer[J]. *Water Research*, 1987, **21**(6): 731-734.
- [23] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337**(2): 133-149.
- [24] 陶澍, 崔军, 张朝生. 水生腐殖酸的可见-紫外光谱特征[J]. *地理学报*, 1990, **45**(4): 484-489.
- [25] 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.
- [26] Summers R S, Cornel P K, Roberts P V. Molecular size distribution and spectroscopic characterization of humic substances[J]. *Science of The Total Environment*, 1987, **62**: 27-37.
- [27] Dilling J, Kaiser K. Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry [J]. *Water Research*, 2002, **36**(20): 5037-5044.
- [28] Chin Y P, Aiken G, O'Loughlin E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Environmental Science and Technology*, 1994, **28**(11): 1853-1858.
- [29] 朱建华, 李铜基. 黄东海非色素颗粒与黄色物质的吸收系数光谱模型研究[J]. *海洋技术*, 2004, **23**(2): 7-13.
- [30] Maul G A, Gordon H R. On the use of the earth resources technology satellite (LANDSAT-1) in optical oceanography[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1976, **4**: 95-128.
- [31] He M C, Shi Y H, Lin C Y. Characterization of humic acids extracted from the sediments of the various rivers and lakes in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(11): 1294-1299.
- [32] 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.
- [33] Spencer R G M, Aiken G R, Butler K D, *et al.* Utilizing chromophoric dissolved organic matter measurements to derive export and reactivity of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: a case study of the Yukon River, Alaska[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(6), doi: 10.1029/2008GL036831.
- [34] 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.
- [35] Schindler D W, Curtis P J, Parker B R, *et al.* Consequences of climate warming and lake acidification for UV-B penetration in North American boreal lakes[J]. *Nature*, 1996, **379**(6567): 705-708.
- [36] 林樱, 吴丰昌, 白英臣, 等. 我国土壤和沉积物中富里酸标准样品的提取和表征[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(10): 1142-1148.
- [37] 李丽, 于志强, 冉勇, 等. Pahokee 泥炭腐殖酸的相对分子量分布特征及其对菲的吸附影响[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(4): 587-594.
- [38] Warnock R E, Gieskes W W C, Van Laar S. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea[J]. *Journal of Sea Research*, 1999, **42**(3): 169-178.
- [39] Tzortziou M, Osburn C L, Neale P J. Photobleaching of dissolved organic material from a tidal marsh-estuarine system of the Chesapeake Bay[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2007, **83**(4): 782-792.
- [40] De Haan H. Solar UV-light penetration and photodegradation of humic substances in peaty lake water [J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(5): 1072-1076.
- [41] Bertilsson S, Tranvik L J. Photochemical transformation of dissolved organic matter in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(4): 753-762.
- [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] Davies-Colley R J. Yellow substance in coastal and marine waters round the South Island, New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1992, **26**(3-4): 311-322.
- [44] Green S A, Blough N V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(8): 1903-1916.
- [45] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **51**(2): 267-278.
- [46] 吴永森, 张士魁, 张绪琴, 等. 海水黄色物质光吸收特性实验研究[J]. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(4): 402-406.
- [47] 黄昌春, 李云海, 孙德勇, 等. 太湖 CDOM 紫外吸收特性及其分子量时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(3): 261-268.
- [48] 段洪涛, 马荣华, 孔维娟, 等. 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 242-247.
- [49] Hur J, Lee D H, Shin H S, *et al.* Comparison of the structural, spectroscopic and phenanthrene binding characteristics of humic acids from soils and lake sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(10): 1091-1099.
- [50] Hojerslev N K, Aas E. Spectral light absorption by yellow substance in the Kattegat-Skagerrak area [J]. *Oceanologia*, 2001, **43**(1): 39-60.
- [51] 田林锋, 胡继伟, 李存雄, 等. 通过 DOM 的光谱特性对长江源头典型高原深水湖泊进行评价[J]. *中国工程科学*, 2010, **12**(6): 80-84.
- [52] Moran M A, Sheldon W M, Zepp R G. Carbon loss and optical property changes during long-term photochemical and biological degradation of estuarine dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1254-1264.
- [53] Yamashita Y, Nosaka Y, Suzuki K, *et al.* The photobleaching as a factor controlling spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter in open ocean [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2013, **10**(6): 9989-10019.
- [54] Moran M A, Zepp R G. Role of photoreactions in the formation of biologically labile compounds from dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(6): 1307-1316.
- [55] Miller W L, Moran M A. Interaction of photochemical and microbial processes in the degradation of refractory dissolved organic matter from a coastal marine environment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(6): 1317-1324.
- [56] Lu Y H, Bauer J E, Canuel E A, *et al.* Photochemical and microbial alteration of dissolved organic matter in temperate headwater streams associated with different land use[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(2): 566-580.
- [57] Senesi N, Xing B S, Huang P M. Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems[M]. New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2009. 367-395.
- [58] Leenheer J A. Systematic approaches to comprehensive analyses of natural organic matter[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, **3**(1): 1-130.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行