

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012 ~ 2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM_{2.5} 重污染过程卫星反演研究 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河口区水体反硝化及其影响因素 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌重金属耐性机制研究进展 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征

王齐磊¹, 江韬^{1,2*}, 赵铮¹, 木志坚¹, 魏世强¹, 闫金龙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)

摘要: 以三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质 (DOM) 为研究对象, 利用紫外-可见和荧光光谱, 分析和讨论了不同土地利用类型 (包括林地、田地、菜地和民用地) 对土壤 DOM 地化特征的影响. 结果表明, 不同土地利用条件下 DOM 性质差异明显, 以林地 DOM 的芳香性程度较高, 腐殖化特征最强, 其次为田地; 尽管居民用地和菜地溶解性有机碳 (DOC) 含量高 (均值分别为 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但是芳香化程度低, DOM 中非生色组分对高 DOC 含量的贡献明显. 所有样本荧光指数 (FI) 介于自生源特征 (FI = 1.9) 和陆源特征 (FI = 1.4) 之间, 自生源 (类蛋白组分) 和异生源 (类腐殖组分) 对 DOM 均有贡献. 大部分样本 $r_{(T/C)}$ 都大于 2.0, 说明该农业小流域土壤 DOM 受外来因素尤其是人类活动影响较大, 尤以菜地为代表. 另外, 不同特征光谱参数对不同土地利用条件下 DOM 结构和性质差异性的灵敏程度不同, 光谱斜率比值 (S_R) 和腐殖化指数 (HIX) 不能反映 DOM 地化特征的差异性, 因此单一光谱指标并不能全面提供 DOM 的特征信息, 建议两种光谱分析方法联用.

关键词: 土壤溶解性有机质; 三峡库区; 消落带; 紫外-可见光谱; 荧光光谱

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0879-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.017

Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region

WANG Qi-lei¹, JIANG Tao^{1,2*}, ZHAO Zheng¹, MU Zhi-jian¹, WEI Shi-qiang¹, YAN Jin-long¹, 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)

Abstract: As an important geo-factor to decide the environmental fate of pollutants in watershed, soil dissolved organic matter (DOM) sampled from a typical agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir area was investigated using ultraviolet-visible (UV-Vis) and fluorescence spectroscopies, to analyze and discuss the effect of different land uses including forest, cropland, vegetable field and residence, on soil DOM geochemical characteristics. The results showed that significant differences in DOM samples amongst different land uses were observed, and DOM from forest had the highest aromaticity and humification degree, followed by DOM from cropland. Although DOM from vegetable field and residence showed the highest dissolved organic carbon (DOC) concentration (average values $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively), but the aromaticity was lower indicating lower humification, which further suggested that the non-chromophoric component in these DOM samples contributed significantly to total DOM compositions. Additionally, in all DOM samples that were independent of land uses, fluorescence index (FI) values were between 1.4 (terrestrial) and 1.9 (autochthonous), evidently indicating both the allochthonous and autochthonous sources contributed to DOM characteristics. Meanwhile, $r_{(T/C)}$ values in most of samples were higher than 2.0, suggesting that soil DOM in this agricultural watershed was heavily affected by anthropogenic activities such as agricultural cultivation, especially, vegetable field was a good example. Additionally, sensitivities of different special spectral parameters for reflecting the differences of DOM characteristics amongst different land uses were not identical. For example, neither spectral slope ratio (S_R) nor humification index (HIX) could clearly unveil the various geochemical characteristics of soil DOM from different sources. Thus, simple and single special spectral parameter cannot comprehensively provide the detailed information of DOM, and combined application of UV-Vis and fluorescence spectroscopies is highly recommended.

Key words: soil dissolved organic matter; Three Gorges Reservoir region; water-level fluctuation zones; UV-Vis spectroscopy; fluorescence spectroscopy

收稿日期: 2014-09-21; 修订日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41403079); 中国博士后科学基金项目 (2013M542238); 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (XDJK2013C151); 西南大学博士基金项目 (SWU112098)

作者简介: 王齐磊 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为天然有机质的环境地球化学, E-mail: beijixuekuail@163.com

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

土壤可为人类的生存发展提供食物和最基本的生产资料,是人类离不开的物质基础. 其中,土壤溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是土壤有机质(SOM)的重要组成部分,在土壤一系列生化过程中发挥着重要作用^[1,2]. 土壤 DOM 是一种复杂的可溶性混合物,其组分包括腐殖酸以及各种亲水性有机酸、氨基酸等化合物,其主要来源包括植被残根腐解、根系分泌物、植物枯落物、土壤腐殖质等^[1]. 外源有机肥料的施用对土壤 DOM 也有贡献^[3]. 由于土壤 DOM 在水生和陆地生态系统中,对环境污染物的迁移转化起着重要影响,近年来逐渐成为环境地球化学的研究热点^[4~6]. 因此了解其地球化学特征,尤其在分子水平明确其结构与性质,是进一步认识 SOM 生态环境效应的重要前提. 目前国内外针对 DOM 研究的技术方法较多. 与红外光谱、核磁共振、质谱等技术相比,紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱具有灵敏度高、操作简便、选择性好、所需样品量少且不破坏样品结构等优点,因而在水体 DOM 研究中广泛应用^[7~9],但对土壤 DOM 的报道还较少.

土地利用类型是陆地碳库的重要驱动力,已有研究大多集中于不同土地利用方式对 SOM 含量和结构性质的影响^[10,11]. 同时,有关不同土地利用类型对临近水体(例如湖泊和河流)DOM 性质影响的报道较多^[12,13],但对土壤本身 DOM 的影响也仅侧重于定量^[14],而利用吸收和荧光光谱来定性讨论土壤 DOM 变化的报道还较少. 三峡库区消落带作为敏感的环境生态系统,以其独特的“干湿交替”特征

一直受到广泛关注^[15],尤其是农业小流域系统对库区消落带生态环境质量起着重要作用^[15~17]. 其中,以土壤 DOM 为代表的土壤有机质,对小流域内营养元素、重金属及温室气体的环境行为,均发挥着重要影响. 但目前,有关三峡库区消落带典型农业小流域土壤 DOM 性质的研究却鲜有报道.

基于此,本研究选取了三峡库区消落带典型农业小流域——重庆涪陵区王家沟小流域,通过吸收和荧光光谱,并结合对不同土地利用类型的分析,通过阐明典型农业小流域中土壤 DOM 地化特征的异质性,以期为进一步了解 DOM 在三峡库区这个独特生态系统中的环境角色提供一定的科学依据和研究基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

王家沟小流域(29°54'N, 107°30'E)地处重庆市涪陵区珍溪镇东部(图 1),是长江三峡库区北岸典型农业小流域,总面积 72.3 hm²,属于亚热带季风气候区,常年气候湿润,空气湿度可达 60%~80%,年平均气温 22.1℃,年均降雨量 920 mm,海拔 153~307 m,土壤为侏罗系蓬莱镇组棕紫色砂泥岩相发育的棕紫泥. 地形属丘陵地貌特征,为封闭集水区域,流域水出口位于南部紧邻长江干流. 该流域内土地利用类型复杂,包括林地、菜地、田地、少量未被利用的荒地以及少数民用地^[16,17]. 该流域主要农作物为水稻、玉米和榨菜,春、夏季(3~8月)以水稻和玉米为主,秋、冬季(9~12月)主要种植榨菜. 当地耕作方

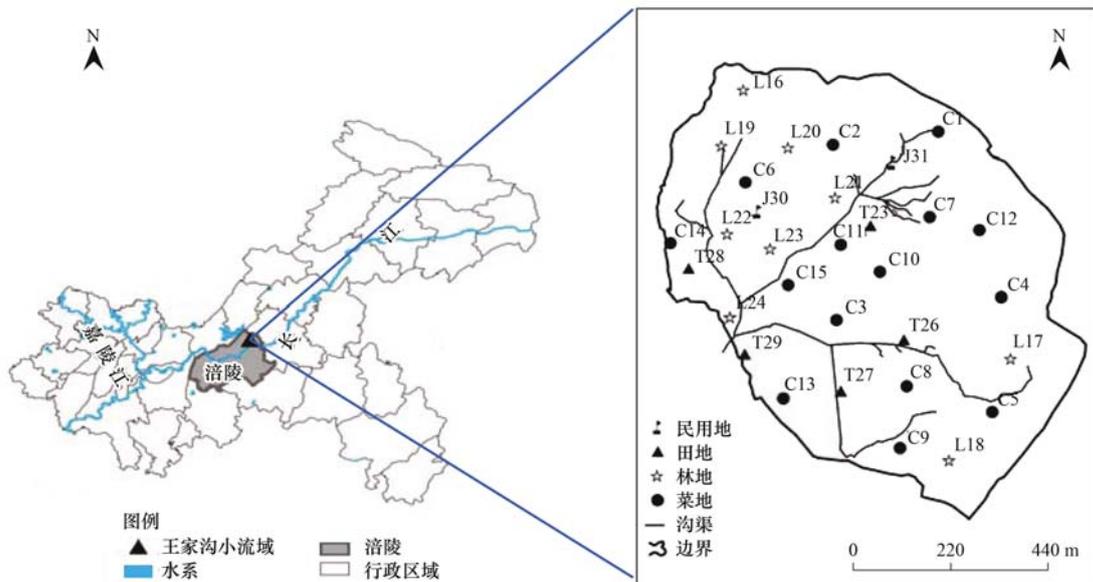


图 1 采样点示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

式以人工耕作为主,无大型机械耕作。

1.2 样品采集及处理

综合考虑样点的空间分布和土地利用类型的代表性,本研究选择了 31 个采样点(图 1),采集 0~10 cm 的表层土,土地利用类型分别为林地、菜地、田地、民用地 4 种类型,其中样点 1~15 为菜地,样点 16~24 为林地,样点 25~29 为田地,样点 30 和 31 为民用地。土样采集后,将土样放入冷藏箱内送回实验室。土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法测定,以每 kg 土样中碳含量表示,单位 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 土壤 pH 采用电位法测定^[18]。

土壤 DOM 提取方法参照文献[19~21],称取 5 g 过 60 目筛风干土样,按土水比 1:10 加入超纯水(Millipore[®],电阻率 18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$),在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温避光连续振荡 16 h 后,用离心机 4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心

30 min,上清液过 0.45 μm 混合纤维素酯水系滤膜,得土壤 DOM 溶液备用。DOM 样品置于棕色瓶中,4 $^{\circ}\text{C}$ 恒温冷藏保存。所有后续分析工作 5 d 内完成,包括 DOC 浓度测定及紫外-可见及荧光光谱分析。

1.3 光谱扫描及分析

土壤 DOM 浓度以溶解性有机碳(DOC)表示,单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,采用 GE InnovOx[®] Laboratory TOC 分析仪测定。紫外-可见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^[22]。紫外-可见吸收光谱扫描操作具体为:以 Millipore[®] 纯水为空白,用光程长 10 mm 石英比色皿在 230~800 nm 范围内进行扫描,扫描间隔 1 nm,以 355 nm 处的吸收系数 $a(355)$ 表示有色溶解性有机物(CDOM)相对浓度^[23,24]。本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^[22]

Table 1 Descriptions of ultraviolet-visible absorption spectra parameters		
紫外-可见光谱参数	计算公式	公式参数及描述
吸收系数 a	$a(\lambda) = 2.303D(\lambda)/l$	$D(\lambda)$ 为波长 λ 处吸光度, l 为光程路径(m) ^[20,21,25]
SUVA ₂₅₄	$\text{SUVA}_{254} = a(254)/\text{DOC}$	$a(254)$ 为波长 254 nm 吸收系数, DOC 为溶解性有机碳($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 表征 DOM 芳香性, 值越大, 芳香性越高 ^[13,26]
SUVA ₂₆₀	$\text{SUVA}_{260} = a(260)/\text{DOC}$	表征 DOM 疏水组分比例, 值越大, DOM 疏水组分比例越高 ^[27]
光谱斜率比值 S_R	$S_R = S_{(275-295)}/S_{(350-400)}$ $a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)]$	S 为光谱斜率, λ_0 是参照波长(nm); $S_{(275-295)}$ 和 $S_{(350-400)}$ 分别为波长范围 270~350 nm 和 350~400 nm S 值(与 DOM 结构、相对分子质量有关, 值越大表明 DOM 相对分子质量越小) ^[20,28]

荧光光谱扫描操作具体为:以 Millipore[®] 纯水作空白,光源为 150 W 无臭氧氙弧灯,激发波长(E_x)范围 230~450 nm,增量 5 nm;发射波长(E_m)范围 250~620 nm。扫描信号积分时间为 3 s, Aqualog[®] 系统自动校正瑞利和拉曼散射。荧光谱

峰在 Origin 8.1 软件上利用 peak pick 功能识别,荧光峰解析参考文献[29,30]。本研究中相关荧光参数如表 2 所示。

另外,除特别说明外,全文采用 SPSS 17.0 对相关数据进行差异性 T 检验(T -test)、主成分分析及

表 2 荧光光谱参数描述^[22]

Table 2 Descriptions of fluorescence spectra parameters		
荧光光谱参数	定义	参数意义描述
$r_{(A/C)}$	荧光峰 A 与荧光峰 C 荧光强度比值	与 DOM 降解、腐殖化发育程度有关 ^[7,31,32]
$r_{(T/C)}$	荧光峰 T 与荧光峰 C 荧光强度比值	评估内源对 DOM 贡献, 比值越大表明类蛋白组分越多, 受微生物活动等内源影响越大; 也用于评估 DOM 受人为干扰的影响 ^[33,34]
$F_n(355)$	$E_x = 355 \text{ nm}, E_m = 450 \text{ nm}$ 时荧光强度	表示荧光溶解性有机质(FDOM)浓度 ^[24,35,36]
荧光指数(FI)	$E_x = 370 \text{ nm}, E_m$ 为 470 nm 和 520 nm 处的荧光发射强度比值($f_{470/520}$)	表征 DOM 来源, FI > 1.9 表示 DOM 主要源于微生物活动, 以内源输入为主(自生源特征较为明显); FI < 1.4 则以陆源输入为主(异生源特征明显), 微生物活动等贡献相对较低 ^[37]
腐殖化指数(HIX)	$E_x = 254 \text{ nm}, E_m$ 在 435~480 nm 区域积分值($\int_{435-480}$) 除以 300~345 nm 区域积分值($\int_{300-345}$)	表征 DOM 腐殖化程度, 高 HIX 值表明 DOM 腐殖化程度较高, 结构可能更复杂 ^[38-40]
自生源指数(BIX)	$E_x = 310 \text{ nm}, E_m$ 为 380 nm 与 430 nm 处荧光强度比值($f_{380/430}$)	该值反映 DOM 自生源相对贡献, BIX 值越大, 自生源特征越明显, 类蛋白组分贡献越大, 生物可利用性越高 ^[12]

相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 DOM 浓度

土壤溶解性有机碳(DOC)是以碳含量来表示土壤 DOM 浓度. 如表 3,王家沟小流域土壤 DOM 浓度分布差异较大($0.09 \sim 1.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 均值 $0.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 46.90%. 该区域

SOM 含量在 $5.72 \sim 27.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值 $16.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 5.89 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数 35.18%. CDOM 和荧光 DOM(fluorescent dissolved organic matter, FDOM) 均是 DOM 重要组成部分, 分别用 $a(355)$ 和 $F_n(355)$ 代表其浓度^[23,24,36]. 该流域土壤 CDOM 浓度 $a(355)$ 变化范围在 $8.23 \sim 121.93 \text{ m}^{-1}$, 均值 $27.33 \text{ m}^{-1} \pm 24.56 \text{ m}^{-1}$, 变异系数为 89.87%; 而 $F_n(355)$ 变异系数仅 35.05%. 由此可见, CDOM 的空间分布差异较大.

表 3 王家沟农业小流域土壤 DOM 浓度描述统计¹⁾

Table 3 Descriptive statistics of DOM concentration in soils of Wangjiagou watershed of the Three Gorges Reservoir area

土地利用类型	$a(355)/\text{m}^{-1}$	变异系数/%	$F_n(355)$	变异系数/%	DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	变异系数/%	SOM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/%
菜地	23.55 ^b	90.13	20 138.92 ^d	43.62	80.69 ^b	47.28	14.62 ^d	33.24
林地	40.38 ^a	85.01	22 846.70 ^a	35.17	69.29 ^c	42.59	16.83 ^c	28.90
田地	19.38 ^c	21.81	22 234.11 ^b	12.17	52.48 ^d	57.83	19.99 ^a	45.77
民用地	16.92 ^d	26.98	22 228.86 ^c	16.93	89.20 ^a	32.98	18.17 ^b	27.34
流域	27.33	89.87	21 397.82	35.05	73.38	46.90	16.87	35.18

1) * 同一列中相同字母表示差异不显著 ($P < 0.05$)

对不同土地利用类型的 $a(355)$ 、 $F_n(355)$ 、DOC 及土壤有机质进行差异性 T 检验, 发现它们之间有显著性差异 ($P < 0.05$). 土壤有机质含量大小顺序: 田地 > 民用地 > 林地 > 菜地, 但 CDOM 却是林地 > 菜地 > 田地 > 民用地. 由此可知, 尽管田地和民用地土壤有机质含量高, 特别是民用地 DOC 含量也最高, 但 CDOM 含量均较低. 这说明田地和民用地土壤 DOM 中, 生色团含量较低, 含有共轭结构 ($\pi-\pi^*$ 双键) 组分较低; 而 SOM 较高原因可能是由于多聚糖、小分子有机酸等组分所引起. 林地 DOM 中 CDOM 和 FDOM 含量均最高, 这与森林系统中 SOM 的稳定性密切相关, 同时森林 SOM 腐殖化程度高. 有研究表明, 森林系统土壤 DOM 分子量更大, 天然有机质-矿物形成的复合体系更多^[41,42]. 而相对于农田和菜地而言, 频繁的翻耕和肥料施用, 土壤有机质难以形成稳定矿物-有机质复合体系^[43], 而土壤 DOM 中来自高度降解后的组分增多, 尤其是微生物活动贡献较大^[44].

尽管有研究发现 DOM 浓度与 SOM 存在相关性^[43,45], 但本研究中, 土壤 DOM 浓度与 SOM 含量并无明显相关性 ($P > 0.05$), 这与文献[46]报道类似. 由于该小流域土地利用类型复杂, 同时 DOM 仅占 SOM 一部分^[47], 而农田、菜地和民用地由于人为输入有机质(例如施用有机肥), 会导致土壤 DOM 含量增加, 使得两者之间并非始终显著正相关^[48].

有研究发现, 对水体 DOM 而言, DOC 和 CDOM 之间存在显著正相关^[25,49], 因此可基于 CDOM 预估

DOC 时空分布. 但本研究中没有观察到 FDOM、CDOM 分别和 DOC 的显著线性相关性 ($P > 0.05$) (表 4), 这与文献[21]一致. 其原因可能是土壤 DOM 较水体 DOM 复杂, 受光降解及微生物活动影响, DOM 中生色团所占比例波动较大. 同时受不同土地利用类型的影响, DOM 分子结构的复杂程度也各有差异, 使得 DOM 与 CDOM、FDOM 之间关系出现波动^[21]. 另外, FDOM 与 CDOM 极显著正相关 ($P < 0.05$), $\text{FDOM} = 152.95 \times \text{CDOM} + 17\,217.56$ ($r^2 = 0.67, P < 0.01$), 说明 FDOM 67% 的浓度变化可通过 CDOM 来解释.

表 4 CDOM、FDOM、DOC 及土壤有机质相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis among CDOM, FDOM, DOC and SOM				
	CDOM	FDOM	DOC	有机质
CDOM	1.00			
FDOM	0.52**	1.00		
DOC	0.19	0.07	1.00	
有机质	-0.02	0.30	-0.01	1.00

1) ** 表示 $P < 0.01$

2.2 紫外-可见吸收光谱特征

和水体 DOM 类似, 土壤 DOM 吸收光谱中并无明显特征峰. 整体上[图 2(a)], 样品吸光度随波长增加呈指数型减少, 在波长达到 600 nm 后吸收逐渐趋于 0. 吸收光谱的变异系数在 50% ~ 150% 之间[图 2(b)], 表明整个小流域土壤 DOM 性质上空间分布存在较大差异.

光谱斜率比值(S_R)是与 DOM 浓度无关的特征参数, 常用来评估 DOM 组成, 例如分子量及地球化

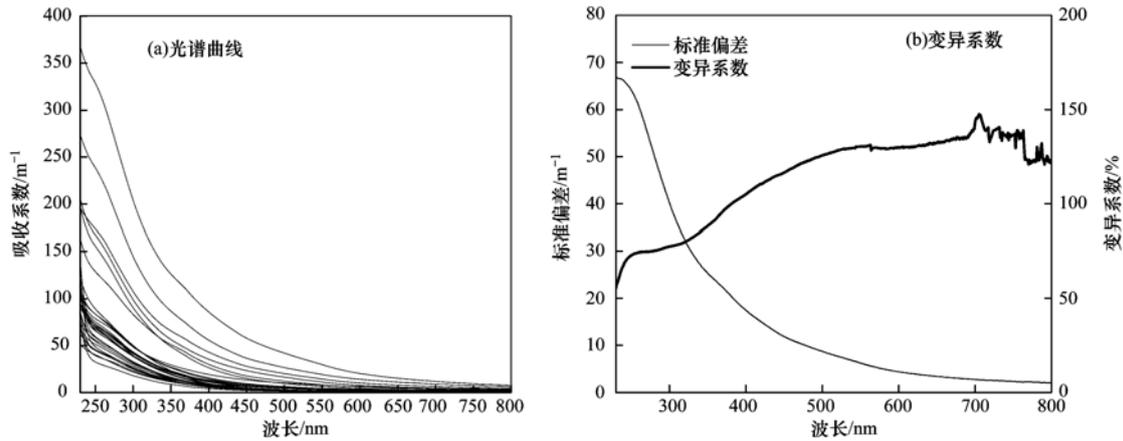


图2 土壤 DOM 紫外-可见吸收光谱

Fig. 2 Ultraviolet-visible spectroscopy of DOM in soils

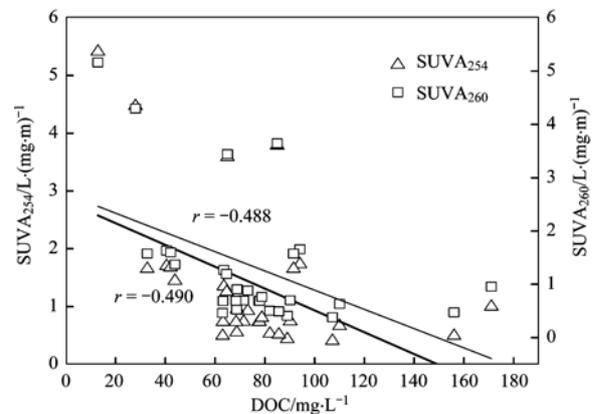
学过程的反应活性^[20,28]. 本研究当中的 S_R 值变化范围在 0.80 ~ 1.25 (均值 1.00 ± 0.13), 但不同土地利用类型间差异不显著 ($P > 0.05$). 另外, 不同土地利用类型 DOM 的 $SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{260}$, 均存在显著差异 ($P < 0.05$), 大小顺序为: 林地 > 田地 > 菜地 > 民用地, 说明林地和田地 DOM 疏水组分含量较多, 芳香化和腐殖化程度均较高. 与菜地和民用地不同, 该小流域林地以人工落叶林为主, 林地土壤并未开垦耕作, 自然状态保持较好, 土壤腐殖质发育程度较高, 因此土壤 DOM 结构更为复杂^[14]. 对田地而言, 大量农作物秸秆及残体滞留于土壤中, 由于这些高纤维素的有机物料输入, 一方面增加了土壤有机质的腐殖化发育过程; 同时也提高了土壤 DOM 中芳香化合物组分的比例, 这与文献报道一致^[46,50,51]. 而当地居民对菜地主要施用有机肥, 尽管和文献报道一样^[47,48], 促进了土壤 DOC 含量增加(表 3), 但该外源有机质大部分为蛋白质、糖类和小分子有机酸等, 对其芳香性组分和结构复杂性的贡献不大.

另外, DOC 与 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 均呈显著负相关 ($P < 0.05$) (图 3), 说明 DOM 浓度越高, 但芳香化程度和疏水组分降低. 由于民用地和菜地 DOC 含量高(表 3), 但芳香化程度低, 进一步证明了该两种土地利用类型中, DOM 中非生色组分对高 DOC 含量具有重要贡献.

2.3 荧光光谱特征

2.3.1 荧光峰解析

本研究中, 所有样品均存在两类 4 个峰(图 4), 分别为: 类腐殖质峰, 包括紫外区 A 峰 ($E_x/E_m = 250 \sim 260 \text{ nm}/380 \sim 480 \text{ nm}$), 可见光区 C 峰 ($E_x/E_m =$

图3 整个流域 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 、DOC 相关性分析Fig. 3 Correlations amongst $SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$ and DOC in the whole watershed

330 ~ 350 nm/420 ~ 480 nm) 和 M 峰 ($E_x/E_m = 315 \text{ nm}/437 \sim 441 \text{ nm}$); 类蛋白峰 T 峰 ($E_x/E_m = 230 \text{ nm}/320 \sim 350 \text{ nm}$) (类色氨酸荧光峰), 仅少量样本存在类酪氨酸 B 峰 ($E_x/E_m = 270 \sim 280 \text{ nm}/302 \sim 319 \text{ nm}$). 因为 B 峰组分降解程度较 T 峰高^[9], 由此可以推测, 该农业小流域的土壤 DOM 中缺失 B 峰的可能原因为: 类蛋白属于新产生或者新输入, 较为“新鲜”, 水解、微生物分解和光降解等参与程度有限, 因此, DOM 中类蛋白组分保持了较高降解活性.

运用主成分分析对整个流域的 DOC、 $a(355)$ 、荧光峰 A、C、M 和 T 进行分析(图 5), 得到两个主因子, 可以解释这些参数 74.40% 的变化. 其中主因子 1 的方差贡献率为 48.45%, 与荧光峰显著正相关 ($P < 0.05$), 而与 DOC 呈显著负相关 ($P < 0.05$). 主因子 2 的方差贡献率 25.95%, 与 DOC 和 $a(355)$ 显著正相关 ($P < 0.05$). 由此推断, 主因子 1 可能与 DOM 中类腐殖质和类蛋白质物质的来源变化有关,

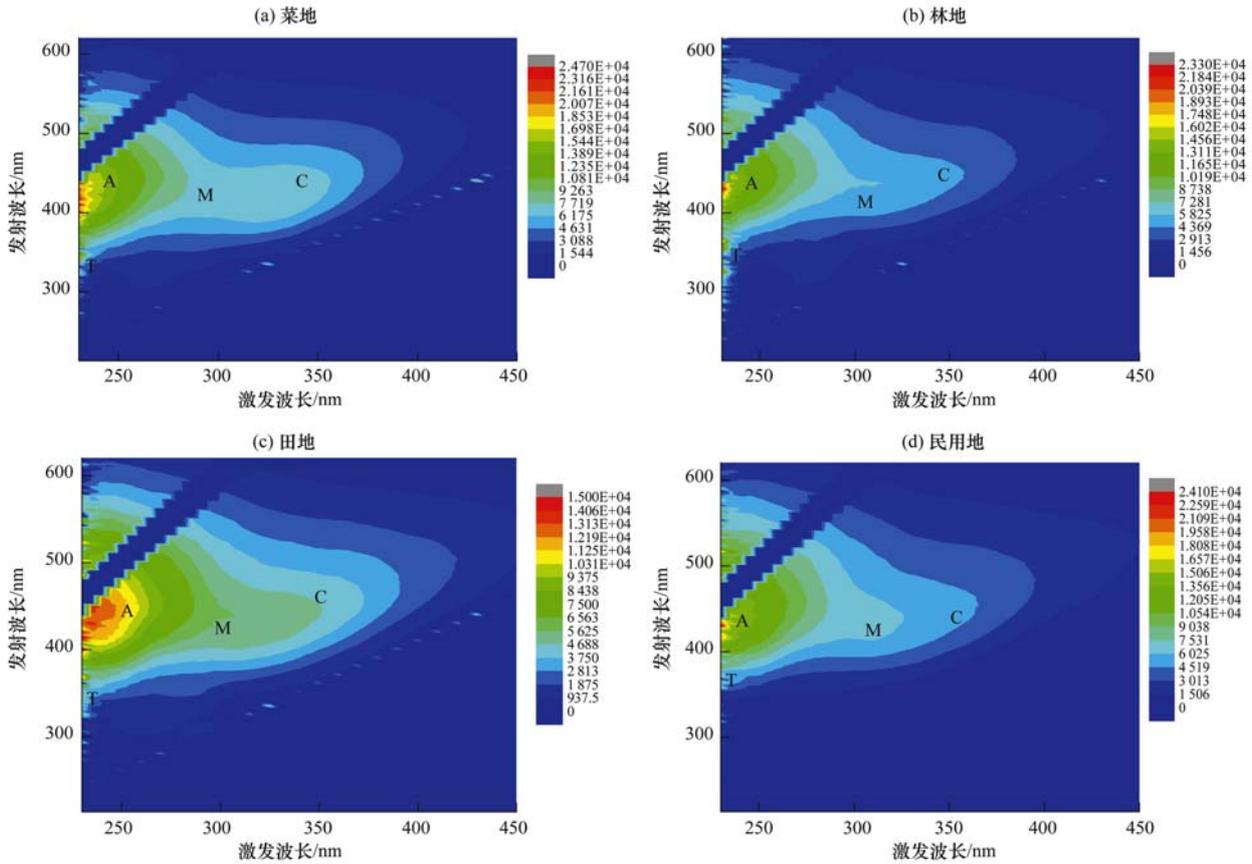


图 4 不同土地类型土壤 DOM 的典型荧光光谱

Fig. 4 Typical fluorescence spectra of soil DOM under different types of land uses

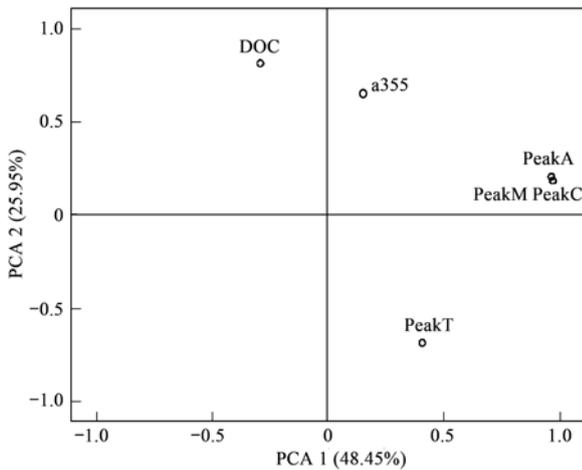


图 5 土壤 DOM 主成分分析

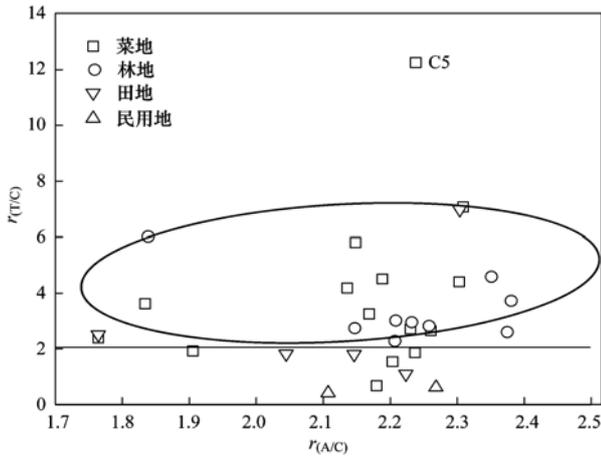
Fig. 5 Principal component analysis of soil DOM

同时类腐殖质峰 A、C 和 M 关系密切,存在同源可能性;主成分 2 与土壤 DOM 浓度和 CDOM 含量有关. $a(355)$ 与 C 峰、M 峰间存在很好的正相关关系 ($P < 0.05$),与 T 峰无相关性. 这说明 CDOM 浓度与 DOM 中类腐殖质组分关系密切,后者一定程度上决定了 CDOM 浓度变化,进一步证明前文所述

CDOM 与 DOC 之间无相关性的原因在于非生色团(类腐殖组分)对 DOC 的贡献.

2.3.2 荧光光谱特征参数

由于 A 峰主要由低分子量(高荧光效率)类腐殖组分引起,C 峰则来自相对稳定高分子量类腐殖组分,降解程度低、降解潜能较大. 因此 $r_{(A/C)}$ 值用来反映 DOM 中类腐殖组分发育程度^[31,32]. 本研究中样本的 $r_{(A/C)}$ 变化范围在 1.76 ~ 2.38 (均值 2.16 ± 0.17),4 种土地利用类型无显著性差异 ($P > 0.05$). 另外,采用类蛋白峰(T)与类腐殖峰(C)的比值 $r_{(T/C)}$,用来评价内源贡献率的比重,受人为干扰较大的 DOM 样本,通常值 > 2.0 ^[33,34]. 如图 6 所示,大部分样本 $r_{(T/C)}$ 都大于 2.0,说明该农业小流域土壤 DOM 受外来因素尤其是人类活动影响较大,土壤不同程度地受到外源输入的影响,其中菜地影响最大,其次是林地和田地. 受当地农业施肥(尤其是农家肥)等活动影响,导致菜地土壤 DOM 中类蛋白组分比例较高,其中菜地当中的 C5 号点位 $r_{(T/C)}$ 值最大,受人为影响最大. 另外,小部分菜地和田地样本 DOM 值小于 2.0,其原因可能是这几个点位样

图6 土壤 DOM 的 $r_{(T/C)}$ - $r_{(A/C)}$ 分布Fig. 6 Distribution of $r_{(T/C)}$ and $r_{(A/C)}$ values of soil DOM

本中类蛋白组分降解程度较高. 同时,这几个点位样本中存在类酪氨酸 B 峰信号,进一步支持了该解释.

采用腐殖化指数(HIX)对样本腐殖化程度进行表征^[39]. 差异性分析表明,4种土地利用类型的DOM无差异($P > 0.05$). 如图7,自生源指数(BIX)变化范围0.51~0.77(均值 0.62 ± 0.07),变异系数为11.32%,林地最小,而菜地最大. 另外,FI值变化范围1.33~1.64(均值 1.48 ± 0.07),变异系数为4.67%,大部分样本FI值介于自生源特征(FI = 1.9)和陆源特征(FI = 1.4)之间,这表明,包括林地在内的4种土地利用类型,土壤DOM的来源既有人类农业活动、内部微生物活动参与;又有植物枯枝落叶、根系分泌物等陆源输入. 整体而言,菜地DOM的FI值更靠近1.9(内源特征),而BIX值也较高;林地FI更靠近1.4(陆源特征),BIX值低,这进一步证明了林地DOM腐殖化程度较菜地更高,和前文紫外-可见光谱揭示的DOM性质是一致的.

和现有文献中土壤DOM的FI值进行对比(表5)可以发现,与天然林生态系统(北方森林)不同,农业小流域土壤DOM无论是林地还是民用地,其值大部分都在1.4~1.9之间;而前者人为干扰较少,土壤有机质腐殖化程度较高,DOM陆源特征占主导. 与以类蛋白为主的污泥堆肥DOM相比(自生源为主),本研究样本的FI值相对较低. 整体而言,与受到人为影响较大的泥炭地土壤DOM、乌梁素海土壤/沉积物DOM的值类似. 由此可见,本研究区域土壤DOM样本内(自生源)、外(异生源)源均对其组成有显著影响;而人为活动,尤其是农家肥大量施用导致的类蛋白组分变化是DOM地化特征

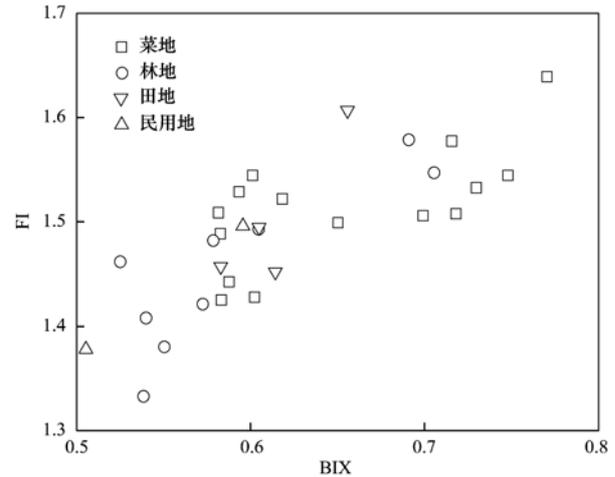


图7 土壤 DOM 的 FI-BIX 分布

Fig. 7 Distribution of FI and BIX values of soil DOM

表5 不同土壤 DOM 的 FI 值对比

Table 5 Comparison of fluorescence index (FI) of DOM from different sources

DOM 来源	FI	文献
受伐木影响的泥炭地土壤	1.3~1.6	[52]
北方森林土壤	1.23~1.27	[37]
乌梁素海沉积物	1.74~1.96	[53]
乌梁素海周边土壤	1.55~1.79	[54]
三峡库区农业小流域土壤	1.33~1.64	本研究

改变的重要驱动力,这也是菜地DOM中类蛋白及非生色组分较高的重要原因之一.

由于农业小流域中土壤DOM的地化特征与其环境生态效应密切相关,例如对污染物迁移转化的影响等. 因此以后的研究工作中,在了解DOM输入途径和演化过程的基础上,进一步研究不同土地利用条件下DOM的环境生态作用,具有十分重要的价值和意义.

3 结论

(1) 三峡库区典型农业小流域中,不同土地利用类型对土壤DOM性质的影响明显. DOM空间分布差异较大,呈现出不同地化特征. 其中以林地DOM腐殖化发育程度最高,芳香性程度较高,结构较为复杂;其次为田地. 尽管民用地和菜地DOC含量高,但是芳香化程度低,DOM中非生色组分对高DOC含量具有重要贡献. 本研究中没有发现FDOM、CDOM分别与DOC的显著线性相关性. 荧光光谱特征表明,除自生源微生物活动的影响外,人为活动(例如施肥)也是导致DOM组分中类蛋白组分增多的重要原因,如菜地.

(2) 由于不同土地利用类型的影响, 土壤 DOM 的吸光和荧光组分变化均存在差异; 同时非生色团 (或非荧光物质) 在整个 DOM 中的比例也不同, 变化较大, 因此传统简单对 SOM 和土壤 DOM 进行定量描述的方法 (例如 DOC 浓度变化), 并不足以完整评价不同土地利用类型对土壤有机质的影响, 具有一定的局限性。

(3) 两种光谱分析方法中, 不同特征参数对不同土地利用条件下 DOM 结构和性质差异性的灵敏程度不同。S_R 值和 HIX 值对 DOM 地化特征的差异性并不敏感。但两种光谱联用, 互通有无形成互补, 相互印证, 可以进一步有效提高对 DOM 组成及性质的解析精度。对土壤 DOM 溯源分析时, 单一光谱指标并不能全面提供 DOM 的地化特征信息。

参考文献:

- [1] Zsolnay Á. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions[J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3-4): 187-209.
- [2] 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.
- [3] Uchimiya M, Ohno T, He Z Q. Pyrolysis temperature-dependent release of dissolved organic carbon from plant, manure, and biorefinery wastes [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, **104**: 84-94.
- [4] 赵劲松, 张旭东, 袁星, 等. 土壤溶解性有机质的特性与环境意义[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(1): 126-130.
- [5] 许中坚, 刘广深, 刘维屏. 土壤中溶解性有机质的环境特性与行为[J]. *环境化学*, 2003, **22**(5): 427-433.
- [6] Ekström S M, Kritzberg E S, Kleja D B, *et al.* Effect of acid deposition on quantity and quality of dissolved organic matter in soil-water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(11): 4733-4739.
- [7] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 溶解有机质的三维荧光光谱特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- [8] 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.
- [9] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2452-2462.
- [10] Guggenberger G, Christensen B T, Zech W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature[J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, **45**(4): 449-458.
- [11] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, **31**(18): 5358-5370.
- [12] 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.
- [13] Williams C J, Yamashita Y, Wilson H F, *et al.* Unraveling the role of land use and microbial activity in shaping dissolved organic matter characteristics in stream ecosystems [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(3): 1159-1171.
- [14] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices[J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3): 357-380.
- [15] 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.
- [16] 李梦婕, 江韬, 何仁江, 等. 三峡库区典型农田小流域水化学特征及变化规律[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(6): 1062-1068.
- [17] 李梦婕, 江韬, 何仁江, 等. 岩石风化对三峡库区农业小流域水化学特征的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(8): 1495-1501.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 李璐璐, 江韬, 卢松, 等. 利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质 (DOM) 浓度 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 171-179.
- [22] 高洁, 江韬, 闫金龙, 等. 天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质 (DOM) 光漂白过程: 以涪江-嘉陵江为例 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 160-169.
- [23] 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.
- [24] 郭卫东, 程远月, 吴芳. 海洋荧光溶解有机物研究进展 [J]. *海洋通报*, 2007, **26**(1): 98-106.
- [25] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* A preliminary study of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in lake Taihu, a shallow subtropical lake in China [J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2005, **33**(4): 315-323.
- [26] 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.
- [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] 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.
- [29] Wu F C, Xing B S. Natural organic matter and its significance in the environment [M]. Beijing: Science Press, 2009. 28-32.
- [30] 席北斗, 魏自民, 赵越, 等. 垃圾渗滤液水溶性有机物荧光光谱特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(11): 2605-2608.
- [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] 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.
- [33] Galapate R P, Baes A U, Ito K, *et al.* Detection of domestic wastewaters in Kurose river using synchronous fluorescence spectroscopy[J]. *Water Research*, 1998, **32**(7): 2232-2239.
- [34] Baker A, Curry M. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills [J]. *Water Research*, 2004, **38**(10): 2605-2613.
- [35] Del Vecchio R, Blough N V. Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter on natural waters: kinetics and modeling [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **78**(4): 231-253.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Ohno T, Bro R. Dissolved organic matter characterization using multiway spectral decomposition of fluorescence landscapes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(6): 2028-2037.
- [39] Ohno T, Fernandez I J, Hiradate S, *et al.* Effect of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties[J]. *Geoderma*, 2007, **140**(1): 176-187.
- [40] 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.
- [41] Hughes S, Reynolds B, Roberts J D. The influence of land management on concentrations of dissolved organic carbon and its effect on the mobilization of aluminium and iron in podzol soils in Mid-Wales [J]. *Soil Use Management*, 1990, **6**(3): 137-145.
- [42] Strobel B W, Bernhoft I, Borggaard O K. Low-molecular-weight aliphatic carboxylic acids in soil solutions under different vegetations determined by capillary zone electrophoresis [J]. *Plant and Soil*, 1999, **212**(2): 115-121.
- [43] Delprat L, Chassin P, Linères M, *et al.* Characterization of dissolved organic carbon in cleared forest soils converted to maize cultivation [J]. *Developments in Crop Science*, 1997, **25**: 257-266.
- [44] Leinweber P, Schulten H R, Kalbitz K, *et al.* Fulvic acid composition in degraded fenlands [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, **164**(4): 371-379.
- [45] Gregorich E G, Liang B C, Drury C F, *et al.* Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(5): 581-587.
- [46] Marinari S, Liburdi K, Fliessbach A, *et al.* Effects of organic management on water-extractable organic matter and C mineralization in European arable soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, **106**(2): 211-217.
- [47] Zsolnay A, Steindl H. Geovariability and biodegradability of the water-extractable organic material in an agricultural soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23**(11): 1077-1082.
- [48] Puget P, Drinkwater L E. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(3): 771-779.
- [49] Ferrari G M, Dowell M D, Grossi S, *et al.* Relationship between the optical properties of chromophoric dissolved organic matter and total concentration of dissolved organic carbon in the southern Baltic Sea region [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **55**(3): 299-316.
- [50] 周江敏, 陈华林, 唐东民, 等. 秸秆施用后土壤溶解性有机质的动态变化 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, **14**(4): 678-684.
- [51] 高忠霞, 周建斌, 王祥, 等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响 [J]. *土壤学报*, 2010, **47**(1): 115-121.
- [52] Gandois L, Teisserenc R, Cobb A R, *et al.* Origin, composition, and transformation of dissolved organic matter in tropical peatlands [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, **137**: 35-47.
- [53] 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.
- [54] 郭旭晶, 席北斗, 何小松, 等. 乌梁素海周边土壤溶解性有机质荧光特性及其与 Cu(II) 的配位研究 [J]. *环境化学*, 2010, **29**(6): 1121-1126.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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. 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