

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 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 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)

钛盐混凝剂调理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, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 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 张名蒙, 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 龚丹丹, 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, 李泽烽, 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)

芘胁迫对 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, 李亚闾, 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-C₃N₄/Bi₂S₃ 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)

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, 华璐

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 选取 4 种不同类型土壤和腐熟鸡粪, 透析提取溶解性有机质 (DOM), 通过凝胶色谱、三维荧光光谱测定并分析了 DOM 的相对分子质量 (M_r) 分布、化学结构特征及其与铜的结合能力。结果表明, 鸡粪 DOM 相对分子质量积分面积远高于其他样品, 表现出其具有较高的有机物含量, 泥炭土次之。暗棕壤、褐土和黑土较低, 仅为鸡粪积分面积的 4.5% ~ 5%。鸡粪在中分子量段积分面积约占总物质的 34.1%, 低分子量段和高分子量段分别约占 41.7% 和 24.2%。荧光光谱分析表明, 各样品均出现类蛋白荧光峰 ($E_x/E_m = 240 \sim 270/300 \sim 350$ nm), 在中、高分子量段 ($M_r > 500$) 暗棕壤存在的荧光峰消失。泥炭土出现了较为独特的可见光区类富里酸荧光峰 ($E_x/E_m = 325/420$ nm), 该荧光峰和黑土的荧光峰在中、高分子量段 ($M_r > 500$) 都产生了红移现象。鸡粪分别出现了和黑土类似的紫外区类富里酸荧光峰, 以及和泥炭土类似的可见光区类富里酸荧光峰, 以及一类独特的类蛋白荧光峰 ($E_x/E_m = 280/350$ nm), 但这种类蛋白荧光峰在中分子量段 ($500 < M_r < 12000$) 消失。分析表明泥炭土与 Cu 的络合常数 ($\lg K$) 为 4.13, 其他 3 种土壤与 Cu 的络合常数较小且差别不大, 集中在 2.10 ~ 3.10 之间。鸡粪与 Cu 的结合能力最大, 络合常数达到 6.66。

关键词: 溶解性有机质; 三维荧光光谱; 相对分子质量分布; 络合能力; 土壤

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2338-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.043

Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu^{2+} -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter

TIAN Yu, WANG Xue-dong*, CHEN Xiao-lin, HUA Luo

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Extracted and dialyzed from four kinds of soil and chicken manure, DOM samples were analyzed to investigate their molecular weight distribution, chemical structure characteristics and the metal binding capacity. The results showed that the integral area of the molecular weight of chicken manure DOM was much higher than those of other samples, which indicated the high content of organic matter. And the peat soil followed it. The integral areas of dark brown soil, cinnamon soil and black soil were low, accounting for only 4.5% -5% of chicken manure integral area. The integral area of chicken manure DOM in middle molecular weight fraction accounted for about 34.1% of the total material, while those in low molecular weight and high molecular weight fractions accounted for about 41.7% and 24.2%, respectively. The protein-like fluorescence peaks ($E_x/E_m = 240\text{-}270/300\text{-}350$ nm) were present in all samples, and absent in middle and high molecular fractions ($M_r > 500$) for dark brown soil. The visible fulvic acid-like fluorescence peaks ($E_x/E_m = 325/420$ nm) observed in peat soil, and the fluorescence peaks of black soil in the middle and high molecular fractions ($M_r > 500$) both had a red shift phenomenon. The DOM of chicken manure had the UV-fulvic acid-like fluorescence peaks similar to black soil, and the visible fulvic acid-like fluorescence peaks similar to peat soil. Furthermore, it had a kind of protein-like fluorescence peak ($E_x/E_m = 280/350$ nm) that was absent in the middle molecular weight fraction ($500 < M_r < 12000$). The Cu^{2+} complexation constant was 4.13 for peat soil, and smaller for other three kinds of soil (between 2.10 and 3.10). Chicken manure showed the greatest ability to bind Cu^{2+} with a resulting complexation constant of 6.66, indicating the importance of the unique peak, protein-like fluorescence peak, in the chicken manure of the low and high molecular weight fractions.

Key words: dissolved organic matter; three-dimensional fluorescence spectroscopy; relative molecular mass distribution; metal binding; soil

随着工农业的发展, 重金属铜在土壤中的积累日益增加, 对生态环境和人体健康产生了严重威胁。研究表明土壤铜污染已经导致部分地区如北京、天津、西安、沈阳、济南、长春、郑州、宁波、武汉、成都和上海等地的农产品铜含量超过国家食品卫生标准^[1]。铜元素会对种子的萌发、土壤中酶的活性、微生物的数量和种类产生影响。此外, 铜元素对于抑制植物根系生长方面也比其他元素要强^[2]。

土壤中铜的迁移转化受诸多因素的影响, 例如铜的形态和土壤的理化性质。其中, 土壤有机质作为重要的因素之一对铜的毒性和形态有显著影响^[3, 4]。

收稿日期: 2015-12-03; 修订日期: 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(21007042); 北京市自然科学基金项目(8122014); 北京高等学校青年英才计划项目(YETP1632)

作者简介: 田雨(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染防治, E-mail: tianyu9011@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: wangxuedong9801@126.com

溶解性有机质(DOM)是在自然状态下能由土壤固相进入到水相且分子直径小于 $0.45\ \mu\text{m}$ 的有机组分,是一系列相对分子质量大小不同而结构相似的混合物^[5,6]. DOM是土壤的重要组成部分之一,虽然其含量占土壤有机质的比例不高,但却是土壤中最活跃的部分之一.有研究表明,土壤环境中大部分的溶解性重金属都处于和DOM的络合状态,其对重金属的形态和生物有效性有着重要影响^[7].但DOM分子结构复杂,且具体的成分组成不易确定,同时,不同来源的DOM相对分子质量组成差异较大,这些因素都会影响其与重金属的结合以及生物有效性,因此研究DOM的化学组成结构及相对分子质量分布对理解DOM与重金属相互作用的机制,量化重金属的环境化学行为具有重要意义.近年来学者针对DOM组成也作了一些研究.王春艳等^[8]在研究DOM和重金属络合特征过程中认为按照HA和FA均占DOM的50%准确性最好.Dwane等^[9]则在研究中假设40%~80%的DOM来自HA和FA,然而在实际情况中,进行简单的比例假设不能充分表现出实际过程中DOM成分的复杂性.基于这种考虑,Inaba等^[10]不仅考虑到低分子量有机酸(柠檬酸、苹果酸和草酸),也考虑到了整合剂乙二胺四乙酸(EDTA)和二乙烯三胺五乙酸(DTPA)以及腐殖酸在土壤溶液中共存对生物有效性和毒性的复合影响.随着化学分析技术的发展,近年来,一些学者将三维荧光光谱应用在可溶性有机质的结构分析上.傅平青等^[11]利用三维荧光光谱法研究DOM与汞的相互作用,并研究DOM中不同荧光基团与汞的配位作用.近年来一些研究尝试利用分割相对分子质量来研究有机质的性质,De Zarruk等^[12]利用叶堆肥、鸡粪、甘蔗酒糟模拟有机质分段透析研究得出不同分子段有机质含量及其铜络合能力,较好地量化了不同来源DOM相对分子质量和铜络合能力之间的关系,但这些方法和技术很少用于土壤中天然的DOM.

土壤有机质的来源很多,对于农田土壤,畜禽粪便是其重要的来源之一.其中,鸡粪作为我国养殖业规模不断扩大的副产物,对其进行微生物堆肥无害化处理,进而作为农家肥添加到农田中是我国对于鸡粪的一种常规处理方式.同时,有研究表明鸡粪中的DOM与重金属具有较强的络合能力^[13],因此,其常被作为人为来源土壤DOM的模式研究物质之一^[12,13].基于此,本研究选取了暗棕壤、褐土、黑土以及泥炭土这4种土壤类型,同时选择了有机

质含量较高的腐熟鸡粪,尝试分析不同有机质来源土壤中DOM的相对分子质量分布、光谱特征及其与铜的络合能力,以期理解土壤中重金属与有机质相互作用的机制,揭示土壤中重金属的环境化学行为提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与前处理

暗棕壤和褐土采自北京雾灵山、黑土采自黑龙江海伦,泥炭土和腐熟鸡粪肥购于江苏省宿迁市沭阳县瑞铭花卉园艺场.

土壤DOM的提取:按照土水比1:5与蒸馏水混合,连续振荡24h后过滤,将滤液在 $7\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, $4\ ^\circ\text{C}$ 的条件下离心30min,上清液通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜,将最终获得的滤液低温保存^[9].

土壤DOM相对分子质量分割:根据实验所得出的样品相对分子质量分布范围(22~765 026),以及各样品所集中的相对分子质量段,采用连续透析法对样品进行相对分子质量分段透析^[12],以便针对不同相对分子质量DOM进行特征分析.透析采用标准级再生纤维素透析膜Spectra/Por4(M_r 12 000~14 000)和生物技术级纤维素酯透析膜(M_r 500~1 000).透析前将膜管剪裁成合适长度以容纳20 mL提取物,浸泡在去离子水中过夜消除甘油和叠氮钠后用蒸馏水冲洗干净,然后将膜管底部用配重膜夹密封,顶部用非配重膜夹封闭,以确保膜管悬浮在透析液中.透析过程在1 L烧杯中加入900 mL去离子水,避光低温($4\ ^\circ\text{C}$)下透析24 h,透析膜管外即为相对分子质量小于500的提取物,膜管内物质继续进行下一步透析.最终获得 $M_r < 500 \sim 1\ 000$ 、 $500 \sim 1\ 000 < M_r < 12\ 000$ 、 $M_r > 12\ 000$ 这3个相对分子质量段的DOM.该公司生产透析膜管经其检测截获量至少达到90%.同时,为了检验采用这种提取方法膜管内不会吸附DOM,将使用过的膜管浸泡在去离子水中,测定其TOC含量.结果显示DOM残留 $< 5\%$.

1.2 相对分子质量分布分析

应用水相凝胶色谱测定土壤DOM相对分子质量的分布特征.测定采用日本Shimadzu公司凝胶渗透色谱Prominence系列系统,包括输液泵(LC-20AD)、示差折光检测器(RID-10A)、自动进样器(SIL-20A)、柱温箱(CTO-20A)等单元.色谱柱Shodex生产硅胶基质填料水溶性色谱柱kw802.5.配制好的标准品室温放置24 h进行平衡,使用前缓

慢水平摇动样品瓶,使样品浓度均匀,且瓶壁无气泡.使用 APSC 公司出品的葡聚糖标准品作为标样进行校正,相对分子质量分别为 1 000、12 600、21 000、44 000、60 600,分别按照药品标准进行浓度配制.将样品流动相以 $1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 进行输送,输入样品体积为 $50 \mu\text{L}$.依据标准相对分子质量物质的洗脱体积和相对分子质量对数之间的线性关系,在同一实验条件下根据实际样品的洗脱体积计算出样品的相对分子质量.样品的数均分子量(M_n)、重均分子量(M_w)和分散系数 ρ 计算如下^[14, 15]:

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^n h_i / \sum_{i=1}^n (h_i + M_i)}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (1)$$

$$M_w = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i \times M_i)}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

$$\rho = M_w / M_n \quad (3)$$

式中, n 为样品的分子数量, h_i 表示样品洗脱体积为 i 时检测器的峰值, M_i 为洗脱体积为 i 时样品的相对分子质量.

以往研究中多以 X 轴为洗脱时间, Y 轴为检测响应信号制作图谱,比较各 DOM 样品的相对分子质量分布情况^[16~18].不同相对分子质量物质的分布比例通过软件 LCsolution GPC 计算.

1.3 三维荧光特征分析

通过高灵敏度荧光光谱分析仪(Hitachi F-4500)进行样品三维荧光光谱测定.激发光源为 150W 氙弧灯;激发波长(E_x) = 5 nm,发射波长(E_m) = 10 nm;扫描速度 $1200 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$;激发发射波长范围为 $E_x = 200 \sim 400 \text{ nm}$, $E_m = 300 \sim 550 \text{ nm}$.作为土壤、底泥和堆肥底料提取的 DOM,其浓度较高可能发生荧光内滤效应,为了消除内滤效应的干扰,所有样品 DOM 均稀释至 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后进行

分析检测. DOC 浓度测定采用德国 Analytikjena 公司 multiN/C2100 总有机碳/总氮分析仪.

1.4 荧光猝灭滴定实验

取 20 mL DOM 样品滴加 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液,使 Cu^{2+} 浓度分布于 $0 \sim 110 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,并用 HNO_3 和 NaOH 溶液调节体系保持 $\text{pH} = 6.0 \pm 0.05$ ^[19].加入的酸碱试剂总量不超过 $100 \mu\text{L}$,忽略浓度稀释效应.公式如下^[12]:

$$\frac{F_0 + F}{F_0} = \frac{Y_{\max} [\text{Me}^{z+}]}{K_L + [\text{Me}^{z+}]} \quad (4)$$

式中, F_0 代表蒸馏水荧光光强; Y_{\max} 代表与铜的最大猝灭程度; K_L 表示金属阳离子亲和力.

进一步计算金属络合常数通过公式:

$$K_{\text{mb}} = \frac{10^6}{K_L} \quad (5)$$

式中, K_{mb} 表示金属络合常数. pH 测定采用美国 Spectrum 公司 pH Meter IQ150.铜的浓度测定采用原子吸收光谱仪(AAS, WFX2100).

2 结果与分析

2.1 不同土壤 DOM 相对分子质量分布及其特征

为了证实对 DOM 样品进行分段分析的可行性,分析了各 DOM 样品的分散系数.各样品 DOM 总体及各峰分散系数如表 1.各样品总体分散系数 $\rho > 1$,是多分散性的有机物,其中鸡粪 $\rho = 1.44 \times 10^{18}$ 远超过其他 DOM 样品.根据各样品相对分子质量所集中的平均分子量划分峰,各峰分散系数介于 1 和 2 之间.由此证明虽然 DOM 是在相对分子质量上具有连续性的混合物,但也可以根据其相对分子质量分布上存在相对集中的现象进行峰的划分.

表 1 各样品多分散系数

Table 1 Average polydispersity index of each sample

样品	暗棕壤	褐土	黑土	泥炭土	鸡粪
总体	68.04	89.39	93.27	164.56	1.44×10^{18}
峰 1	1.02	1.02	1.04	2.39	1.13
峰 2	1.04	1.04	1.01	1.02	1.71
峰 3	1.41	1.37	1.05	1.39	1.17
峰 4	— ¹⁾	—	1.34	1.91	1.16
峰 5	—	—	—	—	1.20
峰 6	—	—	—	—	1.23

1)“—”表示未检出

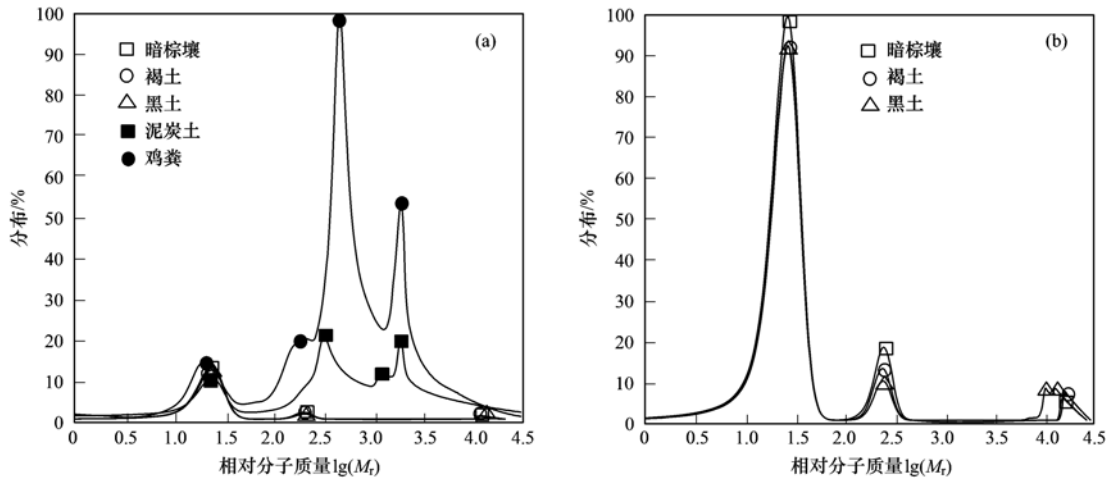
以 4 种土壤及鸡粪样品 DOM 中所占比最高的峰值为 100%,比较各样品相对分子质量积分面积,结果如图 1.鸡粪 DOM 相对分子质量积分面积为 2 141 684,远高于其他样品,泥炭土次之为 780 865.

暗棕壤、褐土和黑土较低,仅为鸡粪积分面积的 4.5%~5%.由此可以看出鸡粪中 DOM 含量远高于其他样品.由图 1 可知,鸡粪不同分子量表现出高(100 032)、中(1 813)和低(432)这 3 个峰值.其

中鸡粪在中分子量段 ($500 \sim 1\,000 < M_r < 12\,000$) 积分面积约占总物质的 34.1%，低分子量段 ($M_r < 500 \sim 1\,000$) 和高分子量段 ($M_r > 12\,000$) 分别约占 41.7% 和 24.2%。表现出鸡粪 DOM 在不同分子量段上有机物含量的分布差异。泥炭土 DOM 主要的相对分子质量分布范围为 391 ~ 126 755。泥炭土高分子量段所占比较高，可能是降解时间相对较短，多为新近生物活动产生，可能存在着共轭双键结构和较高的苯环结构^[20]。

图 1 中显示暗棕壤、褐土以及黑土的相对分

子质量主要集中在 20、190、13 669 这 3 个相对分子质量峰附近。暗棕壤在低分子量段积分面积约占总物质的比例较高，约为 84.8%。褐土和黑土的低分子量所占比例约为暗棕壤的 92%。在中分子量段，黑土所占比例相对褐土和暗棕壤分别高 6%、10%。而高分子量段，黑土出现了峰值为 $M_r = 7\,457$ 和 $M_r = 11\,477$ 的“双峰”现象。暗棕壤 DOM 中小分子含量较高可能是由于其有机质来源主要是以针叶林为主，在土壤微生物降解作用下，产生较多的小分子物质^[21]。



(a) 以所有样品最高峰(位于鸡粪)设定参照 100%；(b) 以暗棕壤、褐土和黑土中最高峰(位于暗棕壤)设定参照 100%

图 1 各样品相对分子质量分布

Fig. 1 Relative molecular mass distribution of all DOM samples

2.2 不同样品 DOM 的化学组成

2.2.1 不同样品 DOM 的荧光光谱特征

为了进一步研究各样品 DOM 的组成和结构特

征,分别对各样品 DOM 进行三维荧光光谱分析. 如图 2,各样品均出现类蛋白荧光峰 ($E_x/E_m = 240 \sim 270/300 \sim 350 \text{ nm}$) 以及各自独特的荧光峰. 鸡粪

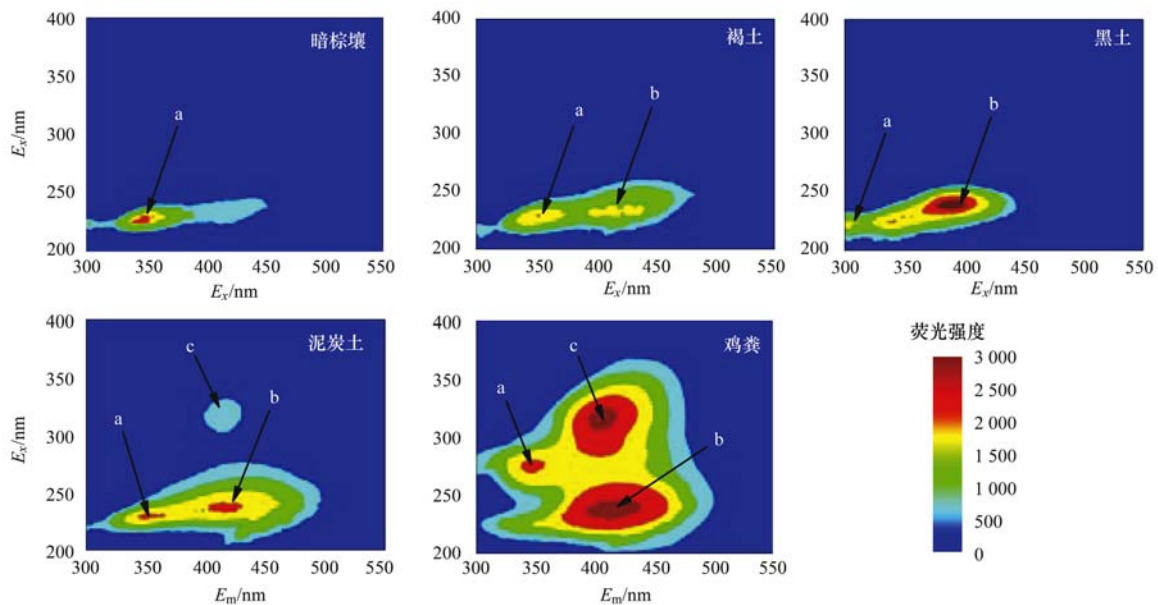


图 2 各 DOM 样品三维荧光光谱图

Fig. 2 Fluorescence excitation-emission spectra of dark brown soil, cinnamon soil, black soil, peat soil and chicken manure

DOM 中出现了类色氨酸荧光峰 a ($E_x/E_m = 280/350$ nm), 这与 Arndt 等^[22]的研究结果较为吻合. 他认为畜禽粪便中 15% ~ 25% 为蛋白质类, 其中 20% 左右的氮与酪氨酸和色氨酸有关. 鸡粪同时出现了和黑土类似的紫外区类富里酸峰 b ($E_x/E_m = 240/425$ nm), 这种荧光峰被认为与腐殖质结构中的羰基和羧基有关, Coble 等^[23]研究表明其源于木质素和蛋白质的降解产物. 此外, 鸡粪出现了和泥炭土相同的荧光峰 c ($E_x/E_m = 325/420$ nm), Baker^[24]在建立污泥污水荧光特征模型的过程中得出该荧光峰属于可见光区类富里酸荧光.

2.2.2 不同相对分子质量土壤 DOM 的荧光特征

分别对各 DOM 样品透析提取结果进行三维荧光光谱分析, 从而进一步了解各样品 DOM 物质结构和组成的特征在相对分子质量分布上的差异, 结果如图 3. 各样品荧光峰随相对分子质量变化产生消失、红移等现象. 鸡粪独特的类色氨酸荧光峰 a ($E_x/E_m = 280/350$) 在中分子量段 ($500 < M_r < 12\ 000$) 强度减弱, 未能形成独立的峰值, 可见该类色氨酸荧光峰相对分子质量分布范围主要集中在低分子量和高分子量两部分. 在相对分子质量分布测定中, 鸡粪的中分子量段积分面积仅占 34.1%, 相对而言, 低分子量段和高分子量段约占 65.9% 为主

体部分. 因此, 鸡粪独特的类色氨酸荧光峰存在于占物质主体部分并起主导作用的低分子量段和高分子量段. 所以作为鸡粪 DOM 主体部分的类色氨酸荧光峰可能对鸡粪的化学性质起到主导作用.

在暗棕壤按照相对分子质量分段透析提取的 DOM 样品中, 占总物质 84.8% 的低分子量段 ($M_r < 500 \sim 1\ 000$) 有明显的紫外区类富里酸峰 ($E_x/E_m = 240/425$ nm), 但在中分子量段 ($500 \sim 1\ 000 < M_r < 12\ 000$) 以及高分子量段 ($M_r > 12\ 000$) 样品中这种荧光峰消失, 并且荧光强度降低. Senesi 等^[25]关于土壤及土壤相关物质提取腐殖酸和富里酸进行荧光光谱分析的研究中认为, 部分有机质荧光峰集中在短波长, 物质分布在中低分子量, 存在芳香缩聚程度较低以及腐殖化较低的可能性. 黑土和泥炭土在低分子量段出现独立荧光峰 ($E_x/E_m = 220/395$ nm), 中分子量段在保留该荧光峰的同时在其短波长方向出现荧光现象. 虽未形成独立的荧光峰, 但形成了类似于两个峰值之间鞍部状态. 这种鞍部构造, 可能是由于 DOM 中酚类物质相对增加, 形成微小的红移现象而产生的. Helms 等^[26]认为样品红移现象与 DOM 的理化性质有关. Chen 等^[27]则更进一步认为是样品中酚类物质增加和碳水化合物的减少可能引起荧光峰的红移, 以及荧光光强的减弱.

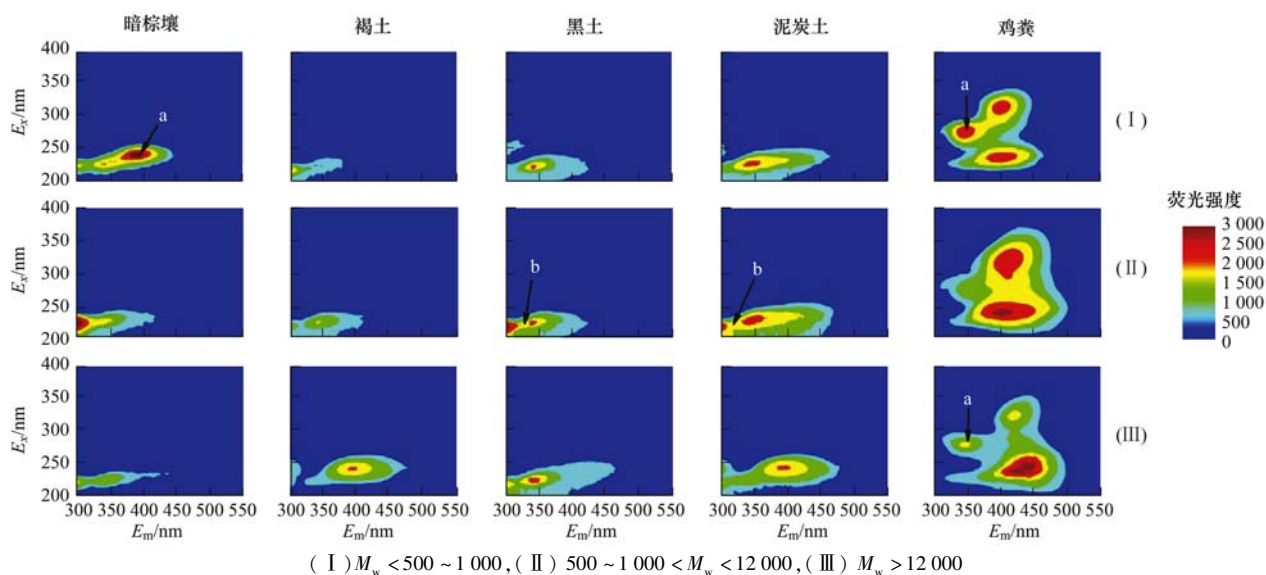


图 3 暗棕壤、褐土、黑土、泥炭土和鸡粪不同相对分子质量段 DOM 三维荧光光谱图
Fig. 3 Fluorescence excitation-emission spectra of different relative molecular mass fractions of soil, cinnamon soil, black soil, peat soil and chicken manure

2.3 不同土壤样品 DOM 与铜的络合能力

DOM 对土壤中重金属等污染物的生态环境效应产生一系列的重要影响. 为了研究各样品 DOM 与重金属铜的相互作用, 采用荧光猝灭滴定法结合

区域面积积分法对各 DOM 样品与铜的络合能力进行分析. 结果显示, 暗棕壤、褐土、黑土、泥炭土和鸡粪与铜的络合常数分别为 2.10、2.98、3.10、4.13 以及 6.66. 除泥炭土达到 4.13 外, 黑土、褐土

和暗棕壤这 3 种土壤的络合稳定常数仅为 3.10、2.98 和 2.10。

鸡粪呈现较大的金属结合能力,与铜的络合常数达到 6.66。可能的原因是鸡粪有机物含量较高,这在相对分子质量积分面积中已被证实。此外,上述表征鸡粪 DOM 化学结构中,鸡粪的三维荧光光谱中具有独特的类色氨酸荧光峰,以及紫外区类富里酸荧光峰和可见光区类富里酸荧光峰,这两种荧光峰所表征的物质中可能含有羧基和酚羟基类含氧基团对金属结合能力也会产生影响。在以往研究中,铜与酚羟基络合常数达到 7.95^[28]。另外,也有研究表明,鸡粪中含有的巯基也会影响其多铜的吸附。但三维荧光光谱技术还无法获取巯基的信息,因此,这还需要在之后的研究中引入其他分析技术获得更加全面而深入的结果。

3 结论

(1) 鸡粪 DOM 相对分子质量积分面积远高于其他样品,表现出其具有较高的有机物含量,泥炭土次之。暗棕壤、褐土和黑土较低,仅为鸡粪积分面积的 4.5%~5%。鸡粪在中分子量段积分面积约占总物质的 34.1%,低分子量段和高分子量段分别约占 41.7% 和 24.2%。

(2) 各样品均出现类蛋白荧光峰($E_x/E_m = 240 \sim 270/300 \sim 350 \text{ nm}$),在此基础上鸡粪在分别出现了和黑土类似的紫外区类富里酸峰,以及和泥炭土类似的可见光区类富里酸荧光峰之外,还出现了一类独特的类色氨酸荧光峰。

(3) 各样品荧光峰随相对分子质量变化产生消失、红移等现象。暗棕壤在低分子量($M_r < 500$)时存在的荧光峰在中、高分子量段($M_r > 500$)消失,黑土和泥炭土在中、高分子量段($M_r > 500$)荧光峰产生红移现象。鸡粪独特的类蛋白质荧光峰在中分子量段($500 < M_r < 12\ 000$)消失。

(4) 鸡粪呈现较大的金属结合能力,与铜的络合常数达到 6.66。除泥炭土达到 4.13 外,其他 3 种土壤的络合稳定常数相对较低。

参考文献:

- [1] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(1): 79-84.
- [2] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 等. 土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性效应[J]. 环境科学, 2002, **23**(1): 103-107.
- [3] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, **34**(4): 82-87.
- [4] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, **42**(2): 503-512.
- [5] Nebbioso A, Piccolo A. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): a critical review[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, **405**(1): 109-124.
- [6] 李少生, 杜有新. 土壤可溶性有机质研究进展[J]. 江西林业科技, 2010, (3): 23-26.
- [7] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(6): 1083-1087.
- [8] 王春艳, 陈浩, Wu B K, 等. 溶解性有机碳的主要组成对青鳉鱼铜急性毒性的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(4): 629-633.
- [9] Dwane G C, Tipping E. Testing a humic speciation model by titration of copper-amended natural waters[J]. Environment International, 1998, **24**(5-6): 609-616.
- [10] Inaba S, Takenaka C. Effects of dissolved organic matter on toxicity and bioavailability of copper for lettuce sprouts[J]. Environment International, 2005, **31**(4): 603-608.
- [11] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 三维荧光光谱研究溶解有机质与汞的相互作用[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 140-144.
- [12] De Zarruk K K, Scholer G, Dudal Y. Fluorescence fingerprints and Cu^{2+} -complexing ability of individual molecular size fractions in soil- and waste-borne DOM[J]. Chemosphere, 2007, **69**(4): 540-548.
- [13] 李鸣晓, 何小松, 刘骏, 等. 鸡粪堆肥水溶性有机物特征紫外吸收光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(11): 3081-3085.
- [14] Chin Y P, Aiken G, O'Loughlin E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. Environmental Science & Technology, 1994, **28**(11): 1853-1858.
- [15] Her N, Amy G, McKnight D, et al. Characterization of DOM as a function of MW by fluorescence EEM and HPLC-SEC using UVA, DOC, and fluorescence detection[J]. Water Research, 2003, **37**(17): 4295-4303.
- [16] 贾陈忠, 王焰新, 张彩香. 光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子质量变化特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3495-3500.
- [17] 高乃云, 李富生, 汤浅晶, 等. 上海源水中 DOM 的分子质量及去除特性[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(12): 13-17.
- [18] 张海云, 李爱民, 郑凯. 城市污水二级生化出水中溶解性有机物的特性及其深度处理研究[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(2): 71-75.
- [19] 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.
- [20] 岳兰秀, 吴丰昌, 刘丛强, 等. 红枫湖和百花湖天然溶解有机质的分子荧光特征与分子量分布的关系[J]. 科学通报, 2005, **50**(24): 2774-2780.

- [21] Bu X L, Wang L M, Ma W B, *et al.* Spectroscopic characterization of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types along an elevation gradient in the Wuyi Mountains [J]. *Geoderma*, 2010, **159** (1-2): 139-146.
- [22] Arndt D L, Day D L, Hatfield E E. Processing and handling of animal excreta for refeeding [J]. *Journal of Animal Science*, 1979, **48**(1): 157-162.
- [23] Coble P G, Green S A, Blough N V, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy [J]. *Nature*, 1990, **348**(6300): 432-435.
- [24] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(5): 948-953.
- [25] Senesi N, Miano T M, Provenzano M R, *et al.* Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy [J]. *Soil Science*, 1991, **152** (4): 259-271.
- [26] Helms J R, Stubbins A, Perdue E M, *et al.* Photochemical bleaching of oceanic dissolved organic matter and its effect on absorption spectral slope and fluorescence [J]. *Marine Chemistry*, 2013, **155**: 81-91.
- [27] Chen J, LeBoeuf E J, Dai S, *et al.* Fluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fractions [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(5): 639-647.
- [28] Powell K J, Brown P L, Byrne R H, *et al.* Chemical speciation of environmentally significant metals with inorganic ligands Part 2: the Cu^{2+} - OH^- , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , and PO_4^{3-} systems (IUPAC technical report) [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2007, **79**(5): 895-950.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2015年10月21日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2014年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2014年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分76.00,排名第一,总被引频次7733,影响因子1.294.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2014年度《环境科学》综合评价总分76.00,在被统计的33种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

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 Floes	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