

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(III) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	
《环境科学》征稿简则 (493)	
信息 (508, 588, 610, 731)	
专辑征稿通知 (788)	

长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究

罗璐^{1,2}, 周萍², 童成立^{2*}, 石辉^{1*}, 吴金水², 黄铁平³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 湖南省土壤肥料工作站, 长沙 410005)

摘要: 采用傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 对典型稻田生态系统长期定位试验的土壤有机质 (SOM) 结构进行分析, 探讨不同施肥处理下表层与深层土壤有机质的分布差异及其稳定性机制。结果表明, 长期不同施肥措施下稻田表层土壤有机碳 (SOC) 含量以有机-无机肥配施处理最高, 其中高量有机肥 (HOM)、低量有机肥 (LOM) 和秸秆还田 (STW) 处理较对照 (CK) 处理分别增加了 18.5%、12.9% 和 18.4%。土壤有机质的化学结构也存在一定的差异性, 与 CK 相比, 施肥处理均增加了土壤中化学抗性化合物 (脂族性、芳香族)、碳水化合物以及有机硅化合物的官能团吸收强度, 其中 HOM、LOM 和 STW 处理最为明显。以烷烃类化合物为例, HOM、LOM 和 STW 处理下其吸收强度为 0.30、0.25 和 0.29, 较 CK 分别增加了 87%、56% 和 81%。表层土壤有机质各官能团的吸收峰强度皆高于深层土壤, 同样以 HOM、LOM 和 STW 处理的差异最显著。本研究结果揭示了长期有机-无机肥配施下对亚热带稻田土壤有机质较丰富的化学抗性官能团结构的影响, 贡献于其较高的有机质含量, 这也从一方面揭示了稻田土壤有机质积累的化学稳定机制。

关键词: 施肥措施; 稻田土壤; 有机质; 官能团; 红外光谱

中图分类号: X144; X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)02-0692-06

Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations

LUO Lu^{1,2}, ZHOU Ping², TONG Cheng-li², SHI Hui¹, WU Jin-shui², HUANG Tie-ping³

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Hunan Extension Service for Soil and Fertilizer, Changsha 410005, China)

Abstract: Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) was applied to study the structure of soil organic matter (SOM) of paddy soils under long-term different fertilization treatments. The aim was to clarify the different distribution of SOM between different fertilization methods and between topsoil and subsoil, and to explore the stability mechanism of SOM under different fertilization treatments. The results showed that the content of topsoil organic carbon (SOC) was the highest under organic-inorganic fertilizations, with the increment of SOC by 18.5%, 12.9% and 18.4% under high organic manure (HOM), low organic manure (LOM) and straw returning (STW) respectively compared with no fertilization treatment (CK). The long-term fertilizations also changed the chemical structure of SOM. As compared with CK, different fertilization treatments increased the functional group absorbing intensity of chemical resistance compounds (aliphatic, aromaticity), carbohydrate and organo-silicon compounds, which was the most distinctive under treatments of HOM, LOM and STW. For example, the absorbing intensity of alkyl was 0.30, 0.25 and 0.29 under HOM, LOM and STW, respectively. These values were increased by 87%, 56% and 81% as compared with that under CK treatment. The functional group absorbing intensity of SOM in the topsoil was stronger than that in the subsoil, with the most distinctive difference under HOM, LOM and STW treatments. The present research indicated that the enhanced chemical resistance of functional group of SOM may contribute to the high contents of SOC in the paddy soils under long-term organic-inorganic fertilizations, which also suggested a chemical stabilization mechanism of SOM in the paddy soils.

Key words: fertilization practices; paddy soil; organic matter; functional group; FTIR

土壤有机质 (SOM) 是陆地生态系统中重要的碳库, 占据了影响陆地碳循环的有机质的 81%^[1,2], 对全球温室气体的排放产生重要的影响, 因此以土壤有机质的形式固定大气中更多的 CO₂ 是十分必要的^[3]. SOM 的稳定性主要取决于以下 4 个要素的保护作用^[4]: 有机质的难降解性、土壤内在的化学稳定性、土壤中团聚体的物理保护、土壤微生物保护。施肥是影响土壤质量及其可持续利用的农业措

施之一^[5], 不同施肥措施不仅能够导致土壤团聚体中碳原子的相对百分含量发生变化^[6], 也影响土壤腐殖质的结构单元和官能团数量^[7].

收稿日期: 2012-05-31; 修订日期: 2012-09-06

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050601-01); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2010CB833501); 国家自然科学基金项目 (40971180, 41001141)

作者简介: 罗璐 (1984 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境, E-mail: leilaluo@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tong@isa.ac.cn; Shihui06@126.com

国外对 SOM 结构的研究极为活跃,如 Chodak 等^[8]利用近红外技术预测了林地土壤在固定有机碳(SOC)方面的良好效果,Stenberg 等^[9]探讨了可见光和近红外技术分别在测定 SOM 方面的可行性以及前景,Calderón 等^[10]研究了运用中红外技术测定 SOM 的化学结构差异性.鉴于中国土壤的复杂性以及特殊性,目前我国对于 SOM 的研究主要针对于水平地带性土壤、施肥措施以及土地利用等因素对土壤有机质组分的稳定性造成的影响^[11~16].而对于水稻土壤固碳的稳定性机制,特别是化学稳定机制的研究还相对较少.

我国南方稻田土壤由于特殊的生态环境和淹水状态,被普遍认为有机质含量较高、固碳趋势明显、固碳潜力较大,已成为一个最重要的汇被广泛关注^[17~19].笔者前期对于亚热带稻田土壤的研究已经表明,稻田土壤有机质含量明显高于其他土地利用方式^[20],且有机无机肥配合施用能够显著提高 SOM 含量^[21],周萍等^[6,22]应用核磁共振和热裂解气相质谱技术,表明了施肥措施对于南方稻田土壤颗粒有机质的影响.傅立叶变换红外光谱(FTIR)技术因其具有分析速度快、可在线分析、不破坏样品、无污染等特点,被大量应用于研究 SOM 的化学结构^[23],因此利用光谱手段,从分析土壤碳稳定性了解土壤碳循环过程与碳积累机制具有十分重要的意义,也是近期被关注的主要研究内容之一^[24].本研究基于典型稻田生态系统长期定位试验,采集稻田土壤表层和深层样品,分析长期不同施肥措施对于土壤有机质含量及其官能团结构的影响,探讨稻田土壤有机质积累的化学稳定机制,以期为研究稻田土壤固碳措施和固碳潜力提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自位于湖南省新化县的国家级稻田肥力长期定位监测点(111°42'E, 27°56'N),试验始于 1986 年.该定位监测点属于中亚热带季风气候,年平均气温 16.8℃,年均降水量 1 453.5 mm,土壤类型为河泥沙,母质为河流冲积物,2000 年后轮作制度为稻-稻-休闲,小区面积 66.7 m².采样前土壤基本理化性状如下:有机碳 11.33 g·kg⁻¹,全氮 0.92 g·kg⁻¹,pH 值 5.20,黏粒含量 12.99%.试验设有 6 个处理:无肥(对照,CK),即不施用任何化肥;施化肥(NPK),即按测土配方施肥,只施化肥;习惯施肥(CUT),即按当地习惯性化肥施肥量确定肥料施用

量;秸秆还田(STW),即以 NPK 处理施氮量为标准施用水稻秸秆,不足时补充化肥氮;低量有机肥(LOM),即有机氮占施全氮总量的 30%,其余 70%以化肥补充;高量有机肥(HOM),即有机氮占施全氮总量的 60%,其余 40%以化肥补充.其中 NPK 处理化肥 N 为 315 kg·(hm²·a)⁻¹、P₂O₅ 为 24 kg·(hm²·a)⁻¹、K₂O 为 178 kg·(hm²·a)⁻¹,有机肥为猪粪.

1.2 样品采集

于 2011 年 1 月用土壤柱状采样器(Eijkelpamp, 荷兰)采集 1 m 深的土柱,土壤柱状圆筒采样器圆筒内径为 9 cm.每个小区随机采集 4~5 个土柱样品,用切割机将其分为 13 层,0~30 cm 每隔 5 cm 分为一层,30~100 cm 每隔 10 cm 分为一层.分层后去除可见动植物残体与石砾,自然风干,过 0.15 mm 筛后备用.分别取表层土壤(5~10 cm)和深层土壤(70~80 cm)两个层次的土样供本实验分析.

1.3 分析方法

红外光谱分析:采用傅立叶变换红外光谱仪(IRPrestige-21/FTIR-8400S,日本岛津)进行.具体方法如下:制作压片前将土样放置在 60℃干燥箱内 8 h,以避免多余水分中的羟基对红外光谱图造成的干扰^[25].将溴化钾晶体(光谱纯)在玛瑙研钵里研磨至粉末状(粒度 < 2 μm),用 L104-IC 电子天平(精度:1/10 000)称取样品 1.5 mg,溴化钾粉末 150 mg,以样品:KBr = 1:100 的比例在玛瑙研钵中充分混匀后放入压片上抹平,用 75 kPa 的压力压 5 min,用傅立叶变换红外光谱仪扫描测定,记录其光谱图,光谱测量范围为 4 000~400 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 10.

有机碳含量:采用碳氮元素分析仪(Vario MAX CN,Elementar Co.,Germany)测定.

红外光谱测定结果采用 Origin 7.5 绘图.

2 结果与讨论

2.1 不同施肥处理下稻田土壤有机碳含量的差异

长期不同施肥处理下表层土壤有机碳含量存在差异(表 1),以 HOM、LOM 和 STW 处理较高,分别为 19.79、18.86 和 19.77 g·kg⁻¹,与 CK、NPK 和 CUT 处理的差异较显著;相较 CK 的有机碳含量,HOM、LOM 和 STW 处理分别增加了 18.5%、12.9% 和 18.4%.各表层土壤有机碳含量皆显著高于深层土壤,且不同施肥对深层土壤的有机碳含量影响不显著.前期有关湖南省几个

稻田生态系统长期定位监测的研究表明,施用低量与高量有机肥能够显著提高稻田土壤的固碳效应,且土壤有机碳随有机肥用量的增加而增加^[21].

由此可见,有机-无机肥配施下稻田土壤有机碳的明显增加对于提高稻田土壤的固碳效应具有非常重要的作用.

表 1 不同施肥措施下 SOC 含量¹⁾/g·kg⁻¹

Table 1 Effects of fertilization on SOC/g·kg⁻¹

位置	CK	NPK	CUT	STW	LOM	HOM
表层土壤	16.70 ^c	17.61 ^{bc}	17.92 ^{bc}	19.77 ^a	18.86 ^{ab}	19.79 ^a
深层土壤	1.86 ^a	2.54 ^a	2.24 ^a	2.05 ^a	1.87 ^a	2.78 ^a

1) 表内同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 谱带的归属

不同施肥措施下土壤红外光谱特征峰相似,主要在 3 696、3 620、3 440、2 962、2 927、2 857、1 630、1 080、1 035、1 008、913、797、778、695、540 和 470 cm⁻¹处(图 1),说明稻田土壤经过长期不同施肥措施后其碳骨架结构基本一致.根据红外光谱吸收峰归属^[26~28],3 696~3 440 cm⁻¹是羟基伸缩振动的吸收峰,这部分羟基一部分为有机物中的碳水化合物,另一部分为样品中含有的水分中的羟基.其中,3 620 cm⁻¹对应的变形振动的频率为 913 cm⁻¹,3 440 cm⁻¹对应的羟基变形振动为 1 630 cm⁻¹.2 962 cm⁻¹处的吸收峰是烷烃中甲基(—CH₃)的 C—H 键反对称伸缩振动.2 927 cm⁻¹和 2 857 cm⁻¹处的吸收肩峰是烷烃中亚甲基(—CH₂)的 C—H 键对称伸缩振动.1 080 cm⁻¹处吸收峰是有机硅化物中 Si—O 伸缩振动.1 035 cm⁻¹处吸收峰是有机硅化物 Si—O—Al 伸缩振动,其对应的变形振动频率为 540 cm⁻¹.1 008 cm⁻¹处吸收峰是有机硅化物 Si—O—Si 伸缩振动,其对应的变形振动频率为 470 cm⁻¹,另外,797 cm⁻¹、778 cm⁻¹处的吸收双峰是 Si—O 键垂直于光轴和平行于光轴的伸缩振动.695 cm⁻¹处吸收峰是烯烃中=C—H 键变形振动(顺式).

以 1 630 cm⁻¹为中心的吸带同时也是水分子形成氢键的变形振动、有机羧酸盐 COO⁻反对称伸缩振动、木质素中与芳环相连的 C=O 伸缩振动、氨基酸中的 N—H 的伸缩振动.1 100~970 cm⁻¹也是碳水化合物中 C—O 键伸缩振动.由上述可见,土壤有机质的化合物组分主要是醇和酚等脂肪族化合物、芳香族化合物、碳水化合物以及有机硅化合物等.

2.3 不同施肥措施下表层土壤有机质化学结构的差异

根据朗伯-比尔定律,当吸收层厚度一定时,吸光物质的浓度与吸光度成正比,因此,可以通过红外吸收峰形状、吸收强度分析土壤有机质官能团的结

构差异^[29].不同施肥措施下稻田表层土壤红外光谱特征峰的吸收强度存在不同程度的差异(图 1),说明施肥措施对土壤有机质的结构单元和官能团数量有较明显的影响.与 CK 相比,其他施肥措施下各吸收峰强度都有不同程度的增加,整体而言,有机质所有官能团含量的变化趋势是 HOM > STW > LOM > CUT > NPK > CK.可知施肥都能够增加稻田土壤的脂肪族、芳香族和有机硅化合物的含量.

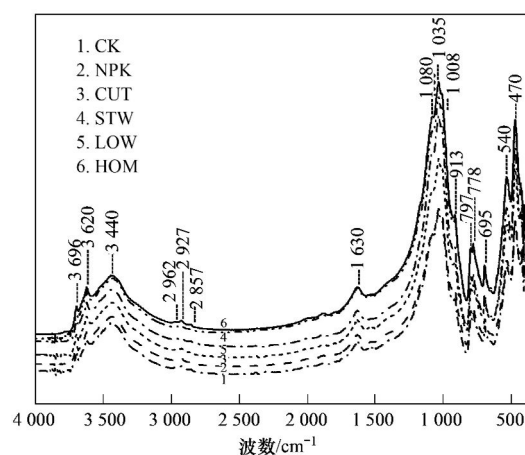


图 1 不同施肥措施下表层土壤红外光谱

Fig. 1 FTIR spectra of topsoil from different fertilizations

具体而言,HOM 和 STW 处理中 3 440 cm⁻¹和 1 630 cm⁻¹吸收带强度的增加较显著(表 2),其中 3 440 cm⁻¹处吸收带的吸光度分别为 0.44 和 0.43,比 CK 的吸光度分别增加了 51% 和 48%,比 NPK 增加了 41% 和 38%,说明 HOM 和 STW 处理下土壤中醇类和酚类等脂肪族化合物的含量明显增加,且增加的幅度几乎一致;1 630 cm⁻¹处吸收带 2 种处理的吸光度均为 0.40,表明这 2 种施肥下土壤有机质的芳化度较高且相似,有机质的稳定性也较强,这可能与所投入有机肥料(腐熟猪粪、秸秆)自身较高的化学稳定性组分有关.此外,HOM 还明显增加了脂肪族烷烃碳的含量,其特征峰吸光度为 0.30,约是 CK 处理的 2 倍,是 NPK 的 1.6 倍.随着有机肥料的增加,有机态硅化合物的吸收峰变得越来越尖,

HOM、STW 和 LOM 这 3 种施肥的吸光度分别为 0.54、0.53 和 0.44, 可知有机-无机肥配施能够有效地增加土壤中有机硅化合物的含量. 土壤中有机态硅是水稻生长的重要元素^[30], 存在形式大多为类酯态的硅酸衍生物($R_1-O-Si-R_2$)或以 Si—C 键链接形成的有机硅化合物^[31]. 由于有机质本身可以释放出一定量的硅, 因此有机质含量较多的土壤, 有效硅含量也较高^[32]. 在本研究中, 随着施入有机肥量的不同以及有机肥来源不同, 可清晰地看出 1 035 cm^{-1} 处吸收带强度的差异, 从而印证了有机质与有机态硅含量的正相关关系. 1 035 cm^{-1} 处吸收峰强度的显著增强, 说明施肥措施不仅能增加土壤中有机态硅, 还能够提高多糖类及碳水化合物在 SOM 中所占的比例. 碳水化合物属于易分解的有机物质, 有机-无机肥配施下稻田土壤这部分物质比例的增加, 其原因可能是水稻增产所带来的根系分泌物以及根

系输入量的增加, 进而促进稻田生态系统碳素的积累^[33]. 695 cm^{-1} 处吸收峰强度的差异则表明了与 CK 相比, HOM 和 STW 有效地增加了土壤中烯烃的含量, 吸光度分别为 0.47 和 0.46, 土壤脂族性较高, LOM 和 NPK 的吸光度相对较低, 为 0.38 和 0.30, CUT 则与 CK 没有显著差异.

上述分析表明, 与单施化肥相比, 长期有机-无机肥配施能够增加稻田表层土壤中脂肪族、芳香族以及有机硅化合物的含量, 且不同处理的变化差异明显, 以 HOM 和 STW 的增幅最大, 而这二种处理下土壤有机碳也相对最高(表 1), 这说明脂肪族、芳香族及有机硅化合物的增加提高了稻田土壤有机质抵抗微生物分解的能力, 其稳定性明显增强, 从而揭示了稻田土壤固碳的化学稳定机制. 这与周萍等^[6,22]利用核磁共振和热裂解气相色谱对太湖地区稻田土壤固碳机制的研究结论相似.

表 2 不同施肥措施下土壤有机质吸光度

Table 2 Effects of fertilization on absorbance values of SOM

位置	处理	化学抗性物质				碳水化合物	有机态硅化物
		醇、酚类	芳香类	烷烃类	烯烃类		
表层土壤	CK	0.29	0.24	0.16	0.28	0.63	0.32
	NPK	0.31	0.26	0.18	0.30	0.69	0.34
	CUT	0.35	0.30	0.21	0.37	0.79	0.40
	STW	0.43	0.40	0.29	0.46	0.97	0.53
	LOM	0.39	0.33	0.25	0.38	0.92	0.44
	HOM	0.44	0.40	0.30	0.47	1.02	0.54
深层土壤	CK	0.28	0.23	0.15	0.26	0.62	0.30
	NPK	0.28	0.24	0.15	0.26	0.68	0.33
	CUT	0.25	0.20	0.16	0.25	0.68	0.29
	STW	0.32	0.25	0.18	0.28	0.66	0.33
	LOM	0.26	0.19	0.15	0.20	0.43	0.23
	HOM	0.35	0.27	0.21	0.29	0.77	0.35

2.4 表层土壤与深层土壤有机质结构的差异

各施肥措施下稻田表层与深层土壤有机质的红外光谱特征峰相似(图 2), 但是表层土壤有机质官能团的吸收强度均高于深层土壤, 反映出表层土壤有机质官能团的丰富度相对较高, 主要是表层土壤有机质的来源(作物根系分泌物、作物秸秆、有机肥等)丰富, 化学结构组成相对复杂所致. 这也从土壤结构机制性方面印证并解释了慈恩等^[34]的研究, 即稻田土壤剖面中, 表层的有机质含量最高.

HOM、LOM 和 STW 处理的表层土壤有机质各吸收峰强度均显著高于深层土壤, 以烷基碳为例, 相较深层土壤增加的比例分别是 42%、66% 以及 61%, NPK 和 CUT 则增加了 20% 和 31%, 可知有机-无机肥配施下, 土壤垂直分布的脂肪族、芳香碳

和有机硅化合物的含量差异较显著. 而 CK 处理表层土壤与深层土壤有机质官能团吸收峰强度差异不大, 主要是因为 CK 处理的有机质的垂直分布差异相对较小. 在所有特征峰中, 表层土壤与深层土壤差异最大的是 2 962、2 927 以及 2 857 cm^{-1} 处吸收峰, 以表层土壤的吸收峰强度相对较强, 这可能与表层土壤有机物质投入较多有关, 表层土壤随着有机物质的不断投入, 持续有甲基和亚甲基进入, 脂肪族的碳链结构明显增多. 随着土壤垂直深度的增加, 1 100~970 cm^{-1} 吸收带的强度逐渐减弱, 有可能预示了深层土壤的碳水化合物、多糖类及醇类物质含量低于表层土壤, 也有可能土壤黏粒对硅酸的吸附作用造成了有机态硅的降低有关. 总体而言, 施肥措施下, 稻田表层土壤的脂族性、芳香碳以及有机态硅含量高于深层土壤, 尤其以 HOM、LOM 和 STW

处理最为显著。

由于稻田土壤机理结构的复杂性,影响结构特征的因素较多,傅立叶红外技术又有其自身的局限

性,因此本研究对土壤原土的各组分仅进行了初步的结构表征,还需进一步采用核磁共振、热裂解气相色谱等技术进行深入的分析 and 比较。

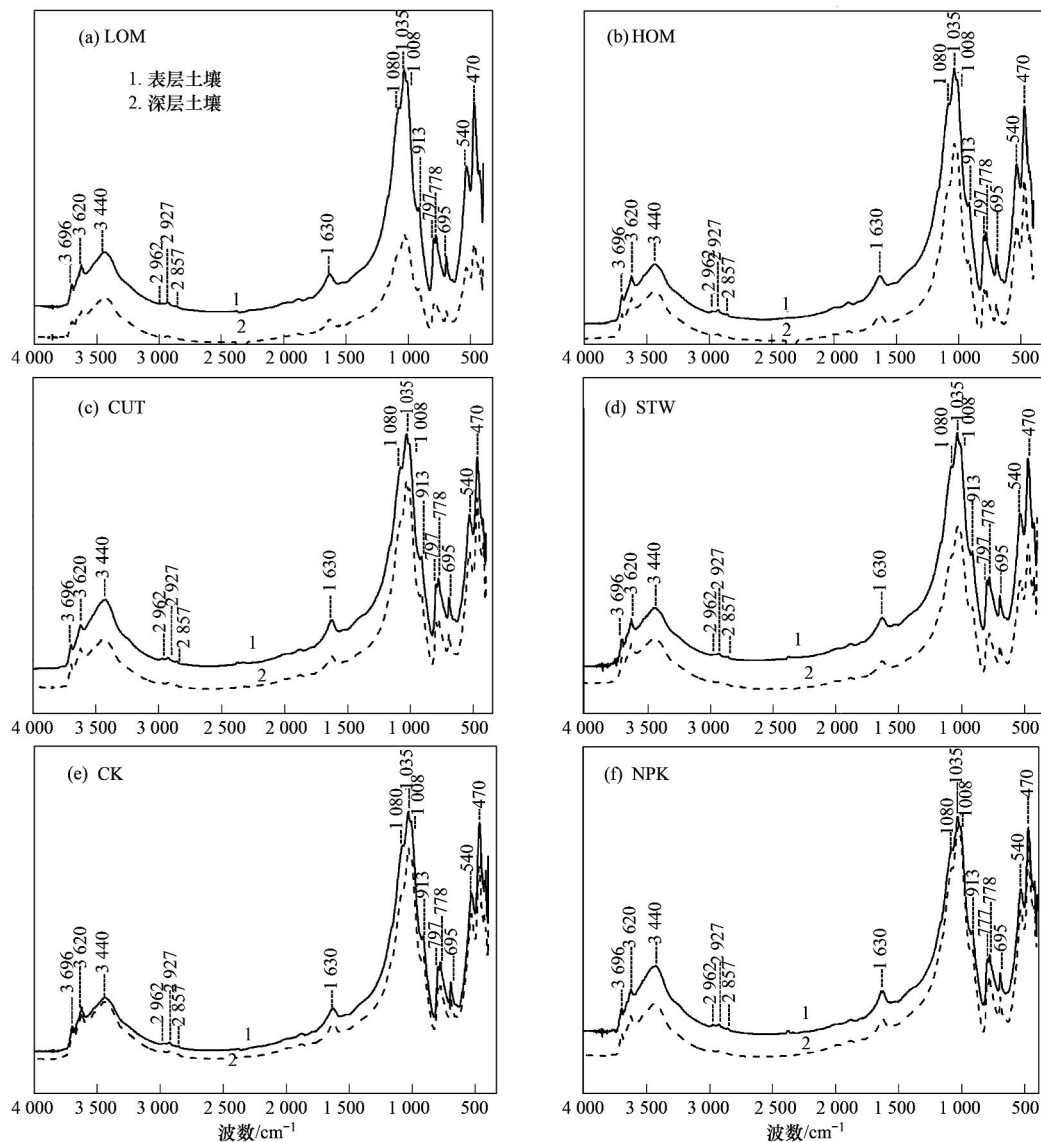


图2 施肥措施下表层土壤(5~10 cm)和深层土壤(70~80 cm)红外光谱

Fig. 2 FTIR spectra of topsoil and subsoil from different fertilizations

3 结论

(1)长期不同施肥措施下稻田表层土壤有机质具有基本一致的官能团结构,但各官能团的吸收强度差异较大. 秸秆还田以及有机-无机肥配施能够显著增加土壤中脂肪族、芳香族、碳水化合物和有机硅化合物的含量,贡献于其较高的有机质含量,从而增加土壤的化学稳定性。

(2)稻田土壤不同深度的有机质官能团结构基本一致,但表层土壤 SOM 的含量皆高于深层土壤,以有机-无机肥配施和秸秆还田的差异最为显著。

参考文献:

- [1] Murphy E M, Zachara J M. The role of sorbed humic substances on the distribution of organic and inorganic contaminants in groundwater[J]. *Geoderma*, 1995, **67**(1-2): 103-124.
- [2] Paustian K, Six J, Elliott E T, *et al.* Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 147-163.
- [3] Zech W, Senesi N, Guggenberger G, *et al.* Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics[J]. *Geoderma*, 1997, **79**(1-4): 117-161.
- [4] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls [J]. *Geoderma*, 1996, **74**(1-2): 65-105.

- [5] Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G, *et al.* Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by ^{13}C distribution and CPMAS-NMR spectra[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, **51**(4): 583-594.
- [6] 周萍, Piccolo A, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究Ⅲ. 两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化[J]. *土壤学报*, 2009, **46**(3): 398-405.
- [7] 张玉兰, 孙彩霞, 陈振华, 等. 红外光谱法测定肥料施用 26 年土壤的腐殖质组分特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(5): 1210-1213.
- [8] Chodak M, Ludwig B, Khanna P, *et al.* Use of near infrared spectroscopy to determine biological and chemical characteristics of organic layers under spruce and beech stands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, **165**(1): 27-33.
- [9] Stenberg B, Rossel R A V, Mouazen A M, *et al.* Chapter five - visible and near infrared spectroscopy in soil science [J]. *Advances in Agronomy*, 2010, **107**: 164-206.
- [10] Calderón F J, Reeves J B, Collins H P, *et al.* Chemical differences in soil organic matter fractions determined by diffuse-reflectance mid-infrared spectroscopy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, **75**(2): 569-579.
- [11] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 1987. 390-417.
- [12] 王玉, 张一平, 陈思根. 中国 6 种地带性土壤红外光谱特征研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, **31**(1): 57-61.
- [13] 张鸿龄, 梁成华, 杜立宇, 等. 长期定位施肥对保护地土壤腐殖质结合形态的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(5): 831-834.
- [14] 蔡燕飞, 章家恩, 张杨珠, 等. 稻作制度对红壤性水稻土有机质特征的影响[J]. *土壤*, 2006, **38**(4): 396-399.
- [15] 周萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(2): 256-261.
- [16] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(2): 412-418.
- [17] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [18] Song G H, Li L Q, Pan G X, *et al.* Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, **74**(1): 47-62.
- [19] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(4): 384-393.
- [20] 吴金水, 童成立, 刘守龙. 亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(1): 131-137.
- [21] 刘守龙, 童成立, 张文菊, 等. 湖南省稻田表层土壤固碳潜力模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2006, **21**(1): 118-125.
- [22] 周萍, 潘根兴, Piccolo A L, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究Ⅳ. 颗粒有机质热裂解-气相色谱法分子结构初步表征[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(1): 112-124.
- [23] 陈星旦. 近红外光谱无创生化检验的可能性[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(5): 759-763.
- [24] Hatcher P G, Dria K J, Kim S, *et al.* Modern analytical studies of humic substances[J]. *Soil Science*, 2001, **166**(11): 770-794.
- [25] Kaiser M, Ellerbrock R H. Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment[J]. *Geoderma*, 2005, **127**(3-4): 196-206.
- [26] 陆常青. 土壤黏粒的红外光谱[J]. *土壤*, 1986, **18**(2): 94-100.
- [27] Celi L, Schnitzer M, Negre M. Analysis of carboxyl groups in soil humic acids by a wet chemical method, Fourier-Transform Infrared Spectrophotometry, and solution-state carbon-13 nuclear magnetic resonance. A comparative study[J]. *Soil Science*, 1997, **162**(3): 189-197.
- [28] Mao J D, Olk D C, Fang X W, *et al.* Influence of animal manure application on the chemical structures of soil organic matter as investigated by advanced solid-state NMR and FT-IR spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2008, **146**(1-2): 353-362.
- [29] Ellerbrock R H, Höhn A, Gerke H H. Characterization of soil organic matter from a sandy soil in relation to management practice using FT-IR spectroscopy[J]. *Plant and Soil*, 1999, **213**(1-2): 55-61.
- [30] Osuna-Canizalez F J, De-Datta S K, Bonman J M. Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to blast disease of rice[J]. *Plant and Soil*, 1991, **135**(2): 223-231.
- [31] 刘鸣达, 张玉龙. 水稻土硅素肥力的研究现状与展望[J]. *土壤通报*, 2001, **32**(4): 187-192.
- [32] 徐文富. 作物的硅素营养和硅化物的应用[J]. *苏联科学与技术*, 1992, (5): 45-49.
- [33] 冯蕾, 童成立, 石辉, 等. 水稻碳氮吸收、分配与积累对施肥的响应[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 574-580.
- [34] 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 耕作年限对水稻土有机碳分布和腐殖质结构特征的影响[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(5): 950-956.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i>	(810)

《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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