ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 34 卷　第 6 期
2013 年 6 月 15 日

目　次

2008 ~2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O_3 生成潜势 …… 曹函玉,潘月鹏,王辉,谭吉华,王跃思(2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 …… 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,周敏,王红丽,周振,乔利平,黄成,李梅,李莉,王倩,黄海英,邹兰军(2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析 …… 张林静,张秀英,江洪,张清新(2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征 …… 刘鲁宁,申雨璇,辛金元,吉东生,王跃思(2089)
笼养肉鸡生长过程 NH_3、N_2O、CH_4 和 CO_2 的排放 …… 周忠凯,朱志平,董红敏,陈永杏,尚斌(2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化剂微波辅助催化氧化甲苯性能 … 王晓晖,卜龙利,刘海楠,张浩, 孙剑宇,杨力,蔡力栋(2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究 …… 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之(2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 …… 金圣,黄立维,李国平(2121)
模拟大气 CO_2 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 …… 赵旭辉,汤龙升,史小丽,杨州,孔繁翔(2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 …… 华祖林, 汪靓(2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 …… 李燕,李兆富,席庆(2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究 …… 吴喜军,李怀恩,李家科,李强坤,董雯(2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 …… 陈玲,刘德富,宋林旭,崔玉洁,张革(2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 …… 李鸿妹,石晓勇,陈鹏,张传松(2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 …… 张永生, 郑丙辉,王坤,姜霞,郑浩(2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 …… 冯伟莹,张生,焦立新,王圣瑞,李畅游,崔凤丽,付绪金,甄志磊,郑浩(2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 …… 侯金枝,魏权,高丽,孙卫明(2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 …… 李大鹏,王晶,黄勇(2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 …… 李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟(2198)
UV 和 H_2O_2 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 …… 张一清, 周玲玲, 张永吉(2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 …… 于丽,张培龙,侯甲才,庞立飞,李越,贾寿华(2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 …… 毛雯,孙荣国,王定勇,马明,张成(2218)
炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 …… 王斌楠,刘国强,孔德洋,陆隽鹤(2225)
金属离子对 δ-MnO_2去除对叔辛基酚抑制作用的研究 …… 李非里,牟华倩(2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 …… 刘建明, 李红红, 熊振湖(2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 …… 闫梦玥,庞志华,李小明,谌建宇,罗隽(2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 … 于红蕾,霍守亮,杨周生,席北斗,昝逢宇,张靖天(2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb^{2+}、Cd^{2+} 吸附性能研究 …… 吴宁梅,李正魁(2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色 …… 魏红,李克斌,李娟,陈经涛,张涛(2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 …… 张磊,刘平,马锦,张静,张明,吴根(2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水的研究 …… 郭庆稳,张敏,王炜,杨治中,吴东雷(2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 …… 李永峰,王艺璇,程国玲,刘春妍(2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 …… 陈志强,邓毅,黄龙,温沁雪,郭子瑞(2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 …… 刘文如,沈耀良,丁玲玲,丁敏(2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 …… 杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清(2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 …… 李志华,范长青,王晓昌(2314)
我国淡水水体中双酚 A(BPA)的生态风险评价 …… 汪浩,冯承莲,郭广慧,张瑞卿,刘跃丹,吴丰昌(2319)
麦穗鱼物种敏感性评价 …… 王晓南,刘征涛,闫振广,张聪,何丽,孟双双(2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 …… 雷炳莉,文育,王艺陪,康佳,刘倩(2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 …… 钱建平,张力, 李成超, 黄栋(2344)
直流电场处理后隆线溞趋光性对 Cr^{6+}和 Hg^{2+}的响应 …… 王飞祥,袁玲,黄建国(2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 …… 宋新章,卜涛,张水奎,江洪,王志坤,赵明水,刘永军(2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 …… 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聃聃(2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 …… 于皓,陈川, 张莉,王爱杰(2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析:基于 PLFA 和 MicroResp™ 方法 …… 陈晓娟,吴小红,刘守龙,袁红朝,李苗苗,朱捍华,葛体达,童成立,吴金水(2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 …… 韩建刚,曹雪(2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 …… 刘意章,肖唐付,宁增平,贾彦龙,黎华军,杨菲,姜涛,孙旻(2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 …… 陈志凡, 赵烨, 郭廷忠, 王水锋,田青(2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 …… 李晓燕(2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 …… 王登阁,崔兆杰,傅晓文,殷永泉,许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 …… 段雷,马萧萧,余德祥,谭炳全(2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 … 孙明明,滕应,骆永明,李振高,贾仲君,张满云(2428)
胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响 …… 杨榕,李博文,刘微(2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 …… 吴小莲,向垒,莫测辉,姜元能,严青云,李彦文,黄献培,苏青云,王纪阳(2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 …… 张旭,席北斗,赵越,魏自民,李洋,赵昕宇(2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 …… 王昭,李振山,冯亚斌,焦安英,薛安(2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟 …… 官贞珍,陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 …… 朱芬芬,高冈昌辉,大下和徹,姜惠民,北岛義典(2473)
富含中孔与酸性基团的生物质炭的制备与吸附性能 …… 李坤权,李烨,郑正,张雨轩(2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 …… 姜志翔,郑浩,李锋民,王震宇(2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究 …… 白桦,曾思育,董欣,陈吉宁(2493)
《环境科学》征订启事(2115)　《环境科学》征稿简则(2224)　信息(2217, 2289,2349,2398)　专辑征稿通知(2478)

不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析：基于 PLFA 和 MicroResp™ 方法

陈晓娟[1,2]，吴小红[1]，刘守龙[1]，袁红朝[1]，李苗苗[1]，朱捍华[1]，葛体达[1*]，童成立[1]，吴金水[1*]

(1. 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；2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：研究不同耕地利用方式对土壤微生物群落结构的影响，对维持土壤稳定和提高土壤质量具有重要意义. 以湖南省桃源县长期定位试验为平台，采用磷脂脂肪酸(PLFA)和 MicroResp™方法，研究了稻田、水旱轮作地和旱地这 3 种不同耕地利用方式下土壤微生物数量、群落结构特征及活性. PLFA 结果表明，细菌、真菌及总 PLFA 量均表现为稻田 > 水旱轮作地 > 旱地，细菌 PLFA/真菌 PLFA 比值则表现为水旱轮作 > 旱地 > 稻田. 革氏阳性菌(G^+)PLFA/革氏阴性菌(G^-)PLFA 为稻田显著高于水旱轮作地和旱地，但水旱轮作与旱地土壤的差异不显著. PLFA 主成分分析和特征磷脂脂肪酸的平均摩尔分数表明，稻田中真菌及 G^- 的相对含量显著高于水旱轮作地和旱地，而水旱轮作地中 G^+ 的相对含量高于旱地和稻田，3 种不同耕地利用方式下土壤微生物群落结构特征具有明显差异. 土壤 PLFA 与土壤养分相关性分析表明，土壤微生物量与土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、土壤微生物量碳(MBC)均达到极显著正相关. 与阳离子交换量(CEC)无显著相关性. MicroResp™结果表明，3 种不同耕地利用方式下土壤微生物对碳源平均利用效率为稻田最高，其次是水旱轮作地，旱地最低. 其结果也显示大部分碳源提高了微生物呼吸作用，但不同碳源的利用效率不相同. 因此，耕地利用方式的不同明显导致了土壤微生物活性和群落结构的差异.

关键词：耕地利用方式；微生物活性；微生物群落结构；磷脂脂肪酸；MicroResp™

中图分类号：X172 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2013)06-2375-08

Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp™

CHEN Xiao-juan[1,2], WU Xiao-hong[1], LIU Shou-long[1], YUAN Hong-zhao[1], LI Miao-miao[1], ZHU Han-hua[1], GE Ti-da[1], TONG Cheng-li[1], WU Jin-shui[1]

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil microbe plays an essential role in terrestrial ecosystem through its role in cycling mineral compounds and decomposing organic matter. The objective of this paper is to determine the influences of different land use patterns on soil microbial activity and community structure, which were analyzed by phospholipids fatty acid (PLFA) and MicroResp™ method, based on a long-term fertilization experiment in Taoyuan County, Hunan Province. There were three land use patterns included, i. e. paddy fields (PS), paddy-upland rotation (PU) and upland land (US) soils. The results showed that the amounts of bacteria PLFA, fungi PLFA and the total PLFA were generally following the order PS > PU > US. The ratio of bacteria PLFA/fungi PLFA followed the order PU > US > PS, however, the ratio of Gram-positive bacteria PLFA (G^+ PLFA) to Gram-negative bacteria PLFA (G^- PLFA) in PU was the highest, and there's no significant difference in PU and US. In addition, principal components analysis (PCA) and the average concentration ($mol \cdot mol^{-1}$) of biomarker-PLFAs also revealed that the relative content of fungi and G^- in PS was much higher than those of in PU and US ($P < 0.05$). However, the relative content of G^+ in PU was higher than those of other two land use patters. Therefore, Microbial community structure was influenced significantly by land use patterns in our study. Soil microbial biomass had significant relationships ($P < 0.05$) with SOC, TN and MBC, but had no significant correlation with CEC. Meanwhile, MicroResp™ analysis indicated that most of the carbon substrate addition enhanced the microbial respiration rates, although different substrate had different use efficiency. The average of carbon substrate use efficiency could be also ranked in the order: PS > PU > US. We conclude that microbial activity and community structure were influenced significantly by land use patterns in farmlands.

Key words: land use patterns; microbial activity; microbial community structure; PLFA; MicroResp™

收稿日期：2012-09-20；**修订日期**：2012-11-09

基金项目：国家自然科学基金项目(41271279)；湖南省自然科学基金项目(11JJ4030)；中国科学院青年创新促进会会员项目(2012-2015)；中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(ISACX-LYQY-QN-1103)

作者简介：陈晓娟(1988～)，女，硕士研究生，主要研究方向为土壤微生物生态，E-mail：sjtugtd@gmail.com

* 通讯联系人，E-mail：gtd@isa.ac.cn；jswu@isa.ac.cn

土壤微生物群落是土壤重要的活体成分,它的数量和活性是评价土壤健康或者土壤质量的重要指标[1]. 人类活动是影响土壤微生物的主要因素之一,其中耕地利用方式不同,土壤微生物生长环境,如水分、土壤的枯枝落叶和根系分泌物等不同,土壤微生物数量、组成及活性在某种程度上存在着较大差别,进而导致土壤微生物群落结构和功能发生改变[2]. 因此,研究不同耕地利用类型下土壤微生物活性及群落结构特性对维持土壤肥力、提高土壤质量、促进耕地可持续利用具有重要意义. 近年来,不同利用方式下土壤微生物研究很多,有研究表明割草和休闲处理两种利用类型土壤具有相似的微生物群落结构,并指出土地利用方式差异对细菌群落的影响效应大于施肥制度的影响[3]. 张娣等[4]的研究也显示,耕作下的土壤、退耕还草土壤、原生态土壤在3种不同土地利用方式下土壤微生物群落结构中优势菌群有差异. 刘明等[5]研究结果表明红壤地区不同利用方式能对土壤微生物生物量及群落结构产生影响.

随着土壤微生物研究越来越广泛、深入,有很多方法被引入到土壤微生物分析中,其中,PLFA 生物标记法对试验条件要求较低,方法灵敏[6],并能够快速、直接、有效地提供较为客观可靠的土壤微生物含量、组成及群落信息[7~9]等优点被广泛运用于土壤微生物分析中. 在微生物群落研究方面,MicroResp™与传统微生物平板培养法、Biolog 微平板法和多重底物诱导呼吸(Multi-SIR)相比较,具有明显的优势. MicroResp™即克服了微生物平板培养法只能测定可培养微生物、Biolog 微平板法依赖土壤悬浮液提取物和细胞后续生长状况、Multi-SIR 自动化程度低、操作繁琐等缺点,还保留了 Biolog 方法的快速、简便,Multi-SIR 方法利用全土等优势[10]. 钱美宇[11]研究认为 MicroResp™是研究土壤微生物群落水平生理特征的一种较为灵敏、快捷的测定方法. MicroResp™被认为是一种具有广阔应用前景的微生物活性及群落结构的分析方法,目前已经开始在不同类型生态系统中得到应用,鲁顺宝等[12]采用 MicroResp™方法研究了3种森林类型不同土壤含水量微生物群落对不同类型碳源的利用情况,Licona 等[13]在英国利用 MicroResp™研究了耕地和草地土壤微生物群落对铬元素的反应,都表明这种方法有较高的适用性和分辨率.

目前,研究不同土地利用方式下土壤理化性质的变化及施肥对微生物群落结构影响较多. 对同一施肥处理不同耕地利用方式下土壤微生物数量、活性及群落结构研究尚少. 因此,本研究选取相同地点布置的并且施肥模式一致的一组不同耕地利用方式的长期定位试验,采用 PLFA 和 MicroResp™技术对湖南地区稻田、水旱轮作地、旱地这3种利用类型土壤微生物活性及群落结构特性进行了综合分析,旨在明确不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性的差异,为该地区提高土壤生物肥力、合理可持续利用耕地资源提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验在湖南省桃源县盘塘镇境内(111°28′~111°35′E,29°10′~29°38′N)进行. 定位试验始于2000年. 该区位于中亚热带北缘的红壤丘陵区,属亚热带湿润季风气候,年均气温16.8℃,年均降雨量1 230 mm,成土母质为第四纪红土.

1.2 试验方案及样品采集

本研究以红壤丘陵区主要耕地利用类型,包括稻田、水旱轮作地和旱地土壤为研究对象,供试土壤的基本理化性质见表1. 大田试验3种耕地利用方式的施肥措施相同,N、P、K 用量分别为224(尿素)、52(钙镁磷肥)和174(KCl)kg·hm^{-2}[14]. 土壤样品于2011年10月作物收获后采集,每个处理分3个小区分别采样,小区面积为22.4 m^2,采用5点取样法取表层0~20 cm 土壤并混匀,将采集的新鲜土样分成3份. 一份风干磨碎过100目筛用于测定土壤有机碳和全氮. 第二份立即处理或保存于4℃冰箱中,测定前除去土样中可见植物残体(如根茎叶)及土壤动物(蚯蚓等),过筛(孔径2 mm),混匀,用于土壤生物量碳和 MicroResp™分析; 第三份土样经冷冻干燥后在-70℃保存,一周内完成 PLFA 测定.

1.3 样品分析

1.3.1 样品理化性质测定

pH 测定以水为浸提剂,水土比为2.5∶1,阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定[15]. 土壤总碳和全氮采用碳氮元素分析仪(VARIO MAX C/N, Germany)测定(干烧法). 土壤 MBC 含量采用熏蒸提取-碳自动分析法测定[16]. 称取4份新鲜土样,每一份土壤25.00 g(烘干基),其中2份直接用0.5 mol·L^{-1} K_2SO_4,振荡(3 000 r·min^{-1})30 min 提取. 另2份在真空干燥器内用氯仿熏蒸(24 h),熏蒸的土样除去氯仿后立即提取. 取10.00 mL 提取液与

10.00 mL 2% 六偏磷酸钠混合后以碳自动分析仪(Phoenix 8000)测定提取的有机碳. 以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机碳的差值乘以转换系数 K_C (2.22)计算土壤 MBC 含量.

表 1　3 种不同耕地利用方式下土壤的基本性质[1)]

Table 1　Basic soil properties under three different land use patterns in farmland soils

土壤类型	土地利用方式	pH	土壤有机碳 SOC /g·kg^{-1}	全氮 TN /g·kg^{-1}	碳氮比 C:N	微生物量碳 MBC /mg·kg^{-1}	阳离子交换量 CEC /cmol·kg^{-1}
旱地(US)	红薯-玉米 (10a)	5.21b	5.63c	0.76c	7.41b	178.1b	11.54b
水旱轮作地(PU)	水稻-油菜轮作 (10a)	5.62a	6.34b	1.02b	6.22c	182.1b	8.76c
稻田(PS)	双季稻 (>10a)	5.14b	17.9a	1.74a	10.3a	878.9a	12.24a

1)不同小写字母(a、b、c)表示差异显著($P<0.05$)

1.3.2　PLFA 测定

采用修正的 Bligh-Dyer 方法提取脂类[17],进行土壤微生物群落结构分析. 具体步骤:首先,从 -70℃的冰箱中取出经冷冻干燥的土样,称取 3.00 g 土样于 Teflon 试管中,用氯仿-甲醇-柠檬酸缓冲液(体积比为 1∶2∶0.8)振荡提取脂类,通过硅酸柱层析法分离得到磷脂脂肪酸,分离得到的磷脂脂肪酸经碱性甲酯化后用气相色谱(N6890, Agilent, USA)分析各种脂肪酸含量,用其中脂肪酸甲酯所占的摩尔分数表示.

脂肪酸常用的命名格式为 X:YwZ(c/t),其中,X 是总碳数,后面跟一个冒号; Y 表示双键数; w 表示甲基末端; Z 是距离甲基端的距离; c 表示顺式,t 表示反式; a 和 i 分别表示支链的反异构和异构; 10Me 表示一个甲基团在距分子末端第 10 个碳原子上; 环丙烷脂肪酸用 cy 表示[18].

可以通过 PLFA 谱图中不同磷脂脂肪酸的种类和含量来分析微生物的种类和生物量. 不同微生物相对应的磷脂脂肪酸标记见表 2.

1.3.3　MicroResp™

表 2　表征土壤微生物的 PLFA

Table 2　PLFA characterizing microbes

名称	定义	文献
细菌	15:0, 17:0, i15:0, i16:0, i17:0, a15:0, a17:0, 16:1w7, 18:1w7, cy17:0, cy19:0,	[19,20]
真菌	18:2w6,18:1w9	[19,22]
革氏阴性菌 G$^-$	16:1w5c, 16:1w7c, 16:1w9c, 17:1w8c, 18:1w5c, 18:1w7c, 19:1w11c, cy17:0, cy19:0	[19,21]
革氏阳性菌 G$^+$	i14:0, i15:0, i16:0, i17:0, a15:0, a17:0,	[19,21]

将甲酚红(12.5 mg·L^{-1})、氯化钾(150 mmol·L^{-1})和碳酸氢钠(2.5 mmol·L^{-1})混合制成的指示剂 100 mL 溶解在 150 mL 的 Noble 琼脂(3%)中,然后添加到检测板的微孔中,配制好的检测微孔板存放在含有碱石灰的干燥器里待用.

将待测样品均匀添加到每个深孔板中,并在每个深孔板中分别添加不同碳源,碳源底物种类和浓度如表 3 所示,将配制好的检测微孔板倒扣在深孔板上,用夹子固定,在培养箱(25℃)下培养 6 h. 由于土壤微生物对不同碳源的诱导呼吸作用不同,释放出的 CO_2 浓度也不同,指示剂吸收土壤释放的 CO_2 后 pH 值改变,从而引起指示剂吸光值发生变化,在微生物读板器(E10661,USA)570 nm 波长下分别测定培养前及培养 6 h 后的指示剂的吸光值,计算 CO_2 产生率(%).

CO_2 浓度和指示剂颜色变化标准曲线根据下述公式计算[11]:

$$CO_2(\%) = A + B/(1 + D \times Ai_t)$$

式中,$A = -0.2265$, $B = -1.606$, $D = -6.771$.

采用下述公式将数据规范化:

$$Ai_6 = (At_6/At_0) \times \mathrm{Mean}(At_0)$$

$$Ai_0 = (At_0/At_0) \times \mathrm{Mean}(At_0)$$

式中,At_6 为样品添加碳源并培养 6 h 后检测板的吸光值; At_0 为样品未添加碳源培养时检测板的吸光值.

CO_2 产生率[μg·(g·h)$^{-1}$]根据下式计算:

$$CO_2\text{ 产生率} = [CO_2(\%)/100] \times L \times (44/22.4) \times (12/44) \times [273/(273+T)]/(W \times U)/t$$

式中,T 为培养温度(25℃),L 为检测板孔体积(945 μL),W 为土壤鲜重,U 为土壤含水率,t 为培养时间(6 h).

1.4　数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0统计软件处理和分析;多重比较采用Duncan

表 3 MicroResp™深孔板中所使用的碳源种类和浓度

Table 3 Concentrations of different carbon sources added into the deep-well of MicroResp™

碳源	ω/mg·g^{-1}	碳源	ω/mg·g^{-1}	碳源	ω/mg·g^{-1}	碳源	ω/mg·g^{-1}
丙氨酸	30	草酸	30	柠檬酸	30	赖氨酸	30
半乳糖	30	精氨酸	30	酮戊二酸	30	果糖	30
树胶醛糖	30	丁胺酸	30	海藻糖	30	苹果酸	30
葡糖糖	30	原儿茶酸	7.5	半胱氨酸	7.5	水	0

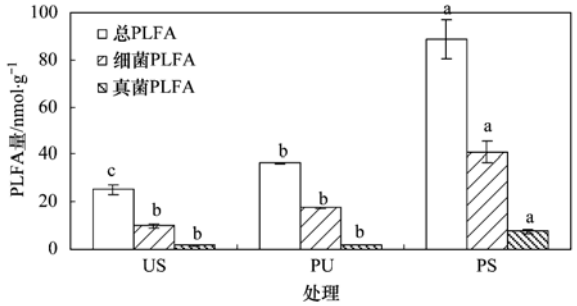
法计算检验差异显著性 (3 次重复). 不同处理差异显著性用 One-way ANOVA(单因素方差分析)检验,由 Canoco 4.5 做磷脂脂肪酸主成分分析.

2 结果与分析

2.1 土壤各菌群 PLFA 质量摩尔浓度变化

3 种不同耕地利用方式下土壤的总 PLFA 量之间存在显著差异,稻田总 PLFA 含量显著高于水旱轮作地和旱地(图 1). 稻田总 PLFA 量达到 81.57 nmol·g^{-1},分别是水旱轮作地(36.45 nmol·g^{-1})和旱地(25.22 nmol·g^{-1})的 2.3 倍和 3.2 倍. 说明长期不同耕地利用方式下对土壤微生物量有显著影响.

细菌与真菌 PLFA 与总 PLFA 量变化趋势相似(图 1),最高值均出现在稻田中,水旱轮作地次之,旱地最低. 稻田细菌与真菌 PLFA 含量显著高于水旱轮作地和旱地,而水旱轮作地和旱地中细菌与真菌 PLFA 含量差异均不显著. 说明 3 种不同耕地利用方式土壤中稻田土壤微生物数量最高.



US 代表旱地,PU 代表水旱轮作地,PS 代表稻田;
小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),下同

图 1 3 种不同耕地利用方式对 PLFA 含量的影响

Fig. 1 PLFA contents under three different farmland use patterns

2.2 土壤微生物群落分析

2.2.1 土壤微生物群落变化

如表 4 中 3 种不同耕地利用方式下土壤特征磷脂脂肪酸的平均摩尔分数表明,3 种不同利用方式土壤微生物群落结构组成有显著差异. 稻田土壤中真菌、G^-均高于其他两种利用类型土壤. 水旱轮作地土壤中 G^+高于其他两种利用类型土壤. 说明稻田中真菌及 G^-的相对含量高于水旱轮作地和旱地,而水旱轮作地中 G^+相对含量高于旱地和稻田.

细菌与真菌的 PLFA 平均摩尔分数值在 3 种不同耕地利用方式之间均存在显著差异(表 4),细菌 PLFA 与真菌 PLFA 的最高比值(9.06)出现在水旱轮作地土壤中,分别是旱地(6.09)和稻田土壤(5.45)的 1.49 倍和 1.66 倍,说明不同耕地利用方式显著影响土壤的细菌和真菌比例结构,导致微生物群落结构存在明显差异.

不同耕地利用方式下 G^- PLFA/G^+ PLFA 比值存在差异,稻田 G^-与 G^+的 PLFA 比值显著高于水旱轮作地和旱地,水旱轮作地与旱地之间比值较接近,无显著差异. G^- PLFA/G^+ PLFA 与总 PLFA 量变化总体趋势相似.

表 4 3 种不同耕地利用方式土壤中特征磷脂脂肪酸的平均摩尔分数/mol·mol^{-1}

Table 4 Average concentration of biomarker-PLFAs under three different farmland patterns in farmland soils/mol·mol^{-1}

特征脂肪酸	旱地(US)	水旱轮作地(PU)	稻田(PS)
细菌 PLFA	39.06b	48.03a	46.2a
真菌 PLFA	6.41b	5.30c	8.48a
革氏阴性菌	24.29c	28.69b	39.21a
革氏阳性菌	21.56b	25.88a	15.90c
细菌 PLFA/真菌 PLFA	6.09b	9.06a	5.45c
G^- PLFA/G^+ PLFA	1.13b	0.99b	2.92a

2.2.2 总 PLFA 值主成分分析

利用 PCA 分析 3 种不同耕地利用方式下土壤微生物群落结构差异,如图 2 所示,3 种不同利用方式土壤的 3 个重复分别聚集在二维排序图的不同位置. 说明处理间的重复较好,且不同耕地利用方式土壤微生物种群差异显著.

2.3 各菌群 PLFA 与土壤性质相关性分析

各菌群 PLFA 与土壤养分的相关性分析结果表明(表 5),3 种不同利用方式土壤总 PLFA 量、细菌、真菌、G^+、G^-和 G^+/G^-的 PLFA 与土壤有机碳、全氮均呈极显著正相关; 除 G^+ PLFA 以外,总 PLA 量、细菌、真菌, G^-和 G^+/G^-的 PLFA 均与 C:N极显著正相关,土壤总 PLFA 量、细菌、真菌、

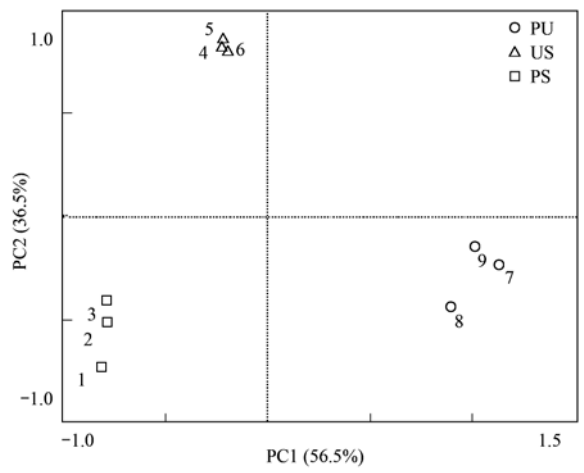


图 2　3 种不同耕地利用方式磷脂脂肪酸结构主成分分析

Fig. 2　Principal component analysis of PLFAs structures in farmland soil of three different land use patterns

G^+、G^-、G^+/G^-和真菌/细菌的 PLFA 与 MBC 均显著相关，除 G^+和真菌/细菌外均达到极显著程度，说明可用 PLFA 来表征土壤有机碳、氮含量及微生物量碳水平，同时土壤碳、氮含量也是影响土壤微生物数量和种类的最重要养分因素. 相关分析结果还显示，各菌群 PLFA 与 CEC 间无显著相关性.

2.4　MicroResp™分析

MicroResp™测定结果显示，稻田、水旱轮作地和旱地这 3 种不同耕地利用方式土壤微生物基础呼吸 CO_2 产生率平均值分别为 1.3、0.77 和 0.33 $\mu g \cdot h^{-1}$. 稻田土壤微生物的基础呼吸 CO_2 产生率分别为水旱轮作地和旱地的 1.7 倍和 4.2 倍；添加 15 种不同碳源后，稻田、水旱轮作地和旱地 3 种耕地利用方式下土壤微生物诱导呼吸 CO_2 产生率平均值分别为 1.96、1.45 和 0.97 $\mu g \cdot h^{-1}$. 仍然是稻田最高，水旱轮作地次之，旱地最低. 说明稻田土壤中微生物量最大，呼吸作用最强，与 PLFA 法结论相一致.

表 5　PLFA 与土壤理化性质相关分析[1)]

Table 5　Correlation between soil PLFAs and soil physiochemical properties

	土壤有机碳 SOC	全氮 TN	碳氮比 C∶N	微生物量碳 MBC	阳离子交换量 CEC
总 PLFA	0.962**(0.000)	0.964**(0.000)	0.870**(0.002)	0.956**(0.000)	0.474(0.197)
细菌 PLFA	0.947**(0.000)	0.964**(0.000)	0.834**(0.005)	0.938**(0.000)	0.474(0.197)
真菌 PLFA	0.976**(0.000)	0.955**(0.000)	0.922**(0.000)	0.975**(0.000)	0.482(0.188)
革兰氏阳性菌	0.815**(0.007)	0.872**(0.002)	0.649(0.059)	0.797*(0.010)	0.474(0.197)
革兰氏阴性菌	0.972**(0.000)	0.969**(0.000)	0.888**(0.001)	0.967**(0.000)	0.474(0.197)
G^- PLFA/G^+ PLFA	0.960**(0.000)	0.927**(0.000)	0.925**(0.000)	0.961**(0.000)	0.741*(0.022)
真菌 PLFA/细菌 PLFA	0.654(0.056)	0.492(0.179)	0.855**(0.003)	0.686*(0.041)	-0.949**(0.000)

1) * * 代表差异达到极显著水平，$P<0.01$；* 代表差异达到显著水平，$P<0.05$

在稻田和水旱轮作地中，添加原儿茶酸和果糖这两种碳源后其土壤微生物诱导呼吸低于基础呼吸，在旱地中，添加碳源精氨酸后其土壤微生物诱导呼吸低于其基础呼吸，除此之外，添加其他碳源后土壤微生物的诱导呼吸均高于基础呼吸(图 3). 说明大部分碳源提高了微生物呼吸作用，使微生物活性加强.

分别向 3 种不同利用方式耕地土壤中添加苹果酸、柠檬酸和酮戊二酸这 3 种碳源，旱地 CO_2 产生率最高，稻田次之，水旱轮作地最低，添加碳源丁胺酸和赖氨酸，CO_2 产生率由高到低依次为水旱轮作地、稻田、旱地. 此外，添加其他 9 种碳源，稻田的 CO_2 产生率均显著高于水旱轮作地和旱地. 由于 3 种不同利用类型土壤中微生物对不同碳源的利用效率不完全相同，证明不同耕地利用方式土壤的同种微生物数量、种类及活性有差别.

3　讨论

3.1　PLFA 分析

3.1.1　不同耕地利用方式对土壤微生物各群落 PLFA 含量的影响

土壤微生物易受土壤营养状况、pH 值、质地、温度、水分和通气性等条件的影响，人类对土壤的利用方式和管理措施也会使土壤微生物发生变化[23]. 本试验总 PLFA、细菌 PLFA 和真菌 PLFA 为稻田最高；水旱轮作地居中；旱地最低，主要原因可能是供试土壤的水分及养分状况均为水稻土最高；水旱轮作居中；旱地最低. 由于土地利用方式变化导致了物质循环过程特性的明显差异，改变了土壤中有机物质的输入量，明显影响了土壤质量[24]. 稻田利用方式下，由于长期保持较高的施肥和管理水平，土壤有机碳的矿化速率较快，土壤微生

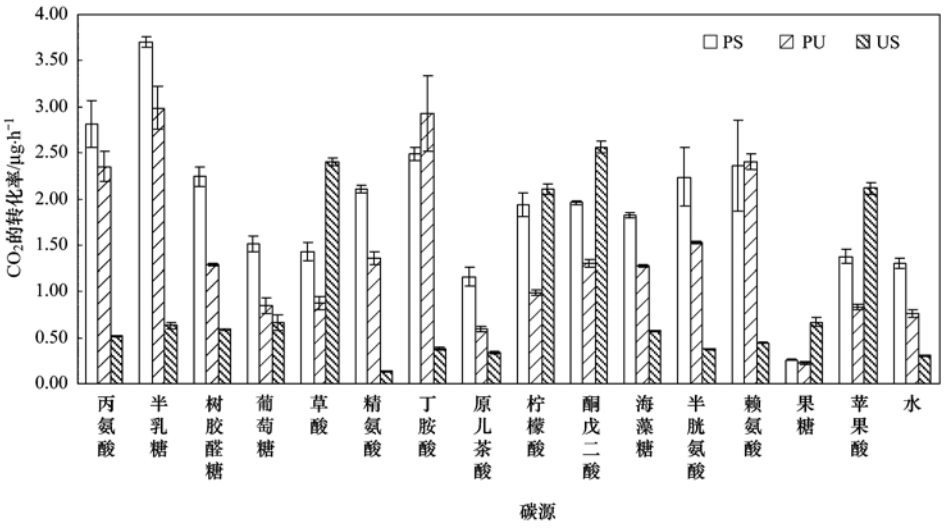


图 3 3 种不同利用方式耕地土壤添加 15 种碳源培养 6 h 后的诱导呼吸 CO_2 产生率和空白基础呼吸 CO_2 产生率

Fig. 3 Respirometric evolution of carbon dioxide after 6 h incubation with addition of 15 different C sources and 0 blank for farmland soils from three different farmland use patterns

物生物量和代谢活性高,微生物群落功能多样性丰富,代谢熵较低而微生物对碳源的利用效率较高[25],同时,水分条件对土壤微生物也有显著影响,稻田淹水能增加土壤微生物对底物的利用能力,加快土壤碳素周转速度,促进微生物生长[26],使得稻田总 PLFA、细菌 PLFA 和真菌 PLFA 明显高于水旱轮作地和旱地. 由此可见,土壤微生物生长有赖于土壤的肥力水平和环境状况,而土壤微生物数量和活性的大小又可以作为表征土壤肥力状况的重要生物学指标.

3.1.2 不同耕地利用方式下土壤微生物群落的变化

本研究表明细菌 PLFA/真菌 PLFA 在 3 种不同耕地利用方式之间均存在显著差异,其比值最高为水旱轮作地,其次为旱地,稻田最低,这可能因为本试验水旱轮作改善了土壤的通气性,有利于氨化细菌、自生固氮菌、硝化细菌、好气性纤维素分解菌、磷细菌等数量的增加[27],所以水旱轮作地细菌 PLFA/真菌 PLFA 显著高于旱地和稻田. 另外,稻田细菌 PLFA/真菌 PLFA 最低可能是由于水分含量也影响着细菌的生长,由于旱地较水旱轮作地水分少,也部分抑制了上述细菌的生长,加上本样品采集时间为水稻收割之后,稻田处于淹育晒干,真菌特征脂肪酸(18:2w6,8c)含量显著上升[28],细菌 PLFA/真菌 PLFA 降低. 相关研究还表明,土壤细菌与真菌 PLFA 比值越低,土壤生态系统越稳定[29,30].

3.1.3 各菌群 PLFA 与土壤养分相关性分析

土壤微生物群落组成复杂,熏蒸法可测定土壤微生物量碳,而磷脂脂肪酸法是利用不同菌源脂肪酸来代表的特定菌群生物量,二者之间存在微生物学意义上的差异,因此在说明土壤微生物量时,两种方法相结合进行比较会更全面[4]. 本研究采用了氯仿熏蒸法测定的微生物量碳与 3 种不同利用方式土壤总 PLFA 量、细菌、真菌、G^+、G^- 和 G^+/G^- 的 PLFA 均正相关,除了 G^- ($r = 0.797^*$) 达到显著相关外,其它均达到极显著相关,说明氯仿熏蒸法和 PLFA 分析方法之间有很好的一致性,可用微生物量碳含量估量该地区细菌、真菌及整体土壤微生物量,这与毕明丽等[3]的研究结论相符. 本研究稻田的养分水平显著高于其他两种利用方式土壤,因而稻田土壤中微生物数量最高. 导致不同耕地利用方式之间土壤养分含量差异的原因在于系统物质输入和输出量的相对大小[31]. 这可能与土壤利用方式、管理方式、施肥及大量的秸秆还田等有关. 因为秸秆还田不仅增加了土壤氮素的输入量,还能减少化肥氮的损失. 因此,较高的碳、氮投入量是导致双季稻土壤碳、氮和微生物生物量 碳、氮等养分高于其它 2 种利用方式土壤的主要原因.

养分相关性分析表明,3 种不同利用方式土壤总 PLFA 量、细菌、真菌、G^+、G^- 和 G^+/G^- 的 PLFA 量与土壤有机碳、全氮达到极显著正相关,除 G^+ PLFA 达到极显著正相关外,其他均与 C:N 极显著正相关. 可见土壤总 PLFA 量或真菌 PLFA 或细菌 PLFA 可以用来表征土壤碳、氮及微生物量碳水平. 因此,由本研究结果可知土壤微生物与土壤碳、

氮之间有较好的相关性，并能互相作为表征指标.

3.2 MicroResp™测定结果分析

不同耕地利用方式下土壤微生物群落结构会发生明显变化. 平均 CO_2 产生率可作为微生物整体活性的有效指标，也可反映微生物群落对碳源利用的能力. 研究结果为添加 15 种碳源后，由于不同利用方式中土壤微生物数量和种类都有差异，各种碳源利用率不同. 所以，3 种不同利用方式土壤平均 CO_2 产生率有明显差异.

本研究显示，稻田和水旱轮作地对原儿茶酸和果糖两种碳源以及旱地对精氨酸的利用率均较低. 有研究认为酚酸物质能抑制微生物产生，并且减少微生物对其生长介质的消耗[31,32]. 原儿茶酸属于酚酸，添加碳源原儿茶酸后，稻田和水旱轮作地中微生物的呼吸作用均在一定程度上被抑制. 高浓度碳源也可能对微生物生长产生抑制作用[33]，果糖是单糖，分子较小，但渗透压却很高，当糖浓度过高时，能较快地穿透细胞组织，有可能抑制土壤微生物生长. 有研究显示，微生物利用精氨酸这种碳源时需要脱氨基酶，旱地对精氨酸利用率较低可能与旱地中脱氨基酶较少有关. Campbell 等[10]研究诱导呼吸中土壤对碳源精氨酸的利用率也得到了相同的结果.

植物根系分泌物也可以影响根际微生物的数量和活性. 根系分泌物含有较高浓度的糖类、氨基酸和维生素等[34]物质，为根际微生物的生存和繁殖提供所需的营养和能源物质，使根际微生物的数量和活性都远远高于原土体. MicroResp™试验结果显示，添加碳源苹果酸和柠檬酸后，水旱轮作地的 CO_2 产生率明显低于稻田和旱地，很可能是由于水旱轮作地中种植的油菜根系分泌物主要也分泌柠檬酸和苹果酸，添加碳源苹果酸和柠檬酸后，柠檬酸和苹果酸浓度过高，pH 值降低，而使得土壤中的酶活性降低，从而水旱轮作地的 CO_2 转化率明显低于稻田和旱地.

4 结论

(1)稻田土壤的总 PLFA、细菌 PLFA 和真菌 PLFA 均显著高于水旱轮作地和旱地，稻田微生物总量、细菌、及真菌含量均最高.

(2)水旱轮作地具有较高的细菌 PLFA 与真菌的 PLFA 比值，稻田细菌 PLFA 与真菌的 PLFA 比值最低. G^- PLFA/G^+ PLFA 与总 PLFA 量细菌 PLFA 量和真菌 PLFA 量变化相似. 3 种不同利用方式土壤微生物磷脂脂肪酸主成分分析及平均摩尔分数结果表明，各种菌群占该总微生物的比例有差别，不同耕地利用方式土壤微生物群落结构有明显差异.

(3)土壤 PLFA 与土壤养分的相关性分析表明，土壤微生物量与土壤有机碳、全氮、碳比氮及微生物量碳均正相关，与阳离子交换量无显著相关性.

(4)MicroResp™法显示，不同耕地利用方式土壤对添加碳源的利用率不相同，平均碳源利用率为稻田最高，水旱轮作地居中，旱地最低，与 PLFA 法结论相一致.

致谢：感谢浙江大学资环学院徐建明老师在 PLFA 测定，姚槐应老师在 MicroResp™方面提供的技术和理论指导！

参考文献：

[1] White D C, MacNaughton S J. Chemical and molecular approaches for rapid assessment of the biological status of soils. In: Pankhurst C E, Doube B M, Gupta V V S R (Eds.). Biological Indicators of Soil Health [M]. CAB International, 1997. 371-396.

[2] 王芸, 韩宾, 史忠强, 等. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4): 120-122, 142.

[3] 毕明丽, 宇万太, 姜子绍, 等. 利用 PLFA 方法研究不同土地利用方式对潮棕壤微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2010, **43**(9): 1834-1842.

[4] 张娣, 程玉鹏, 王继, 等. 不同土地利用方式对微生物特性及土壤理化性质的影响[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2010, **26**(5): 83-87.

[5] 刘明, 李忠佩, 张桃林. 不同利用方式下红壤微生物生物量及代谢功能多样性的变化[J]. 土壤, 2009, **41**(5): 744-748.

[6] 王曙光, 侯彦林. 磷脂脂肪酸方法在土壤微生物分析中的应用[J]. 微生物学通报, 2004, **31**(1): 114-117.

[7] 白震, 何红波, 张威, 等. 磷脂脂肪酸技术及其在土壤微生物研究中的应用[J]. 生态学报, 2006, **26**(7): 2387-2394.

[8] 颜慧, 蔡祖聪, 钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2006, **43**(5): 851-859.

[9] 赵帅, 张静妮, 赖欣, 等. 放牧与围栏内蒙古针茅草原土壤微生物生物量碳、氮变化及微生物群落结构 PLFA 分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(6): 1126-1134.

[10] Campbell C D, Chapman S J, Cameron C M, *et al*. A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(6): 3593-3599.

[11] 钱美宇. MicroResp™方法研究土壤微生物群落水平生理特征(CLPP)进展[EB/OL]. http://www. paper789. com/paper_59fb5i/,2012-10-19.

[12] 鲁顺保, 郭晓敏, 芮亦超, 等. 澳大利亚亚热带不同森林土

壤微生物群落对碳源的利用[J]. 生态学报, 2012, **32**(9): 2819-2826.

[13] Nannipieri P, Ascher J, Ceccherini M T, *et al*. Microbial diversity and soil functions [J]. European Journal of Soil Science, 2003, **54**(4): 655-670.

[14] Zhu H H, Wu J S, Huang D Y, *et al*. Improving fertility and productivity of a highly-weathered upland soil in subtropical China by incorporating rice straw[J]. Plant and Soil, 2010, **331**(1-2): 427-437.

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 北京农业出版社, 2000. 12-26.

[16] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, *et al*. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, **22**(8): 1167-1169.

[17] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959, **37**(8): 911-917.

[18] 吴建军, 蒋艳梅, 吴愉萍, 等. 重金属复合污染对水稻土微生物生物量和群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2008, **45**(6): 1102-1109.

[19] Frostegård Å, Bååth E, Tunlid A. Shifts in the structure of soil microbial communities in limed forests as revealed by phospholipid fatty acid analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, **25**(6): 723-730.

[20] Tunlid A, Hoitink H A J, Low C, *et al*. Characterization of bacteria that suppress *Rhizoctonia damping*-off in bark compost media by analysis of fatty acid biomarkers [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, **55**(6): 1368-1374.

[21] Zelles L, Bai Q Y, Beck T, *et al*. Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicators of microbial biomass and community structure in agricultural soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, **24**(4): 317-323.

[22] Salomonová S, Lamaeová J, Rulik M, *et al*. Determination of phospholipid fatty acids in sediments [J]. Acta Universitatis Palackianae Olomucensis Facultas Rerum Naturalium: Chemical, 2003, **42**: 39-49.

[23] 黄进勇, 李春霞. 土壤微生物多样性的主要影响因子及其效应[J]. 河南科技大学学报, 2004, **24**(4): 10-13.

[24] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 等. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(7): 1411-1418.

[25] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(8): 1712-1721.

[26] Pal D, Broadbent F E. Influence of moisture on rice straw decomposition in soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, **39**(1): 59-63.

[27] 刘岳燕, 姚槐应, 黄昌勇. 水分条件对水稻土微生物群落多样性及活性的影响[J]. 土壤学报, 2006, **43**(5): 828-834.

[28] Thiet R K, Frey S D, Six J. Do growth yield efficiencies differ between soil microbial communities differing in fungal: bacterial ratios? Reality check and methodological issues[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(4): 837-844.

[29] De Vries F T, Hoffland E, Van Eekeren N, *et al*. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(8): 2092-2103.

[30] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J]. 土壤学报, 2002, **39**(3): 351-360.

[31] Muarray A H, Iason G R, Stewart C. Effect of simple phenolic compounds of heather (*Calluna vulgaris*) on rumen microbial activity in Vitro[J]. Journal of Chemical Ecology, 1996, **22**(8): 1493-1505.

[32] 朱豫, 曹海龙, 李曙光, 等. 发酵过程中微生物利用单糖的差异性[J]. 中国生物工程杂志, 2009, **29**(9): 102-107.

[33] 罗明, 陈新红, 李兢, 等. 种保素对几种作物根际微生物效应的影响[J]. 生态学杂志, 2000, **19**(3): 69-72.

[34] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙, 等. 根系分泌物生态学研究[J]. 生态学杂志, 2002, **21**(6): 57-62, 28.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 6

Jun. 15, 2013

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China ····· CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, *et al.* (2065)

Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) ····· MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, *et al.* (2071)

Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang ····· ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, *et al.* (2081)

Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City ····· LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, *et al.* (2089)

NH_3, N_2O, CH_4 and CO_2 Emissions from Growing Process of Caged Broilers ····· ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, *et al.* (2098)

Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene ····· WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, *et al.* (2107)

Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter ····· ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, *et al.* (2116)

Decomposion of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere ····· JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)

Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO_2 Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake ····· ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, *et al.* (2126)

A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition ····· HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)

Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF ····· LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)

Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution ····· WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, *et al.* (2146)

Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities ····· CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, *et al.* (2151)

Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring ····· LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, *et al.* (2159)

Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges ····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, *et al.* (2166)

Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Alage ····· FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, *et al.* (2176)

Influence of Decomposition of *Cladophora* sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water ····· HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, *et al.* (2184)

Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance ····· LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)

Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River ····· LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, *et al.* (2198)

Study on UV and H_2O_2Combined Inactivation of *E. coli* in Drinking Water ····· ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)

Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation ····· YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, *et al.* (2210)

Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body ····· MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, *et al.* (2218)

Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study ····· WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, *et al.* (2225)

Metal Ions Restrain the Elimination of 4-*tert*-Octylphenol by δ-MnO_2 ····· LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)

Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers ····· LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)

Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite ····· YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, *et al.* (2249)

Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water ····· YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, *et al.* (2256)

Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance ····· WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)

Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid ····· WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, *et al.* (2271)

Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor ····· ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, *et al.* (2277)

Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater ····· GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, *et al.* (2283)

Effect of Fe^{2+} on Fermentation Hydrogen Production in an UASB ····· LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, *et al.* (2290)

Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate ····· CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, *et al.* (2295)

Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge ····· LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, *et al.* (2302)

Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge ····· YANG Min, LU Long, FENG Yong, *et al.* (2309)

Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems ····· LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)

Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters ····· WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, *et al.* (2319)

Species Sensitivity Evaluation of *Pseudorasbora parva* ····· WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, *et al.* (2329)

Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches ····· LEI Bing-Li, WEN Yu, WANG Yi-pei, *et al.* (2335)

Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin ····· QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, *et al.* (2344)

Changes in Phototaxical Index of *Daphnia carinata* Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr^{6+} and Hg^{2+} ····· WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)

Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of *Cyclobalanopsis glauca* Leaf Litter ····· SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, *et al.* (2355)

Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species ····· LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, *et al.* (2361)

Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process ····· YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, *et al.* (2368)

Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp™ ····· CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, *et al.* (2375)

Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study ····· HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)

Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition ····· LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, *et al.* (2390)

Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City ····· CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, *et al.* (2399)

Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City ····· LI Xiao-yan (2407)

Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying ····· WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, *et al.* (2416)

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil ····· DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, *et al.* (2422)

Ex-situ Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl-β-Cyclodextrin Enhanced Soil Washing ····· SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, *et al.* (2428)

Effects of *Bacillus mucilaginosus* on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of *Brassica juncea* ····· YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)

Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm ····· WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, *et al.* (2442)

Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil ····· ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, *et al.* (2448)

Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing ····· WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, *et al.* (2456)

Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling ····· GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)

Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior ····· ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, *et al.* (2473)

Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups ····· LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, *et al.* (2479)

Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China ····· JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, *et al.* (2486)

Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis ····· BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, *et al.* (2493)

《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 6 月 15 日　34 卷　第 6 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 6　Jun. 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