

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 ..... 梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)

北京大气 PM<sub>2.5</sub> 与惰性 SiO<sub>2</sub> 的生物毒性比较 ..... 刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)

APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 ..... 高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)

2000 ~ 2014 年北京市 SO<sub>2</sub> 时空分布及一次污染过程分析 ..... 程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)

利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 ..... 周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)

长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 ..... 张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)

珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 ..... 刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)

春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 ..... 李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)

洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 ..... 庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)

大辽河主要污染源营养盐输入特征 ..... 马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)

三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 ..... 张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)

不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 ..... 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)

周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 ..... 王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)

华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例 ..... 孔晓乐, 王仕琴, 赵焱, 袁瑞强 (4051)

某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 ..... 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)

乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 ..... 贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)

青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 ..... 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)

多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配 ..... 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)

降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 ..... 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)

重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 ..... 任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)

三峡水库消落带植物汞的分布特征 ..... 梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)

物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 ..... 王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)

超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 ..... 魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)

载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 ..... 王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)

TiO<sub>2</sub> 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 ..... 陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)

单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 ..... 张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)

间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 ..... 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)

单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究 ..... 杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)

水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 ..... 王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)

氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 ..... 崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)

厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 ..... 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)

同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 ..... 冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 ..... 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 ..... 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)

活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 ..... 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)

温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 ..... 谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙酉, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)

污染场地修复技术筛选方法及应用 ..... 白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)

基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析 ..... 杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)

大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价 ..... 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)

缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 ..... 李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)

不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 ..... 兰木岭, 高明 (4252)

生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 ..... 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)

不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 ..... 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)

组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 ..... 朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文毅, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)

水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)

大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 ..... 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)

覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 ..... 邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)

阳极内添加阳离子交换树脂提升钼压“三合一”膜电极 MFC 性能 ..... 梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)

应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的萘和苯并芘 ..... 李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)

《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)

# 不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响

兰木羚, 高明\*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 以水稻、小麦、玉米秸秆和油菜、蚕豆青秆为研究对象, 采用磷脂脂肪酸(PLFA)方法, 并结合主成分分析方法, 研究了不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物数量、菌群分布、群落结构特征等的影响. PLFA分析结果表明, 旱地土壤PLFA总量变幅为 $8.35 \sim 25.15 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ , 大小顺序为油菜 > 蚕豆 > 玉米 > 水稻 > 小麦, 5种秸秆翻埋还田均能提高土壤微生物PLFA总量, 其中油菜、蚕豆处理分别是不加秸秆处理的2.18、2.08倍, 差异显著; 5种秸秆处理各菌群PLFA量均高于不加秸秆处理, 其中真菌量均显著提高, 微生物群落物种丰富度值也显著提高. 水田土壤PLFA总量变幅为 $4.04 \sim 22.19 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ , 大小顺序为水稻 > 玉米 > 小麦 > 油菜 > 蚕豆, 其中油菜和蚕豆处理低于不加秸秆处理; 除蚕豆外其余秸秆处理真菌PLFA量均显著高于不加秸秆处理, 蚕豆处理细菌和PLFA总量均显著低于其他处理, 各处理间放线菌、革兰氏阳性菌( $G^+$ )、革兰氏阴性菌( $G^-$ )无显著差异; 水稻、小麦、玉米、油菜均能显著提高水田土壤微生物的物种丰富度指数和优势度指数. 主成分分析结果表明蚕豆青秆对旱地土壤微生物群落结构影响最大, 油菜青秆和小麦秸秆对水田土壤微生物群落结构影响最大.

**关键词:** 秸秆; 土壤微生物群落; PLFA; 旱地; 水田

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4252-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.11.041

## Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming

LAN Mu-ling, GAO Ming\*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Based on rice, wheat, corn straw and rape, broad bean green stalk as the research object, using phospholipid fatty acid (PLFA) method, combining principal component analysis method to study the soil microbial quantity, distribution of flora, community structure characteristics under dry and water farming as two different cultivated land use types. The PLFA analysis results showed that: under dry farming, total PLFA quantity ranged  $8.35 \sim 25.15 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ , showed rape > broad bean > corn > rice > wheat, rape and broad bean significantly increased total PLFA quantity by 1.18 and 1.08 times compared to the treatment without straw; PLFA quantity of bacterial flora in treatments with straws was higher than that without straw, and fungal biomass was significantly increased, so was the species richness of microbial community. Under water farming, the treatments of different straws returning with landfill have improved the PLFA quantity of total soil microbial and flora comparing with the treatment without straw, fungi significantly increased, and species richness of microbial communities value also increased significantly. Total PLFA quantity ranged  $4.04 \sim 22.19 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ , showed rice > corn > wheat > broad bean > rape, which in rape and broad bean treatments were lower than the treatment without straw; fungal PLFA amount in 5 kinds of straw except broad bean treatment was significantly higher than that of the treatment without straw, bacteria and total PLFA quantity in broad bean processing were significantly lower than those of other treatments, actinomycetes,  $G^+$ ,  $G^-$  had no significant difference between all treatments; rice, wheat, corn, rape could significantly increase the soil microbial species richness index and dominance index under water farming. The results of principal component analysis showed that broad bean green stalk had the greatest impact on the microbial community structure in the dry soil, rape green stalk and wheat straw had the biggest influence on soil microbial community structure in water soil.

**Key words:** straw; soil microbial communities; PLFA; dry farming; water farming

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分, 直接参与有机质分解和氮、磷、硫等养分的转化利用<sup>[1]</sup>, 能固氮、溶磷、解钾, 分泌土壤酶, 催化土壤生物化学过程<sup>[2]</sup>, 在有机质的形成和分解、养分循环与转化、土壤肥力演替等方面起重要作用<sup>[3]</sup>. 同时, 土壤微生物对其生存的微环境十分敏感, 能对土

壤生态机制的变化和环境胁迫作出反应, 是表征土壤有效养分变化的敏感指标之一<sup>[4~7]</sup>. 有关土壤微

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-06-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B18)

作者简介: 兰木羚(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: lanml99@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

生物的研究在环境科学领域越来越受到关注<sup>[8~11]</sup>, 近年来学者们利用磷脂脂肪酸(PLFA)方法对土壤微生物群落结构进行研究得到了大量成果<sup>[12,13]</sup>.

作物秸秆是一种宝贵的自然资源,也是量最大的农业废弃物<sup>[14]</sup>. 早期研究认为秸秆的还田施用主要是为土壤提供养分,提高土壤肥力,从而减少化肥的施用量<sup>[15~19]</sup>. 随着人们对秸秆的农业利用认识越来越深入,关于秸秆腐解速率<sup>[20]</sup>、养分释放的动态变化<sup>[21]</sup>,以及秸秆焚烧对大气环境的影响等<sup>[22]</sup>方面做了大量研究,同时秸秆还田对土壤微生物群落结构的研究也越来越受到学者们的关注,尤其是利用 Biolog 微平板技术对不同植物秸秆腐解特性及其与土壤微生物功能多样性方面<sup>[23~25]</sup>的研究报道. 不过以往的研究多局限于一到两种秸秆,研究方法以 Biolog 微平板技术居多,因此本文以 5 种常见农作物秸秆为研究对象,并结合旱地和水田两

种耕作方式,利用 PLFA 方法以及主成分分析方法,对土壤微生物群落结构特性进行了综合分析,通过明确常见农作物秸秆对旱地和水田土壤微生物群落结构特性的影响差异,以期为该地区农业废弃物循环利用、以及提高土壤生物肥力提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

重庆市北碚区西南大学校本部试验农场内的“国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测基地”,试验基地地处东经 106°26',北纬 30°26',属紫色丘陵区,方山浅丘坳谷地形,海拔 266.3 m,年均气温 18.4℃,全年降水 1 105.5 mm,日照 1 276.7 h,为亚热带季风气候. 研究区土壤为中性紫色水稻土,水田种植方式为水稻-油菜轮作. 供试土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>	全氮 /g·kg <sup>-1</sup>	全磷 /g·kg <sup>-1</sup>	全钾 /g·kg <sup>-1</sup>	碱解氮 /mg·kg <sup>-1</sup>	有效磷 /mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾 /mg·kg <sup>-1</sup>
6.34	14.8	1.4	0.729	14.9	60.3	41.2	217

### 1.2 供试秸秆

于 2014 年 5 月在重庆市北碚区西南大学周边农村采集 5 种成熟作物秸秆(水稻秆、小麦秆、玉米秆、油菜青秆、蚕豆青秆),实验室洗

净,油菜和蚕豆青秆杀青,全部风干,剪成 5 cm 左右小段,再 60℃烘干至恒重,一部分保存,另一部分粉碎过 1 mm 筛备用. 秸秆样品基本性质见表 2.

表 2 秸秆样品基本性质

Table 2 Basic properties of the straw samples

秸秆样品	碳 /g·kg <sup>-1</sup>	氮 /g·kg <sup>-1</sup>	磷 /g·kg <sup>-1</sup>	钾 /g·kg <sup>-1</sup>	碳氮比
小麦秸秆	452.8	3.77	2.36	2.07	120.11
水稻秸秆	395.6	6.56	4.27	16.84	60.30
玉米秸秆	418.9	6.14	6.02	18.48	68.22
蚕豆青秆	392.8	7.38	4.56	7.95	53.22
油菜青秆	385.5	7.94	7.07	32.18	48.55

### 1.3 实验设计

实验选取旱地(D)和水田(P)两种耕作方式,分别将 80 g 过 1 mm 筛的水稻秸秆(D-SD、P-SD)、小麦秸秆(D-XM、P-XM)、玉米秸秆(D-YM、P-YM)、油菜青秆(D-YC、P-YC)、蚕豆青秆(D-CD、P-CD)与 2 kg 供试土壤混匀,另设不添加秸秆处理作为对照(D-CK、P-CK),置于孔径为 100 目的纯尼龙网袋中,共 12 个处理,每个处理 3 个重复. 实验于 2014 年 5 月 30 日将纯尼龙网袋埋入旱地和水田,距离表层土壤 5 cm,期间旱地种植莴笋,水田种植水稻. 埋入的纯尼龙网袋于 2014 年 9 月 30 日收

割水稻后取出,取出土样存于 4℃冰箱保存,并于一周内完成磷脂脂肪酸(PLFA)的测定.

### 1.4 测定项目

土壤基本理化性质采用常规分析方法<sup>[26]</sup>. 借鉴 Bligh 等<sup>[27]</sup>的方法提取新鲜土壤中的 PLFA,经一系列提取和预处理后,用 Agilent 6850 气相色谱仪(FID 检测器)分析 PLFA 成分. 色谱条件为:HP-5 柱(25.0 m × 200 μm × 0.33 μm),进样量 1 μL,分流比 10:1,载气: H<sub>2</sub>,尾吹气高纯 N<sub>2</sub>,助燃气是空气,流速 0.8 mL·min<sup>-1</sup>. 汽化室温度 250℃,检测器温度为 300℃,柱前压 10.0 psi. 升高柱温: 170℃起

始,  $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至  $260^{\circ}\text{C}$ , 而后  $40^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至  $310^{\circ}\text{C}$ , 保留 1.5 min. 各成分脂肪酸通过 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统 (Version 6.1, MIDI, Inc., Newark, DE) 进行, 标准品购于美国 MIDI 公司的 C9-C20 的脂肪酸甲酯, PLFA 用 C19:0 做内标, 换算 PLFA 的绝对含量<sup>[28]</sup>.

土壤中特定的 PLFA 标记表征特定微生物. 代表细菌类群的 PLFA 有 11:0、12:0、13:0、14:0、 $\alpha$ 14:0、i14:0、15:0、i15:0、 $\alpha$ 15:0、16:0、16:0、i16:0、i17:0、16:1 $\omega$ 7c、cy17:0、17:0、cy17:0 等<sup>[29~34]</sup>, 其中 i15:0、 $\alpha$ 15:0、i16:0、i17:0 代表格兰氏阳性细菌 ( $G^+$ )<sup>[29]</sup>, 10:0 2OH、12:0 2OH、14:0 2OH、16:0 2OH、16:1 $\omega$ 7c、cy17:0、cy19:0 代表格兰氏阴性细菌 ( $G^-$ )<sup>[29]</sup>; 代表真菌类群的包括 18:2 $\omega$ 6、18:1 $\omega$ 9c、18:1 $\omega$ 9t; 10Me18:0 代表放线菌类群<sup>[35]</sup>. 一般饱和脂肪酸以 12:0、13:0、14:0 等之和计, 单烯不饱和脂肪酸以 16:1 $\omega$ 7c、cy17:0 等之和计, 异构 PLFA 以 i14:0、i15:0、i16:0 等之和计, 反异构以  $\alpha$ 14:0、 $\alpha$ 15:0 等之和计<sup>[34]</sup>.

### 1.5 数据处理

用土壤 PLFA 含量计算土壤微生物的种群特征参数, 包括物种丰富度指数、均匀度指数和优势度指数<sup>[36,37]</sup>.

物种丰富度 Shannon 指数 ( $H$ ) 的计算公式为:

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

其中,  $P_i = N_i/N$ , 式中,  $N_i$  为测定第  $i$  种 PLFA 含量,  $N$  为该土壤的总 PLFA 含量; Pielou 均匀度指数 ( $E$ ) 的计算公式为:

$$E = H/\ln S \quad (2)$$

式中,  $S$  为该土壤 PLFA 类别总数; Simpson 优势度指数 ( $D$ ) 的计算公式为:

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (3)$$

数据采用 Microsoft Excel 2007、SPSS 17.0 进行处理, 用 LSD 法进行多重比较 ( $\alpha = 0.05$ ), 制图采用 Origin 7.0 软件.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆翻埋还田对土壤 PLFA 总量及微生物菌群分布的影响

由图 1(a) 可看出, 旱地不同处理土壤 PLFA 总量以及各菌群 (细菌、 $G^+$ 、 $G^-$ 、真菌、放线菌) PLFA 量分布均不同. PLFA 总量变幅为 8.35 ~

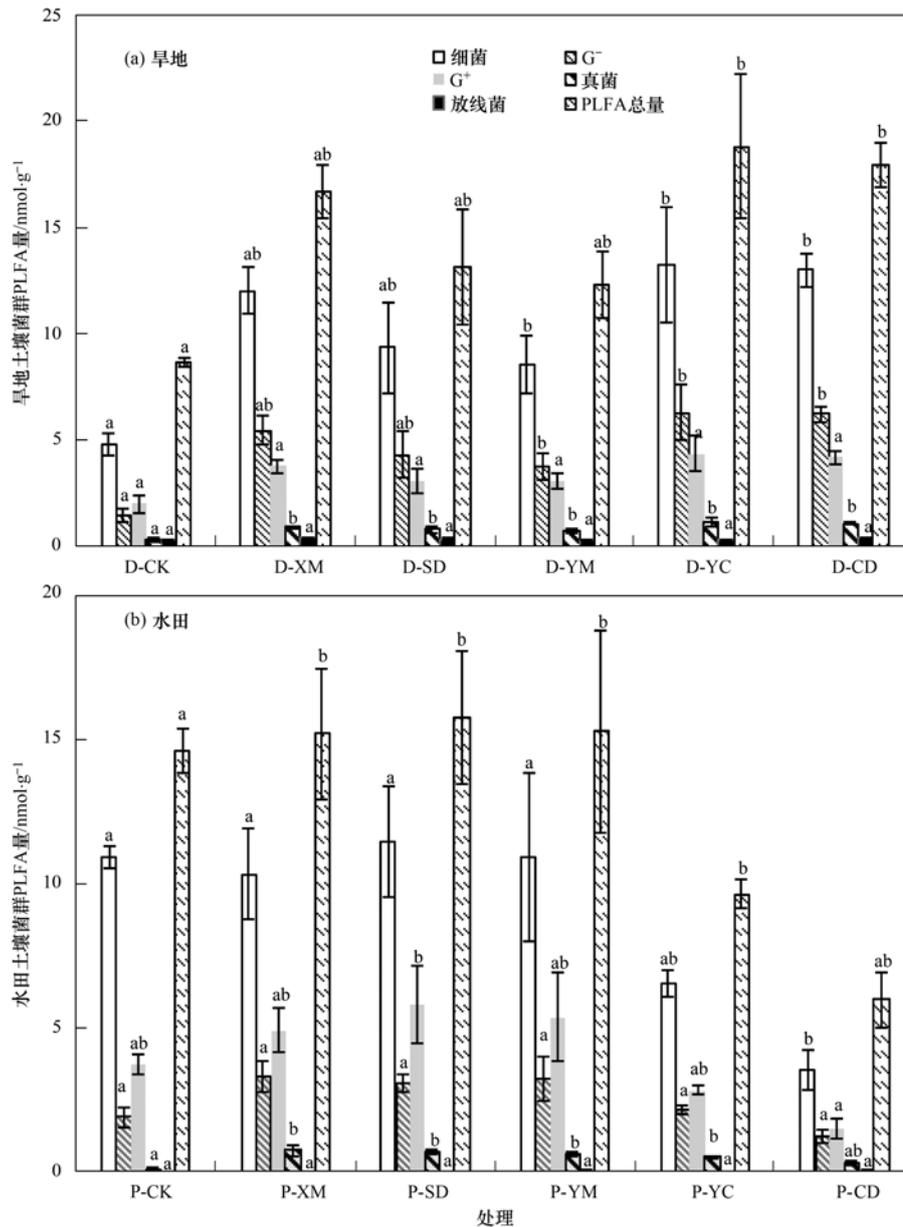
25.15  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 添加秸秆处理均提高了土壤微生物 PLFA 总量, 大小顺序为 D-YC > D-CD > D-XM > D-SD > D-YM > D-CK, 其中 D-YC、D-CD 分别是 D-CK 的 2.18、2.08 倍, 差异显著; 细菌、 $G^+$ 、 $G^-$ 、真菌及放线菌 PLFA 量变幅分别为 4.27 ~ 18.49、1.02 ~ 8.74、1.24 ~ 5.89、0.14 ~ 0.39、8.35 ~ 25.15  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 5 种秸秆处理均提高了土壤微生物各菌群 PLFA 量, 其中 D-YM、D-YC、D-CD 处理的  $G^-$  和细菌 PLFA 量均与 D-CK 处理差异显著, 各处理间  $G^+$  和放线菌 PLFA 量无显著差异, 5 种秸秆处理的真菌 PLFA 量均与 D-CK 处理差异显著.

由图 1(b) 可看出, 水田不同处理土壤 PLFA 总量以及各菌群 (细菌、 $G^+$ 、 $G^-$ 、真菌、放线菌) PLFA 量分布均不同. PLFA 总量变幅为 4.04 ~ 22.19  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其中 P-SD、P-YM、P-XM 较 P-CK 分别增加 3.71%、7.53%、4.36%, 同时 P-CD 显著低于其他处理; 细菌 PLFA 量变幅为 2.17 ~ 16.70  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其中仅 P-SD、P-YM 高于 P-CK, P-CD 显著低于其他处理;  $G^-$  PLFA 量变幅为 0.83 ~ 4.70  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 仅 P-CD 低于 P-CK, 且各处理无显著差异;  $G^+$  PLFA 量变幅为 0.81 ~ 8.36  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其中仅 P-YC 和 P-CD 低于 P-CK; 真菌 PLFA 量变幅为 0.19 ~ 1.11  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 5 种秸秆处理均高于 P-CK, 且除 P-CD 外其余处理显著高于 P-CK; 放线菌 PLFA 量变幅为 0 ~ 0.12  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ , P-CK 未检测到放线菌 PLFA, 其余处理间无显著差异.

同时, 旱地和水田之间也有明显不同. 对比图 1 可以看出, 总体上旱地 5 种秸秆翻埋还田均有利于提高土壤各菌群 PLFA 量, 油菜和蚕豆表现突出; 而水田则表现相反, 小麦、水稻和玉米秸秆翻埋还田后对土壤各菌群 PLFA 量与不加秸秆处理无显著差异, 油菜、蚕豆秸秆反而降低了水田土壤各菌群 PLFA 量.

### 2.2 不同秸秆翻埋还田对土壤微生物相对丰度的影响

细菌/真菌、 $G^+/G^-$  值常用来表征土壤生态系统的稳定性, 其值越大, 土壤生态系统越稳定<sup>[38]</sup>. 吴愉萍<sup>[39]</sup> 的研究指出微生物在外界胁迫越大, 如在高温或是低 pH、低碳源和低氧浓度下, 异构 PLFA/反异构 PLFA 值越大. 因此, 一般异构 PLFA/反异构 PLFA 的值常被用作反映环境胁迫. 环丙基脂肪酸 (cy17:0 和 cy19:0) 对氧气供应状况反应敏感, 可作为厌氧环境指标<sup>[40]</sup>.



同系列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 1 不同秸秆翻埋还田对不同土壤 PLFA 总量和菌群分布的影响

Fig. 1 Influences of different straws returning with landfill on total PLFA and bacterial flora distribution under different farming

从表 3 可以看出,旱地土壤异构 PLFA/反异构 PLFA 值以 D-YC 处理最小,且显著低于 D-CK,其次是 D-SD,其余处理均显著高于 D-CK; 环丙烷 PLFA 值以 D-SD 处理最小,除 D-XM、D-YM 显著高于 D-CK 外,其余处理与 D-CK 无显著差异; 细菌/真菌值以 D-YC 处理最小,但各处理间无显著差异;  $G^+/G^-$  值以 D-CD 最小,且 5 种秸秆处理均显著低于 D-CK. 水田土壤异构 PLFA/反异构 PLFA 值以 P-XM 处理最小,其中 P-SD、P-YC 显著高于 P-CK,其余处理均显著低于 P-CK; 环丙烷 PLFA 值以 P-CD 处理最小,且显著低于 P-CK,其余处理与 P-CK 无显著差

异; 细菌/真菌值以 P-CD 处理最小,且 5 种秸秆处理均显著低于 P-CK;  $G^+/G^-$  值也以 P-CD 处理最小,但各处理间无显著差异. 综合分析可知,秸秆填埋对旱地土壤微生物的胁迫小于水田土壤,油菜秸秆填埋对旱地土壤微生物的胁迫较小,小麦、玉米秸秆和蚕豆青秆对水田土壤胁迫较小.

### 2.3 不同秸秆翻埋还田对土壤微生物种群特征的影响

利用 PLFA 含量可计算出土壤微生物的群落特征值 (表 4). 结果表明,不同处理间土壤微生物的物种丰富度、均匀度和优势度指数有一定的差异.

物种丰富度,旱地和水田的 5 种秸秆处理均有提高,旱地 D-YC、D-CD 处理显著高于 D-CK,水田除 P-CD 外其余处理均显著高于 P-CK,同时就相同秸秆来说,5 种秸秆均表现为对旱地土壤微生物群落的物种丰富度影响大于水田,尤以蚕豆处理表现明显;

均匀度指数,旱地 5 种秸秆处理均低于 D-CK,水田则表现相反,不同秸秆处理间旱地和水田无显著差异;优势度指数,旱地仅 D-YC、D-SD 处理高于 D-CK,但无显著差异,水田除 P-CD 外其余处理均显著高于 P-CK,同时仅蚕豆处理旱地和水田差异显著。

表 3 土壤微生物各类群 PLFA 比值<sup>1)</sup>

Table 3 Rations of different microorganism PLFA contents in soil

处理	异构 PLFA/反异构 PLFA	环丙烷 PLFA/nmol·g <sup>-1</sup>	细菌/真菌	G <sup>+</sup> /G <sup>-</sup>
D-CK	0.97 ± 0.02a	0.59 ± 0.05abc	13.2 ± 0.34a	1.23 ± 0.09a
D-XM	1.61 ± 0.16c	1.04 ± 0.08c	14.08 ± 0.76a	0.71 ± 0.1b
D-SD	0.78 ± 0.05ab	0.31 ± 0.07a	12.3 ± 0.02a	0.74 ± 0.06b
D-YM	1.41 ± 0.07c	0.89 ± 0.21bc	12.55 ± 0.37a	0.83 ± 0.03b
D-YC	0.55 ± 0.07b	0.45 ± 0.12ab	11.88 ± 0.28a	0.69 ± 0.01b
D-CD	1.42 ± 0.02c	0.83 ± 0.16abc	12.28 ± 0.15a	0.67 ± 0.02b
P-CK	1.24 ± 0.08a	0.9 ± 0.03ac	49.72 ± 2.26a	1.96 ± 0.61a
P-XM	0.58 ± 0.08b	0.33 ± 0.14ab	14.47 ± 2.02bc	1.49 ± 0.05a
P-SD	1.49 ± 0.12d	1.23 ± 0.3c	16.89 ± 1.47c	1.9 ± 0.31a
P-YM	0.86 ± 0.03c	0.33 ± 0.14ab	17.20 ± 2.00c	1.68 ± 0.10a
P-YC	1.36 ± 0.04d	1.27 ± 0.09c	11.20 ± 0.96b	1.32 ± 0.06a
P-CD	0.74 ± 0.04bc	0.15 ± 0.02b	10.30 ± 1.04b	1.2 ± 0.10a

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

表 4 秸秆翻埋还田对土壤微生物群落特征的影响

Table 4 Influences of different straws returning with landfill on soil microbial community characteristics

处理	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>D</i>
D-CK	2.84 ± 0.06ab	0.93 ± 0.01a	0.93 ± 0.01bc
D-XM	2.98 ± 0.06bc	0.87 ± 0.01ab	0.93 ± 0.01bc
D-SD	2.90 ± 0.03bc	0.89 ± 0.006ab	0.93 ± 0.002bc
D-YM	2.93 ± 0.01bc	0.89 ± 0.01ab	0.93 ± 0.005bc
D-YC	3.00 ± 0.04c	0.89 ± 0.006ab	0.94 ± 0.002bc
D-CD	3.00 ± 0.01c	0.88 ± 0.01ab	0.94 ± 0.006c
P-CK	2.43 ± 0.16a	0.83 ± 0.006b	0.88 ± 0.008a
P-XM	2.93 ± 0.04bc	0.88 ± 0.023ab	0.93 ± 0.002bc
P-SD	2.81 ± 0.01bc	0.88 ± 0.019ab	0.92 ± 0.003bc
P-YM	2.87 ± 0.02bc	0.85 ± 0.015ab	0.92 ± 0.001bc
P-YC	2.81 ± 0.02bc	0.88 ± 0.004ab	0.92 ± 0.002bc
P-CD	2.66 ± 0.11ab	0.87 ± 0.017ab	0.90 ± 0.018ab

## 2.4 土壤微生物 PLFA 主成分分析

根据土壤总微生物 PLFA 数据,应用 Origin 7.0 作 PCA 二维排序图(图 2),PC1 贡献率为 52.72%,PC2 贡献率为 12.86%,累计贡献率 65.58%。实验共检测出 33 种 PLFA 标记物,与 PC1 呈正相关的标记物高达 27 种,呈负相关的标记物仅 6 种,其中 i15:0、16:0、16:1 $\omega$ 5c、i17:0、18:1 $\omega$ 9c、cy19:0 $\omega$ 8c 载荷量较高;与 PC2 呈正相关的标记物 19 种,呈负相关的标记物 14 种,其中 10:0 2OH、12:0、14:0、14:1 $\omega$ 5c 载荷量较高。

同时,对不同处理土壤微生物 PLFA 进行主成分分析(图 3),PC1 贡献率为 56.81%,PC2 贡献率为 26.21%,累计贡献率达到 83.02%。样方距离大小表示样方间微生物群落结构的相似程度,距离越

近相似程度越高<sup>[41]</sup>。旱地 6 种处理均与 PC1 成正相关,其中 D-YC、D-YM 处理与 D-CK 距离相近,其次是 D-XM、D-SD,相隔最远的是 D-CD 处理,说明蚕豆青秆对旱地土壤微生物群落结构影响最大,这与前面的分析结果一致。水田除 P-YC、P-XM 外其余均与 PC1 成正相关,其中 P-YM 与 P-CK 最相近,微生物群落结构相似程度高,其次是 P-CD,最远的 P-YC、P-XM,说明油菜青秆和小麦秸秆对水田土壤微生物群落结构影响最大。

## 3 讨论

秸秆翻埋还田主要依靠土壤微生物进行分解释放养分,因此土壤养分、秸秆种类和微生物活性三者关系紧密。本研究结果表明,秸秆翻埋还田提高



秆和小麦秸秆,这是因为油菜青秆外表面具有很厚的角质层,且中腔被易腐解的髓填充,而水稻秸秆与小麦秸秆外表面被蜡质层覆盖,腐解速率和养分释放都较慢<sup>[45]</sup>,因此本研究中油菜和蚕豆青秆腐解速率相对较大、养分释放相对较快;微生物生长对氮源敏感,土壤和秸秆首先要满足微生物氮源供给的充足,胡宏祥等<sup>[46]</sup>研究发现油菜秸秆还田后对土壤微生物群落结构影响较大,本研究采用的油菜青秆和蚕豆青秆氮含量较高,C/N 值仅为小麦秸秆的 0.4 倍(表 2),因此腐解过程中释放的氮含量相对较多,有利于微生物生长,这可能是造成不同秸秆翻埋还田对旱地土壤微生物群落结构影响差异的主要原因。

水田土壤为厌氧环境,而绝大多数土壤常见细菌属于好氧或兼性厌氧型,因此水田土壤微生物群落丰富度不及旱地土壤。王允青等<sup>[47]</sup>研究发现水泡处理下油菜秸秆外面的蜡质层更难腐解,本实验油菜和蚕豆青秆处理细菌/真菌值显著低于其他处理(表 3),即土壤中细菌处于竞争劣势,养分代谢以真菌占据主导位置,有利于有机质贮存和氮的固持<sup>[41]</sup>,从而导致油菜和蚕豆青秆填埋过程对土壤中微生物氮源的供给相对不足,不利于微生物生长。 $G^+$  细菌拥有较厚的细胞壁且能产生孢子,其种群抗压性较强,不易发生变化<sup>[48]</sup>,而  $G^-$  细菌对碳源较敏感,极易改变<sup>[49]</sup>,因此  $G^+/G^-$  值越高,表明土壤环境越适宜微生物生长。本实验中油菜和蚕豆青秆处理的  $G^+/G^-$  值也低于其他处理(表 3),说明油菜和蚕豆青秆翻埋还田不利于水田土壤微生物生长。

#### 4 结论

5 种秸秆翻埋还田均能提高旱地土壤微生物 PLFA 总量以及各菌群(细菌、真菌、放线菌、 $G^+$ 、 $G^-$ )PLFA 量、显著提高微生物群落的物种丰富度,其中以油菜青秆和蚕豆青秆对旱地土壤微生物群落结构影响最大;5 种秸秆翻埋还田均显著提高土壤微生物物种丰富度指数和优势度指数,小麦、水稻和玉米秸秆提高土壤各菌群 PLFA 量,油菜、蚕豆青秆反而降低了水田土壤各菌群 PLFA 量,因此不建议对水田土壤翻埋秸秆,旱地土壤以含氮量高的蚕豆青秆和油菜青秆翻埋还田为宜。

致谢:感谢王子芳老师、梁伟师兄在实验期间的帮助。

#### 参考文献:

[1] 俞慎,李勇,王俊华,等. 土壤微生物生物量作为红壤质量

生物指标的探讨[J]. 土壤学报, 1999, 36(3): 413-422.

- [2] Jenkinson D S, Ladd J N. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover [A]. In: Paul E A, Ladd J N, (eds.). Soil Biochemistry [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1981. 415-471.
- [3] Harris J A, Birch P. Soil microbial activity in opencast coal mine restorations[J]. Soil Use and Management, 1989, 5(4): 155-160.
- [4] Vargas Gil S, Meriles J, Conforto C, *et al.* Response of soil microbial communities to different management practices in surface soils of a soybean agroecosystem in Argentina [J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(1): 55-60.
- [5] Sotomayor-Ramírez D, Espinoza Y, Acosta-Martínez V. Land use effects on microbial biomass C,  $\beta$ -glucosidase and  $\beta$ -glucosaminidase activities, and availability, storage, and age of organic C in soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(5): 487-497.
- [6] Ge T D, Chen X J, Yuan H Z, *et al.* Microbial biomass, activity, and community structure in horticultural soils under conventional and organic management strategies [J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 58: 122-128.
- [7] Conrad R, Klose M, Yuan Q, *et al.* Stable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49: 193-199.
- [8] 白震,何红波,解宏图,等. 施肥与季节更替对黑土微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3230-3238.
- [9] 朱永官,王晓辉,杨小茹,等. 农田土壤  $N_2O$  产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792-800.
- [10] 陈晓娟,吴小红,简燕,等. 农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1144-1150.
- [11] 吴静,陈书涛,胡正华,等. 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1497-1506.
- [12] 陈晓娟,吴小红,刘守龙,等. 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[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2375-2382.
- [13] 陈展,王效科,尚鹤.  $^{13}CO_2$  示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3911-3917.
- [14] Blazier M A, Patterson W B, Hotard S L. Straw harvesting, fertilization, and fertilizer type alter soil microbiological and physical properties in a loblolly pine plantation in the mid-south USA [J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 45(2): 145-153.
- [15] 蔡立群,牛怡,罗珠珠,等. 秸秆促腐还田土壤养分及微生物量的动态变化[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1047-1056.
- [16] 杨志臣,吕贻忠,张凤荣,等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3):

- 214-218.
- [17] 詹其厚, 袁朝良, 张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制[J]. 土壤学报, 2003, **40**(3): 420-425.
- [18] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, **40**(4): 618-623.
- [19] Shibu M E, Leffelaar P A, van Keulen H, *et al.* Quantitative description of soil organic matter dynamics-A review of approaches with reference to rice-based cropping systems [J]. *Geoderma*, 2006, **137**(1-2): 1-18.
- [20] 刘世平, 陈文林, 聂新涛, 等. 麦稻两熟地区不同埋深对还田秸秆腐解进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(6): 1049-1053.
- [21] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(2): 374-380.
- [22] 刘刚, 庄义庆, 杨敬辉, 等. 腐秆剂与秸秆配施对稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 736-741.
- [23] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J]. 土壤学报, 2014, **51**(4): 743-752.
- [24] 于寒, 谷岩, 梁烜赫, 等. 玉米秸秆腐解规律及土壤微生物功能多样性研究[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(2): 305-309.
- [25] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(6): 1765-1771.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 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.
- [28] 王菲, 袁婷, 谷守宽, 等. 有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1461-1467.
- [29] Frostegard A, Tunlid A, Baath E. Phospholipid fatty acid composition, biomass, and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(11): 3605-3617.
- [30] Djukic I, Zehetner F, Mentler A, *et al.* Microbial community composition and activity in different Alpine vegetation zones[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, **42**(2): 155-161.
- [31] Hamel C, Vujanovic V, Jeannotte R, *et al.* Negative feedback on a perennial crop: Fusarium crown and root rot of asparagus is related to changes in soil microbial community structure [J]. *Plant and Soil*, 2005, **268**(1): 75-87.
- [32] 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*, 1989, **55**(6): 1368-1374.
- [33] Blume E, Bischoff M, Reichert J M, *et al.* Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, **20**(3): 171-181.
- [34] Brant J B, Myrold D D, Sulzman E W. Root controls on soil microbial community structure in forest soils [J]. *Oecologia*, 2006, **148**(4): 650-659.
- [35] Zogg G P, Zak D R, Ringleberg D B, *et al.* Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**(2): 475-481.
- [36] 张卫娟, 谷洁, 刘强, 等. 重金属 Zn 对猪粪堆肥过程中微生物群落的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(10): 2260-2267.
- [37] 罗希茜, 郝晓晖, 陈涛, 等. 长期不同施肥对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(2): 740-748.
- [38] 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.
- [39] 吴愉萍. 基于磷脂脂肪酸(PLFA)分析技术的土壤微生物群落结构多样性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 45-81.
- [40] Robie J V, White D C. Lipid analysis in microbial ecology: Quantitative approaches to the study of microbial communities [J]. *Biology Science*, 1989, **39**(8): 535-541.
- [41] 马瑞丰, 刘金福, 吴则焰, 等. 格氏栲林土壤微生物结构的多样性特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2014, **34**(4): 14-19.
- [42] Lou Y L, Liang W J, Xu M G, *et al.* Straw coverage alleviates seasonal variability of the topsoil microbial biomass and activity [J]. *CATENA*, 2011, **86**(2): 117-120.
- [43] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2012, **51**(1): 150-157.
- [44] 张成娥, 王栓全. 作物秸秆腐解过程中土壤微生物量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(3): 96-99.
- [45] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(6): 272-276.
- [46] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(3): 297-302.
- [47] 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(3): 607-610.
- [48] Zhang C, Liu G B, Xue S, *et al.* Effect of different vegetation types on the rhizosphere soil microbial community structure in the loess plateau of China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, **12**(11): 2103-2113.
- [49] Byss M, Dana E, Jan T, *et al.* Fungal bioremediation of the creosote-contaminated soil: influence of *Pleurotus ostreatus* and *Irpex lacteus* on polycyclic aromatic hydrocarbons removal and soil microbial community composition in the laboratory-scale study [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(9): 1518-1523.

## CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing .....	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i>	(3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM <sub>2.5</sub> from Beijing and Inert Particle SiO <sub>2</sub> .....	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i>	(3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC .....	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i>	(3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO <sub>2</sub> and An Ambient SO <sub>2</sub> Pollution Process in Beijing During 2000-2014 .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i>	(3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....		
.....	ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i>	(3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta .....	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta .....	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia	(3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring .....	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song	(3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin .....	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i>	(4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River .....	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i>	(4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area .....		
.....	ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i>	(4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China .....		
.....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i>	(4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms .....	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i>	(4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County .....		
.....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i>	(4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City .....	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Si-hui, <i>et al.</i>	(4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay .....	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i>	(4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River .....	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i>	(4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River .....	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen	(4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events .....	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i>	(4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing .....		
.....	REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i>	(4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i>	(4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance .....	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System .....	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i>	(4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon .....	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO <sub>2</sub> .....	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i>	(4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater .....	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin	(4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater .....	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i>	(4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O <sub>3</sub> -BAC and Double O <sub>3</sub> -BAC .....	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i>	(4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier .....	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i>	(4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule .....	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage .....	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i>	(4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics .....	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i>	(4180)
Effect of HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitrification-ANAMMOX Process .....	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitrification Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor .....	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning .....	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i>	(4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community .....	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i>	(4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application .....	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i>	(4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study .....	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i>	(4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment .....	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain .....	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju	(4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming .....		
.....	LAN Mu-ling, GAO Ming	(4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage .....	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i>	(4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance .....	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i>	(4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System .....	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i>	(4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes .....	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i>	(4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover .....	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i>	(4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells .....	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin	(4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection .....	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen	(4319)

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年11月15日 第36卷 第11期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人