

E方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示  
李勳之, 姜榕, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期  
Vol.43 No.2

目次

综述

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 ..... 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)  
再生水水质稳定性评价指标与体系 ..... 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 ..... 黄文, 王胜利 (597)  
基于多种新型受体模型的PM<sub>2.5</sub>来源解析对比 ..... 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)  
华中地区夏季PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征及来源分析 ..... 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)

淄博2021年元宵节PM<sub>2.5</sub>水溶性离子污染特征 ..... 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)  
浙江省大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 ..... 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)

2001~2019年气象条件对江苏省PM<sub>2.5</sub>分布的影响 ..... 潘晨, 康志明 (649)  
基于神经网络和数值模型的重点区域PM<sub>2.5</sub>预报比较分析 ..... 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)

2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 ..... 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)  
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 ..... 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)

山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 ..... 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)  
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善PMF源解析效果 ..... 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)

日照市夏季VOCs物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 ..... 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)

泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 ..... 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)

典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 ..... 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)

2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 ..... 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)

西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 ..... 徐森, 李思亮, 钟君 (752)

生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮化和淋失特征的影响 ..... 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)

不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 ..... 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)

雨源型城市河流污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 ..... 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)

廊坊市城区径流污染时空分布特征及来源解析 ..... 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)

北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 ..... 郭芝芝, 苏振华, 邱琰蓉, 郭道宇 (803)

河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 ..... 陈召堂, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)

青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 ..... 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)

鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 ..... 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)

鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 ..... 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)

汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 ..... 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)

基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 ..... 王子娇, 李叙勇 (867)

新冠疫情下武汉典型饮用水水源中DBPs污染特征与风险评估 ..... 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)

铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 ..... 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)

氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 ..... 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)

环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 ..... 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)

冷冻PN/A颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 ..... 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮英, 文言, 钱飞跃 (920)

不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 ..... 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)

云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 ..... 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)

山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 ..... 张丁, 黄容, 高雪松 (946)

地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 ..... 鞠铁男, 雷梅 (957)

西南地质高背景区蔬菜Pb的安全生产阈值与土地质量类别划分 ..... 穆德苗, 孙约兵 (965)

典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 ..... 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)

矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 ..... 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)

不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 ..... 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)

温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 ..... 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)

两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐焯 (1015)

复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)

产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦Cd吸收效应 ..... 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)

土壤phoC和phoD微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 杨文娜, 余烁, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)

刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 ..... 李文杰, 张祯敏, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)

中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 ..... 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)

稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 ..... 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)

模拟及实际根系分泌物对镉污染土壤微生物群落的影响 ..... 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)

德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 ..... 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)

陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 ..... 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)

长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 ..... 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)

《环境科学》征订启事(618) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

# 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征

邓少虹<sup>1,2</sup>, 郑小东<sup>1,3</sup>, 毛婉琼<sup>1,2</sup>, 陈香碧<sup>1\*</sup>, 胡亚军<sup>1</sup>, 程爱武<sup>4</sup>, 何寻阳<sup>1</sup>, 苏以荣<sup>1\*</sup>

(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; 3. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广州 510640; 4. 湖南省宁乡市农业技术推广中心, 宁乡 410600)

**摘要:** 微生物将植物残体矿化为 CO<sub>2</sub> 和同化为微生物细胞组成部分是新鲜有机物料转化为土壤有机质的关键环节。以亚热带两种典型农业利用(稻田和旱地)土壤为对象, 采用 40 d 室内模拟培养试验结合磷脂脂肪酸-稳定同位素示踪联用(<sup>13</sup>C-PLFA-SIP)技术, 研究 <sup>13</sup>C 标记秸秆的矿化特征以及参与秸秆降解的细菌和真菌类群变化规律。结果表明, 培养前期(0.25~1 d), 秸秆碳在稻田土壤中的矿化速率高于旱地土壤, 中期(2~20 d)以稻田土壤低于旱地土壤( $P < 0.05$ ), 后期(21~40 d)两者矿化速率相当。培养结束时, 秸秆碳在稻田土壤中的累积矿化率(11%)约为旱地(20%)的一半。尽管稻田土壤中总微生物量(PLFA 总量)比旱地高, 但两种土壤中秸秆碳被微生物同化为细胞组分的量(<sup>13</sup>C-PLFA)相当, 且稻田中秸秆碳的富集比例(PLFA 中 <sup>13</sup>C 占总碳量的百分比)低于旱地, 说明稻田土壤中参与秸秆碳降解的活性微生物占比少。整个培养期内, 稻田土壤中秸秆碳被微生物利用的优势类群为细菌(占<sup>13</sup>C-PLFA 总量的比例最高达 86%, 其中革兰氏阳性菌 59%、革兰氏阴性菌 27%), 旱地土壤则主要为真菌(最高占比达 75%)。这主要是由于稻田淹水环境抑制了微生物活性, 且对好氧微生物(真菌)的抑制作用强于细菌。基于细菌和真菌生存策略及其残留物周转特征, 结果表明稻田和旱地环境条件下利用碳源底物的优势微生物类群差异可能是导致两种土壤中微生物源有机碳积累和稳定性差异的主因。

**关键词:** 磷脂脂肪酸; 真菌; 细菌; 稻田; 旱地; 矿化

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-1069-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107151

## Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils

DENG Shao-hong<sup>1,2</sup>, ZHENG Xiao-dong<sup>1,3</sup>, MAO Wan-qiong<sup>1,2</sup>, CHEN Xiang-bi<sup>1\*</sup>, HU Ya-jun<sup>1</sup>, CHENG Ai-wu<sup>4</sup>, HE Xun-yang<sup>1</sup>, SU Yi-rong<sup>1\*</sup>

(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; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. Agricultural Technology Promotion Center, Ningxiang 410600, China)

**Abstract:** Two typical subtropical agricultural soils, a flooded paddy soil and its adjacent upland, were collected and then incubated with or without <sup>13</sup>C-labeled crop residue (maize straw) for 40 days. During the incubation, the mineralization rate of the crop residue was monitored, and the <sup>13</sup>C incorporated into fungal and bacterial phospholipid fatty acid (PLFA) was quantified. At the early stage (0.25-1 days), the mineralization rate of crop residue was faster in paddy soil than that in upland soil, whereas the opposite trend was observed from 2 to 20 days. At the late stage (21-40 days), the mineralization rate was similar in both soils. At the end of incubation, 11% of the total crop residue was mineralized in paddy soil, which was about half of that in upland soil (20%). Although paddy soil had a higher amount of microbial biomass (indicated by total PLFA), the total amounts of <sup>13</sup>C-PLFA were comparable in both soils, and the enrichment ratio (proportion of <sup>13</sup>C to total C in PLFA) was lower in paddy soil than that in upland soil. This indicated that the microbial community in paddy soil was less active in the uptake of crop residue C than that in upland soil. During the incubation, the residue-derived <sup>13</sup>C was mainly distributed in bacterial PLFA (up to 86% of total <sup>13</sup>C-PLFA, including 59% in gram-positive and 27% in gram-negative bacteria) in paddy soil, and up to 75% of total <sup>13</sup>C-PLFA distributed in fungal PLFAs was in upland soil. Thus, bacteria dominated the utilization of crop residue in paddy soil versus fungi in upland soil. Compared with that in upland soil, the microbial activity was suppressed in the anaerobic condition caused by flooding in paddy soil, with a stronger inhibition of fungi than bacteria. Considering the discrepancies of life strategies and necromass turnover between bacteria and fungi, the different dominant microbial groups in the utilization of crop residue in water-logged and well-drained conditions could lead to the distinct accumulation and stabilization of microbial-derived organic matter in paddy and upland soils.

**Key words:** <sup>13</sup>C phospholipid fatty acid analysis; fungi; bacteria; paddy; upland; mineralization

土壤是陆地生态系统最大的碳库, 在全球碳循环中发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。增加土壤有机碳的含量和稳定性是缓解全球气候变化、提升农田土壤肥力的重要途径<sup>[2]</sup>。植物残体是土壤有机碳的主要来源, 微生物是驱动植物残体转化为土壤有机碳的引擎<sup>[3,4]</sup>。植物残体进入土壤后, 在微生物作用下从大分子聚合物逐级降解为小分子化合物, 并持续释放出可溶性有机碳(dissolved organic carbon,

DOC)<sup>[5,6]</sup>。DOC 被微生物吸收后, 一部分被矿化为气态碳离开土壤, 一部分经合成代谢被同化为细胞组成物质, 经生长、繁殖和死亡等迭代过程, 不断形成微生物源稳定有机碳在土壤中积累<sup>[7,8]</sup>。因此, 深

收稿日期: 2021-07-18; 修订日期: 2021-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877035, 41977100)

作者简介: 邓少虹(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤生态与农业环境, E-mail: dengshaohong18@mails.ucas.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: xbchen@isa.ac.cn; yrsu@isa.ac.cn

入了解土壤有机碳转化和参与这一过程的微生物对调节土壤碳库至关重要。

真菌和细菌是土壤微生物的两大类群<sup>[9]</sup>。由于自身元素组成以及生存策略的不同,细菌和真菌对碳源底物的利用具有偏好性<sup>[10,11]</sup>。细菌在利用小分子化合物时占优势,在植物残体降解前期占主导;真菌利用大分子聚合物时具有优势,在植物残体降解后期占主导<sup>[12]</sup>。然而这种规律并不绝对,有研究发现,当葡萄糖添加量(以 C/土计)为 16 ~ 32 mg·kg<sup>-1</sup>时,真菌吸收葡萄糖比细菌快<sup>[13]</sup>;微氧条件下,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)在木质素降解方面比真菌更有优势<sup>[14]</sup>。因此,土壤真菌和细菌在植物残体转化为土壤有机碳过程中的作用强度与规律受控于具体的环境条件。

稻田和旱地作为我国东部粮食主产区两种主要的土地利用方式,其土壤水分条件呈鲜明对比<sup>[15]</sup>。稻田长期处于淹水条件,土壤微生物类群以厌氧和兼性厌氧为主,旱地主要处于自然排干的好氧条件,表层土壤微生物类群以好氧微生物为主<sup>[16]</sup>。厘清这两类巨大反差环境条件的土壤有机质微生物降解的过程差异对农田土壤碳库管理有重要意义。本课题组前期研究表明,我国东部 4 个气候区稻田土壤有机碳含量均显著低于旱地,稻田土壤长期固持的有机碳中 28% ~ 36% 来自微生物残留物,显著低于旱地(40% ~ 59%),且稻田土壤中真菌/细菌残留物比值均低于旱地土壤<sup>[17]</sup>。这表明,稻田土壤微生物(尤其是真菌)合成代谢作用对有机碳积累的参与

度低于旱地土壤。该结论是基于土壤中长期稳定的生物标志物(氨基糖和木质素酚)分析得出,短期内细菌和真菌对秸秆类新鲜有机碳的利用是否符合上述规律,尚不清楚。

本研究以亚热带典型稻田和旱地土壤为对象,以 <sup>13</sup>C 标记的秸秆为材料,通过短期(40 d)室内模拟培养试验结合 <sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> 监测和活性微生物(<sup>13</sup>C-PLFA)分析,研究 <sup>13</sup>C-秸秆在稻田和旱地土壤中的矿化动态,解析真菌和细菌利用 <sup>13</sup>C-秸秆的过程差异,以期深入揭示稻田和旱地土壤有机碳的稳定性差异及其微生物机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤和秸秆

土壤样品采自湖南省常德市鼎城区长岭岗乡(24°56' ~ 24°57' N, 108°03' ~ 108°04' E)的典型稻田和旱地,土壤母质为第四纪红土。稻田中水稻处于幼苗期(株高约 5 cm),未施肥;旱地中油菜刚收割,未施肥。采集表层土壤(0 ~ 15 cm),过 10 目筛后备用。土壤基本理化性质见表 1。

供试秸秆为 <sup>13</sup>C 标记的玉米秸秆。玉米幼苗置于以 <sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> 为碳源的标记箱中生长 60 d 后收获,具体标记方法参考专利:ZL200610019742.4。除去根系,玉米秸秆 105℃ 下杀青 30 min, 60℃ 烘干至恒重。将玉米秸秆剪成小段,粉碎研磨,过 100 目筛。秸秆碳含量为 43.8%,全氮含量为 1.7%,碳氮比为 26, δ<sup>13</sup>C 值为 1662‰。

表 1 土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soils

土地利用方式	ω(有机碳) /g·kg <sup>-1</sup>	ω(全氮) /g·kg <sup>-1</sup>	碳氮比	pH	ω(微生物量碳) /mg·kg <sup>-1</sup>	ω(可溶性有机碳) /mg·kg <sup>-1</sup>
稻田	19.3	2.12	9.13	6.17	595.39	23.81
旱地	14.7	2.01	7.26	5.35	235.19	27.59

### 1.2 试验设计与样品采集

稻田和旱地土壤分别设置不添加秸秆的对照处理和 <sup>13</sup>C-秸秆添加处理(添加量以 C/土计,为 150 mg·kg<sup>-1</sup>),共 4 个处理,分别表示为稻田、稻田 + 秸秆、旱地和旱地 + 秸秆,每个处理 4 次重复;本试验不考虑同位素分馏以及激发效应,因而不设置添加非标记秸秆处理。称取相当于烘干土重 50 g 的鲜土装于自封袋中,秸秆粉末多点添加,密封袋口反复揉搓,混匀后无损转至平底试管(直径 40 mm,高度 120 mm)内。平底试管置于 1 L 的密闭大口瓶中,瓶口用带三通阀的橡胶塞塞紧。大口瓶底部加 2 mL 去 CO<sub>2</sub> 水,以维持瓶内空气饱和湿度。稻田土壤保持淹水状态(试管内水层深度为 1 ~ 2 cm),旱地土

壤湿度调节到 45% 田间持水量,25℃ 黑暗条件下培养。于培养的第 0.25、1、2、3、5、7、10、15、20、25、30、35 和 40 d 采集气体样品,于培养的第 2、7 和 40 d 进行土壤破坏性采样。

### 1.3 样品分析

土壤基本理化性质采用常规方法分析<sup>[18]</sup>。CO<sub>2</sub> 含量采用气相色谱仪 GC-6890 (Agilent Technologies, 美国)测定,CO<sub>2</sub> 中的 δ<sup>13</sup>C 值采用稳定性同位素比值质谱仪 MAT253 (Thermo Scientific, 美国)测定<sup>[19]</sup>。DOC 含量采用 0.05 mol·L<sup>-1</sup> 硫酸钾提取,碳-自动分析仪 Phoenix8000 测定,取部分浸提液冷冻干燥后测定 δ<sup>13</sup>C 值<sup>[20]</sup>。微生物群落结构用土壤磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acid, PLFA)表示。根

据改进的 Buyer 方法提取土壤 PLFA, 采用连接美国 MIDI 公司 PLFA 数据库的气相色谱仪 GC-6890 (Agilent Technologies, 美国) 对提取物进行定量和定性分析<sup>[21]</sup>. i15:0、a15:0、i16:0、i17:0、a17:0 指示革兰氏阳性菌 ( $G^+$ ), 16:1 $\omega$ 9c、16:1 $\omega$ 7c、16:1 $\omega$ 5c、18:1 $\omega$ 7c、18:1 $\omega$ 5c、cy17:0、cy19:0 指示革兰氏阴性菌 ( $G^-$ ), 10Me16:0、10Me17:0、10Me18:0 指示放线菌, 18:1 $\omega$ 9c 和 18:2 $\omega$ 6c 指示真菌<sup>[11,19]</sup>. 细菌为革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌以及放线菌的总和. PLFA 提取物对应的  $\delta^{13}C$  值采用气相色谱-燃烧-同位素比值质谱仪 GC (Thermo Scientific Trace GC Ultra)-C-IRMS (MAT253) 测定.

#### 1.4 计算方法

土壤释放  $CO_2$  中来源于秸秆的比例<sup>[21]</sup>为:

$$F_{\text{residus}} = \frac{\delta^{13}C_{CO_2, \text{total}} - \delta^{13}C_{CO_2, \text{control}}}{\delta^{13}C_{\text{residue}} - \delta^{13}C_{\text{soil}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\delta^{13}C_{CO_2, \text{total}}$  和  $\delta^{13}C_{CO_2, \text{control}}$  分别为添加和不添加秸秆处理释放  $CO_2$  的  $\delta^{13}C$  值,  $\delta^{13}C_{\text{residue}}$  和  $\delta^{13}C_{\text{soil}}$  分别为秸秆和土壤的  $\delta^{13}C$  值.

以  $^{13}C-CO_2$  排放速率 [ $^{13}C-CO_2$ ,  $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ] 表示秸秆碳矿化速率:

$$^{13}C-CO_2 = CO_{2, \text{total}} \times F_{\text{residus}} \quad (2)$$

式中,  $CO_{2, \text{total}}$  为添加秸秆处理的总  $CO_2$  排放速率.

以  $CO_2$  中来自秸秆的碳累积量占添加碳总量比例估算秸秆矿化率. 应用相似公式计算 DOC 中来自秸秆的碳含量 ( $^{13}C-DOC$ ).

各类群微生物的 PLFA 含量为该种群单体 PLFA 含量之和.

每种单体 PLFA 中秸秆碳所占比例<sup>[16,20]</sup>

( $F_i, \%$ ) 为:

$$F_i = \frac{\delta^{13}C_{\text{PLFA, total}} - \delta^{13}C_{\text{PLFA, control}}}{\delta^{13}C_{\text{residue}} - \delta^{13}C_{\text{soil}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $\delta^{13}C_{\text{PLFA, total}}$  和  $\delta^{13}C_{\text{PLFA, control}}$  分别为添加秸秆处理和对照处理中单体 PLFA 的  $\delta^{13}C$  值.

每种单体 PLFA 中来自秸秆的碳含量 ( $P_i$ ,  $nmol \cdot g^{-1}$ ) 为:

$$P_i = C_i \times F_i \quad (4)$$

式中,  $C_i$  为单体 PLFA 中 C 含量 ( $nmol \cdot g^{-1}$ ).

各类群微生物 PLFA 中秸秆碳的同化量 ( $^{13}C-PLFA$ ) 为该种群单体 PLFA 中来自秸秆的碳含量之和.

各类群微生物的秸秆碳周转速率<sup>[22]</sup> ( $T_r$ ,  $\% \cdot d^{-1}$ ) 为:

$$T_r = \frac{-\ln(1 - F_{\text{PLFAs}})}{t} \quad (5)$$

式中,  $F_{\text{PLFAs}}$  为秸秆碳的富集比例, 即该类群 PLFA 中  $^{13}C$  占该类群总碳量的比例 ( $\%$ )<sup>[16]</sup>,  $t$  为培养时间 (d).

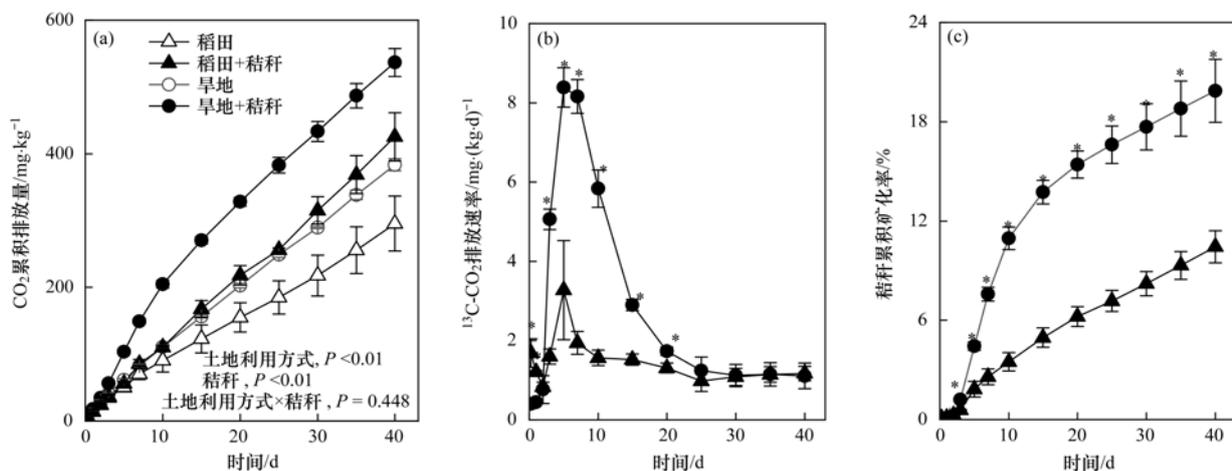
#### 1.5 统计分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 进行数据正态性和方差齐性检验, 不同土地利用方式和不同秸秆处理间差异采用双因素方差分析检验, Duncan 法进行多重比较 ( $\alpha = 0.05$ ). 采用 Origin2021 绘制图表. 数据表示为平均值  $\pm$  标准差.

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆碳矿化特征

培养期间, 稻田和旱地的对照处理 (不添加秸秆)  $CO_2$  累积排放量分别为  $295.4 mg \cdot kg^{-1}$  和  $383.5 mg \cdot kg^{-1}$ ; 秸秆添加使  $CO_2$  累积排放量分别增加了



\* 表示稻田和旱地间差异显著 ( $P < 0.05$ )

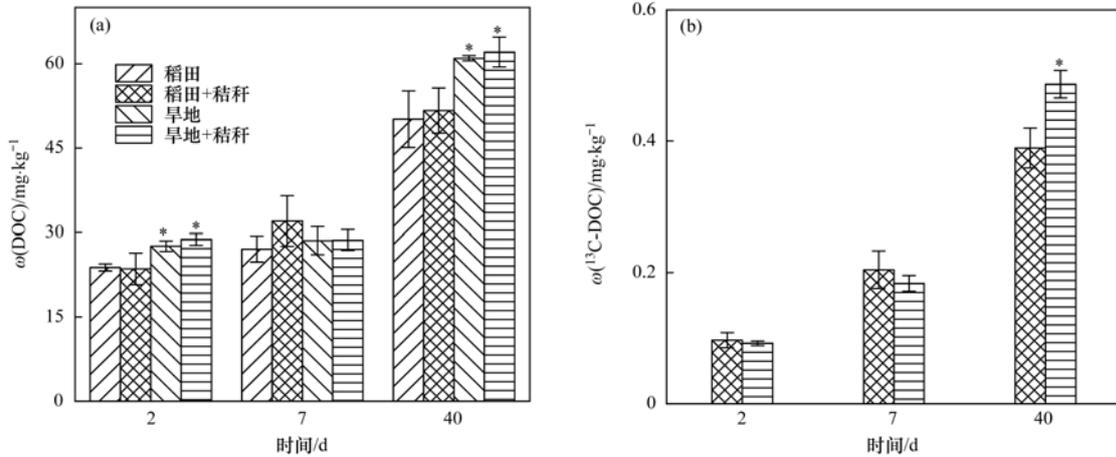
图1 稻田和旱地土壤  $CO_2$  累积排放量、秸秆的矿化速率和累积矿化率

Fig. 1 Cumulative emission of total  $CO_2$ , mineralization rate, and proportion of the crop residue in paddy and upland soils

40% 和 44% [图 1(a)]. 两种土壤的秸秆碳矿化速率( $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$  排放速率)均表现为先升高后降低最后趋于平缓,且最大矿化速率均出现在第 5 d. 培养 0.25 ~ 1 d, 稻田土壤中秸秆矿化速率[1.2 ~ 1.68  $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ , 以  $\text{CO}_2$  计,下同]显著高于旱地[0.41 ~ 0.45  $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ]( $P < 0.05$ ). 2 ~ 20 d, 旱地中秸秆碳矿化速率高于稻田. 20 d 后, 秸秆碳矿化速率在两种土壤中的差异不显著[图 1(b)]. 培养结束时, 稻田中秸秆碳的累积矿化率(11%)约为旱地(20%)的 1/2[图 1(c)].

### 2.2 土壤可溶性有机碳变化

土地利用方式和秸秆处理对 DOC 总含量无显著交互作用. 培养期间, 稻田和旱地土壤中  $\omega$ (总 DOC) 范围分别为 23.4 ~ 51.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 27.5 ~ 61.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 总体以稻田低于旱地[图 2(a)]. 秸秆添加对 DOC 总含量无显著影响. 培养期间, 两种土壤中秸秆碳转化为 $^{13}\text{C}\text{-DOC}$  的量均呈明显上升趋势; 培养结束时, 稻田  $\omega(^{13}\text{C}\text{-DOC})$  (0.39  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 低于旱地(0.49  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) [图 1(b),  $P < 0.05$ ].



\* 表示相同处理下稻田和旱地间差异显著( $P < 0.05$ )

图 2 稻田和旱地土壤中 DOC 总量和 $^{13}\text{C}\text{-DOC}$  含量

Fig. 2 Contents of total DOC and  $^{13}\text{C}\text{-DOC}$  in paddy and upland soils

### 2.3 土壤微生物群落组成及变化

培养期间, 各微生物类群总 PLFA 含量均以稻田高于旱地(图 3). 培养前期(2 d), 稻田土壤中, 秸秆添加减少  $G^-$  和放线菌含量, 但对 PLFA 总量无显著影响; 旱地土壤中, 秸秆添加增加真菌、放线菌、细菌含量和总 PLFA 量. 培养中期(7 d), 秸秆添加对稻田土壤各类群微生物 PLFA 含量无显著影响; 旱地土壤中, 秸秆添加增加  $G^+$  和放线菌 PLFA. 培养后期(40 d), 稻田土壤秸秆添加显著减少  $G^+$  和细菌 PLFA; 旱地土壤中秸秆添加显著增加细菌

PLFA.

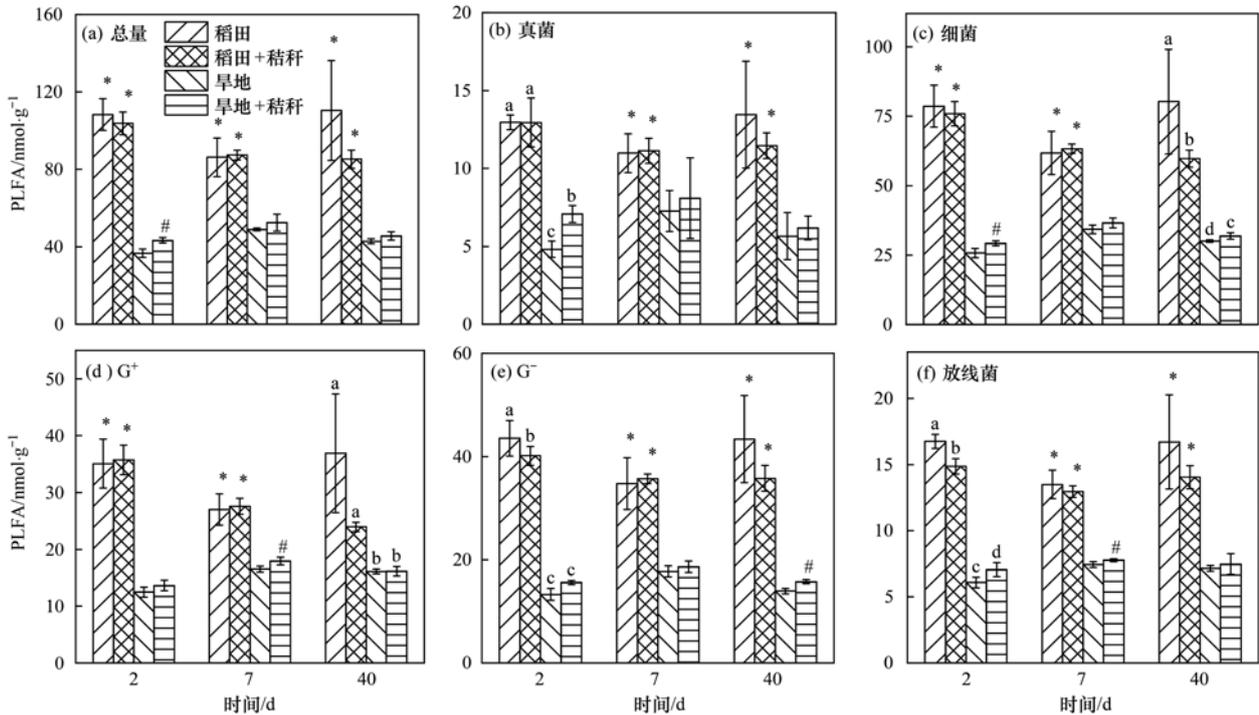
总体而言, 土地利用方式对细菌/真菌和  $G^+/G^-$  比值有显著影响(表 2). 同一处理的细菌/真菌比值以稻田略高于旱地, 且不同时间点上变化幅度也以稻田(0.2 ~ 0.5) 小于旱地(0.6 ~ 1). 培养期间, 同一处理的  $G^+/G^-$  比值均以稻田低于旱地( $P < 0.05$ ); 整个培养期, 稻田对照处理的  $G^+/G^-$  比值随时间的变化不明显, 旱地对照处理呈上升趋势; 两种土壤中, 添加秸秆处理的  $G^+/G^-$  比值随培养时间的延长均呈上升趋势.

表 2 培养过程中不同处理土壤细菌/真菌、革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比值的变化<sup>1)</sup>

Table 2 Ratios of bacteria to fungi and gram-positive to gram-negative bacteria under different treatments during incubation

处理	细菌/真菌			革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌( $G^+/G^-$ )		
	2 d	7 d	40 d	2 d	7 d	40 d
稻田	7.4 ± 0.6	6.9 ± 0.3	7.2 ± 0.3#	1.2 ± 0.0	1.2 ± 0.1	1.2 ± 0.1#
稻田 + 秸秆	7.1 ± 0.6&	6.9 ± 0.4	6.4 ± 0.2	1.3 ± 0.0b#	1.1 ± 0.1b	1.1 ± 0.1a
旱地	6.7 ± 0.7#	5.9 ± 1.2	6.9 ± 1.5	1.4 ± 0.1b&	1.4 ± 0.1b&	1.7 ± 0.1a&#
旱地 + 秸秆	5.1 ± 0.4	5.8 ± 1.2	6.4 ± 0.7	1.3 ± 0.1b&	1.4 ± 0.0b&	1.5 ± 0.1a&
土地利用方式	**	**	ns	**	**	**
秸秆	**	ns	ns	ns	ns	**
土地利用方式 × 秸秆	ns	ns	ns	ns	ns	ns

1) & 表示同一时间点相同处理下稻田与旱地间差异显著, #表示同一时间同一土壤中对照与秸秆添加处理间差异显著; 同一行不同小写字母表示同一处理不同时间点间的差异显著( $P < 0.05$ ); \*\* 表示  $P < 0.01$ , ns 表示  $P > 0.05$



G<sup>+</sup> 表示革兰氏阳性菌, G<sup>-</sup> 表示革兰氏阴性菌; 不同小写字母表示土壤和秸秆处理交互作用显著下处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); \* 表示相同处理下稻田与旱地间差异显著 ( $P < 0.05$ ); # 表示同一土壤中对照与秸秆添加处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图3 不同处理下土壤微生物的特征 PLFAs 含量

Fig. 3 Contents of microbial PLFAs in upland and paddy soils with or without crop residues

### 2.4 利用秸秆碳的微生物群落组成及变化

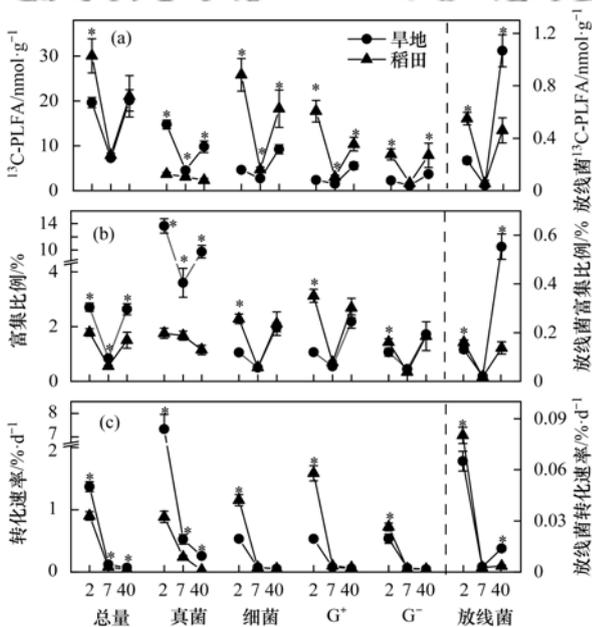
如图4(a)所示, 两种土壤中秸秆碳同化为微生物 PLFA 的总量 ( $^{13}\text{C}$ -PLFA 总量) 及各类群  $^{13}\text{C}$ -PLFA

含量均呈先降低后升高的趋势. 培养前期 (2 d),  $^{13}\text{C}$ -PLFA 总量以稻田显著高于旱地 ( $P < 0.05$ ), 之后两者差异不显著. 培养期内,  $^{13}\text{C}$ -真菌 PLFA 表现为稻田低于旱地;  $^{13}\text{C}$ -细菌、 $^{13}\text{C}$ -G<sup>+</sup> 和  $^{13}\text{C}$ -G<sup>-</sup> 的 PLFA 量均表现为稻田高于旱地. 培养前期,  $^{13}\text{C}$ -放线菌 PLFA 以稻田高于旱地, 培养后期 (40 d) 则相反.

秸秆碳在 PLFA 总量和真菌 PLFA 中的富集比例均以稻田低于旱地 [图 4(b)]. 培养前期, 总细菌、G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup> 和放线菌的  $^{13}\text{C}$ -PLFA 富集比例均表现为稻田高于旱地, 之后细菌、G<sup>+</sup> 和 G<sup>-</sup> 的  $^{13}\text{C}$ -PLFA 富集比例在旱地和稻田间的差异不显著, 培养后期, 放线菌 PLFA 中  $^{13}\text{C}$  的富集比例则以稻田低于旱地. 总量和真菌 PLFA 中  $^{13}\text{C}$  周转速率以稻田低于旱地 [图 4(c)]; 细菌、G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup> 和放线菌的  $^{13}\text{C}$  周转速率的变化规律与对应的富集比例一致.

### 3 讨论

通常, 淹水引起的厌氧环境抑制微生物活性, 使稻田比旱地土壤有机碳矿化速率低<sup>[19]</sup>. 本研究培养 0.25 ~ 1 d 时, 稻田土壤中秸秆碳矿化速率高于旱地土壤 [图 1(b)], 这可能是由两种土壤利用秸秆碳的主导微生物类群不同引起.  $^{13}\text{C}$ -PLFA 分析表明稻田土壤中利用秸秆碳的主要微生物类群为细菌, 旱地土壤中则为真菌 (图 5). 一般而言, 细菌的碳源利用效率低于真菌<sup>[23]</sup>, 即同化一单位秸秆碳释放的



横坐标数字表示时间 (d); G<sup>+</sup> 表示革兰氏阳性菌, G<sup>-</sup> 表示革兰氏阴性菌; \* 表示同一时间同一类群 PLFA 中稻田与旱地间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图4 旱地和稻田土壤中 PLFA 秸秆碳的转化量、富集比例和周转速率

Fig. 4 Amount of  $^{13}\text{C}$ -PLFA, enrichment ratio of  $^{13}\text{C}$  in PLFA, and turnover rate of  $^{13}\text{C}$  in microbial PLFA in paddy and upland soils

CO<sub>2</sub> 量以细菌高于真菌,意味着以细菌主导的稻田土壤微生物对新鲜碳源的利用效率低于以真菌主导的旱地土壤. 由于稻田土壤微生物对秸秆碳的同化量大于旱地土壤[图 4(a)],稻田土壤释放的 CO<sub>2</sub> 也比旱地土壤多. 2 d 后,随着秸秆输入的 DOC 被消耗[图 2(a)],微生物矿化纤维素、木质素等组分需经过氧化、脱水以及一系列的自由基链反应<sup>[24]</sup>,旱地土壤的好氧环境比稻田土壤的淹水环境更有利,因而旱地土壤中秸秆碳矿化速率高于稻田土壤(图 1).

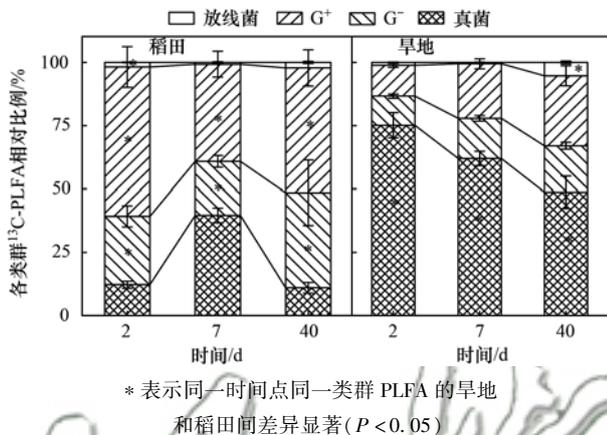


图 5 稻田和旱地土壤中利用秸秆碳的各类群 PLFA 的相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of <sup>13</sup>C incorporated in microbial PLFAs in paddy and upland soils

根据自身生存策略,可将土壤微生物划分为 r 型和 K 型<sup>[3]</sup>. r 型微生物生长快,一般专性利用易分解碳源;K 型微生物生长慢,可兼性利用易分解碳源和难分解碳源<sup>[25,26]</sup>. 有研究认为,G<sup>-</sup> 细菌是 r 型微生物<sup>[27]</sup>,在秸秆降解的前期占主导;而真菌、放线菌和大部分 G<sup>+</sup> 细菌是 K 型微生物<sup>[12,20]</sup>,在秸秆降解的后期占主导. 然而,本研究结果与上述规律不完全一致. 秸秆添加 2 d,旱地土壤中真菌和放线菌含量显著增加且细菌/真菌比值显著降低(图 3 和表 2),说明旱地土壤中真菌和放线菌是对新鲜碳源反应较灵敏的微生物类群,而稻田土壤中对添加秸秆反应较灵敏的是 G<sup>+</sup> 细菌和放线菌. 即旱地和稻田土壤中对新鲜碳源输入反应最快的均为 K 型微生物. 这可能是由于本研究输入的玉米秸秆 C/N 比更接近 K 型微生物生物量 C/N 比,大大刺激 K 型微生物(尤其是真菌)生长<sup>[26]</sup>. 放线菌对秸秆添加响应灵敏,但其对秸秆碳的同化量、周转速率均远低于真菌和 G<sup>+</sup> 细菌(图 4),造成放线菌对秸秆碳利用的贡献小(图 5,占<sup>13</sup>C-PLFA 总量的 1%~5%). G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 反映土壤微生物受到的饥饿压力,其值越高表明土壤养分越贫瘠<sup>[21]</sup>. 旱地土壤的 G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup> 始终高于稻田土壤(表 2),说明旱地土壤中养分不如稻田土壤

丰富. 细菌/真菌比值可表征土壤生态系统的稳定性<sup>[28]</sup>. 秸秆添加后,旱地土壤微生物对新鲜碳源的竞争激烈,细菌/真菌比值变化幅度大;相比之下,稻田土壤本身 SOC 含量较高、养分较充足(表 1),加上微生物活性受到淹水抑制(图 4),微生物类群之间的竞争活动较弱,群落结构更稳定,因而细菌/真菌变化幅度小(表 2). 培养结束时,尽管稻田土壤中微生物总 PLFA 含量高于旱地(图 3),但两种土壤中微生物的秸秆碳同化总量相当(图 4),说明稻田土壤中参与秸秆碳降解的活性微生物占比少<sup>[29]</sup>. 整个培养期稻田土壤中真菌对秸秆碳的富集比例远低于旱地(图 5),细菌对秸秆碳的富集比例在培养中后期与旱地土壤相似(图 4),说明稻田淹水对真菌的抑制程度强于细菌.

本研究发现,旱地土壤中真菌在秸秆分解中发挥主要作用,而稻田土壤中 G<sup>+</sup> 和 G<sup>-</sup> 细菌是参与秸秆分解的主要微生物类群(图 5). 残体本身的性质和土壤环境的不同会导致参与植物残体分解微生物群落不同<sup>[25,27]</sup>. 本研究供试秸秆来源和添加量一致,供试土壤来自同一成土母质,因此底物丰缺和水分环境差异可能是旱地和稻田土壤中新鲜碳源微生物利用主要类群差异的主因(图 4). 具体而言,旱地土壤中 SOC 含量较稻田土壤低,前者微生物受到更强的碳源限制,当秸秆加入后,微生物对外源碳的利用能力较稻田土壤微生物强[图 4(a)],旱地总量 PLFA 的周转速率大于稻田<sup>[30]</sup>. 秸秆碳在旱地土壤真菌 PLFA 中的周转速率是稻田土壤的 2.2~8.9 倍[图 4(c)],被微生物同化秸秆碳在真菌 PLFA 的分配比例高达 76%(图 5). 这与前人旱作好氧条件下真菌主导外源有机碳利用和固持的结论相符<sup>[16]</sup>. 绝大多数真菌是好氧的、细菌则包括好氧、厌氧和兼性好氧类群<sup>[16]</sup>,因而淹水对真菌的抑制作用大于细菌,导致稻田土壤中真菌 PLFA 低于 G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup> 和放线菌(图 3),进而抑制真菌对秸秆的矿化分解,使细菌成为稻田中降解秸秆的主导菌群(图 4 和图 5). 细菌和真菌新陈代谢和细胞功能不同<sup>[31]</sup>,由于细菌生物量 C/N 比(4:1)低于真菌(10:1)<sup>[28]</sup>,前者养分需求高,自身生物量周转时间为 2.3~33 d;后者养分需求低,周转时间为 130~150 d<sup>[29]</sup>. 因此,以细菌主导秸秆碳降解过程的稻田土壤中,微生物对秸秆碳的固持时间短于以真菌主导的旱地土壤. 与旱地土壤相比,稻田土壤中秸秆碳较低的矿化率(图 1)及相当的微生物同化量(图 3),说明淹水条件下较多秸秆没有被微生物分解代谢也没有被用于合成代谢,更多的秸秆碳可能直接以土壤物理化学保护的形式沉积在土壤中<sup>[4,6]</sup>.

本课题组前期基于区域调研结合生物标志物(氨基糖和木质素酚)的研究也证实了稻田土壤中积累的植物源有机碳高于旱地土壤,而源于微生物合成代谢产物的微生物残留物比旱地土壤低,尤其是真菌残留物<sup>[17]</sup>。有研究表明,细菌死亡后其残留物(生物标志物为胞壁酸)稳定性比真菌残留物(生物标志物为氨基葡萄糖)低<sup>[3,32]</sup>。因而,本研究稻田土壤秸秆降解过程由细菌主导而旱地由真菌主导的结果,暗示了稻田土壤中残留的微生物源碳(细菌残留物为主)稳定性低于旱地土壤(真菌残留物为主)。前人基于有机质分组(颗粒有机质和矿物结合态有机质)的研究发现,不稳定的颗粒有机碳占比以稻田高于相邻旱地,而稳定性较高的矿物结合态有机碳占比以旱地高于稻田<sup>[33]</sup>。总之,本研究短期监测结果和以往长期有机碳积累组分分析均表明,稻田土壤有机碳积累能力强是缘于淹水抑制了微生物(尤其是真菌)矿化,但其积累的有机碳稳定性比旱地土壤弱,警示了稻田淹水管理对保护土壤碳库的重要性。

#### 4 结论

稻田和旱地土壤中参与秸秆降解的微生物类群差异明显,稻田土壤主要以细菌为主,而旱地土壤以真菌为主。尽管稻田土壤中真菌、细菌生物量大于旱地土壤,但淹水抑制了稻田土壤好氧微生物(尤其是真菌)的活动,导致真菌对秸秆碳利用的参与度低于旱地,使稻田土壤中作物残体矿化为 CO<sub>2</sub> 的程度弱于旱地土壤。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, **123**(1-2): 1-22.
- [ 2 ] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. *Nature Microbiology*, 2017, **2**(8), doi: 10.1038/nmicrobiol.2017.105.
- [ 3 ] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(3): 528-540.  
Wang J K, Xu Y D, Ding F, *et al.* Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: a review [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(3): 528-540.
- [ 4 ] 邵帅, 何红波, 张威, 等. 土壤有机质形成与来源研究进展[J]. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, 2017, **38**(1): 126-130.  
Shao S, He H B, Zhang W, *et al.* Soil organic matter formation and origin: a review [J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, **38**(1): 126-130.
- [ 5 ] Roth V N, Lange M, Simon C, *et al.* Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(9): 755-761.
- [ 6 ] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, **528**(7580): 60-68.
- [ 7 ] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, **51**(5): 680-695.  
Liang C, Zhu X F. The soil microbial carbon pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(4): 545-558.
- [ 8 ] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, *et al.* Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties [J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3-4): 273-291.
- [ 9 ] 吴宪, 王蕊, 胡荷, 等. 潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4669-4681.  
Wu X, Wang R, Hu H, *et al.* Response of bacterial and fungal communities to chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer and straw in fluvo-aquic soil[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4669-4681.
- [ 10 ] Deng S H, Zheng X D, Chen X B, *et al.* Divergent mineralization of hydrophilic and hydrophobic organic substrates and their priming effect in soils depending on their preferential utilization by bacteria and fungi [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, **57**(1): 65-76.
- [ 11 ] Xia Y H, Chen X B, Zheng X D, *et al.* Preferential uptake of hydrophilic and hydrophobic compounds by bacteria and fungi in upland and paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **148**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107879.
- [ 12 ] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(6): 837-843.
- [ 13 ] Reischke S, Rousk J, Bååth E. The effects of glucose loading rates on bacterial and fungal growth in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **70**: 88-95.
- [ 14 ] Xu W Y, Fu S F, Yang Z M, *et al.* Improved methane production from corn straw by microaerobic pretreatment with a pure bacteria system[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **259**: 18-23.
- [ 15 ] Wei L, Ge T D, Zhu Z K, *et al.* Comparing carbon and nitrogen stocks in paddy and upland soils: accumulation, stabilization mechanisms, and environmental drivers [J]. *Geoderma*, 2021, **398**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115121.
- [ 16 ] 王娟. 稻田土壤碳氮转化与微生物群落结构及活性之间的联系机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 5-6.  
Wang J. The relationship of microbial community structure and activity to carbon and nitrogen transformations in paddy soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. 5-6.
- [ 17 ] Chen X B, Hu Y J, Xia Y H, *et al.* Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils [J]. *Global Change Biology*, 2021, **27**(11): 2478-2490.
- [ 18 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 19 ] Qiu H S, Ge T D, Liu J Y, *et al.* Effects of biotic and abiotic factors on soil organic matter mineralization: experiments and structural modeling analysis [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018, **84**: 27-34.
- [ 20 ] Zhu Z K, Ge T D, Hu Y J, *et al.* Fate of rice shoot and root residues, rhizodeposits, and microbial assimilated carbon in paddy soil-part 2: turnover and microbial utilization [J]. *Plant and Soil*, 2017, **416**(1-2): 243-257.
- [ 21 ] 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 等. 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2912-2919.

- Xu X C, Su Y R, Wang G H, *et al.* Straw returning plus nitrogen fertilizer affects the soil microbial community and organic carbon mineralization in karst farmland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2912-2919.
- [22] Zang H D, Blagodatskaya E, Wen Y, *et al.* Carbon sequestration and turnover in soil under the energy crop *Miscanthus*: repeated <sup>13</sup>C natural abundance approach and literature synthesis [J]. *GCB Bioenergy*, 2018, **10**(4): 262-271.
- [23] 陈智, 于贵瑞. 土壤微生物碳素利用效率研究进展[J]. *生态学报*, 2020, **40**(3): 756-767.  
Chen Z, Yu G R. Advances in the soil microbial carbon use efficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(3): 756-767.
- [24] 陈昕, 姜成浩, 罗安程. 秸秆微生物降解机理研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, **41**(23): 9728-9731, 9740.  
Chen X, Jiang C H, Luo A C, *et al.* Study on the microbial degradation mechanism of straw [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(23): 9728-9731, 9740.
- [25] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 土壤有机碳矿化激发效应的微生物机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(4): 1202-1211.  
Wei Y Y, Cui L J, Zhang M Y, *et al.* Research advances in microbial mechanisms underlying priming effect of soil organic carbon mineralization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(4): 1202-1211.
- [26] Mazzilli S R, Kemanian A R, Ernst O R, *et al.* Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 273-281.
- [27] 仇存璞, 陈晓芬, 刘明, 等. 两种典型水稻土中秸秆碳转化的微生物过程[J]. *中国农业科学*, 2019, **52**(13): 2268-2279.
- Qiu C P, Chen X F, Liu M, *et al.* Microbial transformation process of straw-derived C in two typical paddy soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(13): 2268-2279.
- [28] 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.
- [29] Gunina A, Dippold M, Glaser B, *et al.* Turnover of microbial groups and cell components in soil: <sup>13</sup>C analysis of cellular biomarkers [J]. *Biogeosciences*, 2017, **14**(2): 271-283.
- [30] Zhu Z K, Ge T D, Xiao M L, *et al.* Belowground carbon allocation and dynamics under rice cultivation depends on soil organic matter content [J]. *Plant and Soil*, 2017, **410**(1-2): 247-258.
- [31] Fabian J, Zlatanovic S, Mutz M, *et al.* Fungal-bacterial dynamics and their contribution to terrigenous carbon turnover in relation to organic matter quality [J]. *The ISME Journal*, 2017, **11**(2): 415-425.
- [32] Xia Y H, Chen X B, Hu Y J, *et al.* Contrasting contribution of fungal and bacterial residues to organic carbon accumulation in paddy soils across eastern China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(8): 767-776.
- [33] 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 等. 红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1466-1473.  
Zhang X F, Zheng S M, Xia Y H, *et al.* Responses of soil organic carbon fractions to land use types in hilly red soil regions, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1466-1473.

## CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	( 577 )
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	( 586 )
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	( 597 )
PM <sub>2.5</sub> Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	( 608 )
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM <sub>2.5</sub> During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	( 619 )
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	( 629 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	( 639 )
Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	( 649 )
Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	( 663 )
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	( 675 )
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O <sub>3</sub> Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	( 686 )
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	( 696 )
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	( 707 )
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	( 714 )
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	( 723 )
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	( 735 )
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	( 743 )
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}C_{DIC}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	( 752 )
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	( 762 )
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	( 770 )
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	( 782 )
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	( 795 )
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	( 803 )
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	( 813 )
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	( 826 )
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	( 837 )
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	( 847 )
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	( 859 )
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	( 867 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	( 878 )
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	( 887 )
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	( 896 )
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	( 907 )
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	( 920 )
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	( 928 )
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	( 936 )
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	( 946 )
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	( 957 )
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	( 965 )
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	( 975 )
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	( 985 )
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	( 995 )
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	( 1004 )
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	( 1015 )
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	( 1023 )
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	( 1031 )
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	( 1040 )
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	( 1050 )
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	( 1059 )
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	( 1069 )
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	( 1077 )
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	( 1089 )
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	( 1097 )
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	( 1108 )