

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6  
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 ..... 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 ..... 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 ..... 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 ..... 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 ..... 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 ..... 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 ..... 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 ..... 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM<sub>2.5</sub> 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 ..... 刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 ..... 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 ..... 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 ..... 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 ..... 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub> 及硝态氮污染特征及干湿沉降 ..... 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 ..... 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 ..... 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 ..... 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 ..... 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 ..... 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 ..... 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 ..... 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 ..... 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 ..... 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 ..... 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 ..... 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 ..... 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 ..... 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 ..... 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 ..... 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 ..... 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 ..... 王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 ..... 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 ..... 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 ..... 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 ..... 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 ..... 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 ..... 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 ..... 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 ..... 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 ..... 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO<sub>x</sub>排放影响 ..... 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N<sub>2</sub>O排放的影响及其微生物机制 ..... 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 ..... 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 ..... 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 ..... 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 ..... 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 ..... 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 ..... 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

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 ..... 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 ..... 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 ..... 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 ..... 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 ..... 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 ..... 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

# 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

徐学池<sup>1,2,3</sup>, 苏以荣<sup>1</sup>, 王桂红<sup>4</sup>, 刘坤平<sup>3</sup>, 胡亚军<sup>1</sup>, 陈香碧<sup>1</sup>, 郑小东<sup>5</sup>, 何寻阳<sup>1,3\*</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. 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 环江 547100; 4. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 5. 武汉市水产发展有限公司, 武汉农业集团, 武汉 430014)

**摘要:** 秸秆还田配施氮肥是调控农田土壤有机碳转化的重要措施, 为认知秸秆配施氮肥对秸秆和长期施肥土壤有机碳矿化的作用机制, 选取喀斯特长期施肥定位试验3种土壤(不施肥、无机肥、秸秆与无机肥配施), 采用室内培养结合<sup>13</sup>C示踪技术, 设置不添加秸秆(对照组)及添加秸秆配施3种氮素水平处理(0、214.0和571.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 以干基土计), 研究<sup>13</sup>C标记的秸秆和土壤有机碳的矿化及其机制. 结果表明, 长期施肥土壤的秸秆CO<sub>2</sub>排放量均显著高于不施肥土壤, 且氮素水平显著影响不施肥土壤的秸秆有机碳矿化; 长期施肥土壤激发效应均显著低于不施肥土壤, 且低水平氮素配施降低秸秆添加引起的正激发效应, 高水平氮素反而增大. PCA分析表明长期施肥、秸秆还田配施氮肥均显著改变土壤微生物群落, 其中秸秆与氮素配施显著增加土壤总PLFAs、细菌和真菌PLFA摩尔质量浓度(与对照相比, 增幅分别为40.3%~53.0%、41.1%~62.6%和60.5%~148.6%), 但氮素水平影响不显著, 土壤G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup>降低并稳定在0.8左右. 结构方程模型结果表明, 秸秆还田配施氮肥增加土壤DOC含量、影响土壤革兰氏菌群落结构, 从而影响秸秆和土壤有机碳矿化. 上述结果表明秸秆还田配施低水平氮肥有利于提升喀斯特农田土壤固碳能力.

**关键词:** 氮素; 秸秆还田; 激发效应; 长期施肥; 同位素

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2912-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810164

## Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland

XU Xue-chi<sup>1,2,3</sup>, SU Yi-rong<sup>1</sup>, WANG Gui-hong<sup>4</sup>, LIU Kun-ping<sup>3</sup>, HU Ya-jun<sup>1</sup>, CHEN Xiang-bi<sup>1</sup>, ZHENG Xiaodong<sup>5</sup>, HE Xun-yang<sup>1,3\*</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. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China; 4. College of Agricultural, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 5. Wuhan Aquatic Produce Development Ltd., Wuhan Agricultural Group, Wuhan 430014, China)

**Abstract:** The use of straw returning plus nitrogen fertilizer on farmland is one of the important agronomic practices for adjusting soil organic carbon (SOC) transformations. To explore the mechanisms of straw and nitrogen fertilizer application on straw and SOC mineralization in long-term fertilized soils, an incubation experiment with the <sup>13</sup>C isotope tracing technique was conducted, which involved three long-term fertilized models in typical karst soils (no fertilization, inorganic fertilization, and a combination of inorganic fertilization and straw). To study the mechanisms of <sup>13</sup>C-labeled straw and SOC mineralization, four treatments were designed as follows: no straw and nitrogen (control), and straw combined with three levels of nitrogen fertilizer (0, 214.0, and 571.0 mg·kg<sup>-1</sup> soil). The results showed that cumulative mineralization amounts of straw-derived organic carbon in long-term fertilized soils were markedly higher than those in non-fertilized soil. Straw-derived organic carbon mineralization was significantly affected by nitrogen fertilizer levels. The positive priming effects (PE) in long-term fertilized soils were much lower than those in non-fertilized soil. The PE was decreased at the low nitrogen fertilizer level but increased at the high nitrogen fertilizer level. The principal component analysis (PCA) of phospholipid fatty acids (PLFAs) indicated that the soil microbial community structure was greatly affected by the long-term fertilization models and combined straw and nitrogen fertilizer application. Moreover, the content of PLFAs in soil microorganisms, namely, bacteria and fungi, were remarkably increased by the straw plus nitrogen fertilizer (values increased by 40.3%–53.0%, 41.1%–62.6%, and 60.5%–148.6% compared with control), but levels were not significantly affected by nitrogen fertilizer levels alone. The ratios between PLFAs of soil gram-positive and gram-negative bacteria (G<sup>+</sup>/G<sup>-</sup>) decreased and were stable at around 0.8. The structure equation models (SEM) demonstrated that the combination of straw and nitrogen affected the soil gram-positive and gram-negative bacteria structure and increased the soil DOC content, which promoted the decomposition of straw and affected the

收稿日期: 2018-10-22; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502404); 国家自然科学基金项目(31870503, 41671298)

作者简介: 徐学池(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态与农业环境, E-mail: xuxuechi16@mails.ucas.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: hbjpjh@isa.ac.cn

mineralization of SOC. These results indicate that straw returning plus low nitrogen fertilizer can improve the SOC sequestration capacity in karst farmland.

**Key words:** nitrogen; straw returning; priming effect; long-term fertilization; isotope

秸秆还田是增加土壤有机碳含量的重要农业措施<sup>[1]</sup>, 其效率受众多因素影响, 主要包括秸秆还田量、施肥水平、土壤性质和微生物群落组成等<sup>[2, 3]</sup>. 秸秆还田配施氮肥可为微生物提供充足氮素, 促进秸秆分解, 影响土壤有机碳周转<sup>[2]</sup>. Li 等<sup>[3]</sup>的研究发现, 土壤 MBC、DOC 含量以及氮素有效性主要影响秸秆和土壤有机碳矿化. 目前研究表明长期单施无机肥、秸秆与无机肥配施显著改变土壤微生物群落组成与结构、提高土壤肥力<sup>[4, 5]</sup>, 但对秸秆碳分解和土壤有机碳矿化的影响仍不明确.

氮素是农业生产需求量最大的营养元素<sup>[6]</sup>, 目前全球农田施氮量普遍增加, 不仅易造成土壤酸化、硝酸盐淋失等问题, 而且影响土壤碳循环<sup>[7]</sup>. 由于土壤碳库是陆地生态系统最大碳库, 即使其碳储量变化很小, 对大气 CO<sub>2</sub> 浓度仍造成深远影响<sup>[8]</sup>, 因此有必要深入研究氮素对土壤有机碳矿化、固定的影响机理. 研究表明氮素对土壤有机碳矿化存在积极或消极影响, 如 Conde 等<sup>[9]</sup>的研究发现, 氮肥促进盐碱旱地秸秆和土壤有机碳的矿化; Meyer 等<sup>[10]</sup>发现高水平氮素施入缺氮土壤中降低土壤有机碳矿化速率, 增加有机碳固存; Li 等<sup>[3]</sup>的研究发现氮素配施降低黑麦草还田引起的激发效应强度, 可见不同研究者得到的研究结果不尽相同. 以上研究结果不一致的原因可能是土壤理化性质差异、土壤微生物群落结构变化及其利用外源物料偏好等<sup>[11]</sup>.

土壤性质及微生物特征是影响外源碳矿化及氮素响应的关键因素<sup>[2]</sup>. 我国西南喀斯特地区面积约 55 万 km<sup>2</sup>, 是世界上最大的喀斯特区域面积之一<sup>[12]</sup>, 由于其特殊地质背景, 土壤具有富钙偏碱、土层浅薄和基岩裸露面积大等特点<sup>[13]</sup>, 明显有别于同纬度非喀斯特地区发育的土壤, 其生态环境脆弱, 农田土壤有机碳及其活性组分含量易受人为活动如施肥等影响<sup>[13]</sup>. 另一方面, 长期施肥造成土壤养分差异显著<sup>[14]</sup>, 微生物群落、功能及代谢机制会

发生特异性变化, 进而影响外源碳分解及土壤固碳. 因此, 研究长期施肥模式下外源碳分解及喀斯特土壤微生物特征, 对该区域农田土壤管理具有重要的指导意义. 目前, 不少研究表明秸秆与氮素配施主要通过改变土壤细菌群落组成和结构多样性, 从而影响秸秆和土壤有机碳周转<sup>[15~17]</sup>, 而关于喀斯特农田长期不同施肥模式下秸秆与氮素配施对土壤有机碳周转的影响还不明确. 因此, 本研究以典型喀斯特旱地长期施肥定位试验的 3 种长期施肥处理(不施肥、无机肥、秸秆与无机肥配施)的土壤为研究对象, 采用室内培养结合<sup>13</sup>C 示踪技术, 设置添加秸秆配施 3 种氮素水平, 探讨秸秆配施不同水平氮素对喀斯特长期施肥土壤有机碳矿化的影响及微生物机制, 以期为合理管理喀斯特农田秸秆还田与施肥等农艺措施提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 试验土壤

土壤样品采自中国科学院环江喀斯特生态系统观测生态站喀斯特长期施肥定位试验点(24°43' ~ 24°45'N, 108°18' ~ 108°20'E), 属于亚热带季风气候区, 年平均气温 17.2℃, 年平均降雨量为 1 750.0 mm. 中国科学院亚热带农业生态研究所于 2007 年建立棕色石灰土旱地玉米与大豆轮作的长期施肥定位试验, 结合当地农业实际生产情况, 设置 6 种施肥处理, 每种处理 4 个重复, 按随机区组设计排列, 小区间用水泥板隔离(埋入深度 ≥ 30 cm). 选取 3 种长期施肥处理土壤进行研究, 分别为不施肥(CK)、无机肥(NPK: 玉米每季 20.0 g·m<sup>-2</sup> 无机氮肥、9.0 g·m<sup>-2</sup> 无机磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和 12.0 g·m<sup>-2</sup> 无机钾肥(K<sub>2</sub>O), 大豆每季 2.25 g·m<sup>-2</sup> 无机氮肥、6.0 g·m<sup>-2</sup> 无机磷肥和 6.75 g·m<sup>-2</sup> 无机钾肥)以及秸秆与无机肥配施(NPKS: 按钾素计算, 不足 60% 的氮磷用无机肥补充), 土壤基本理化性质如表 1 所示.

表 1 试验土壤基本理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Basic properties of the tested soils

土壤类型	pH	有机碳 /g·kg <sup>-1</sup>	DOC /mg·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>	Olsen 磷 /mg·kg <sup>-1</sup>	交换性钾 /mg·kg <sup>-1</sup>	交换性钙 /mmol·L <sup>-1</sup>	交换性镁 /mmol·L <sup>-1</sup>	土壤质地
CK	7.1	23.2c	4.24	1.91	0.80b	1.17	121.9c	9.5c	84.7c	1.5a	22.2	壤土
NPK	7.2	24.2b	4.69	2.05	1.12a	1.00	133.5b	22.4b	261.3a	1.4b	23.2	壤土
NPKS	7.2	26.1a	5.21	2.13	1.10a	0.94	157.3a	27.2a	172.0b	1.5a	23.4	壤土

1) 同一列不同小写字母代表同一土壤、不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 无小写字母的代表差异不显著( $P > 0.05$ )

### 1.1.2 试验秸秆来源

将苗期玉米移栽到密封培养箱中<sup>[18]</sup>, 通过  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和  $\text{Na}_2^{13}\text{CO}_3$  ( $^{13}\text{C}$  99%: Cambridge Isotope Laboratories, Andover, MA, 美国) 酸碱中和反应产生  $^{13}\text{CO}_2$ , 通入培养箱中. 当箱中  $\text{CO}_2$  含量高于  $380.0 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$  时,  $\text{NaOH}$  溶液自动吸收多余  $\text{CO}_2$ . 培养箱内外均置有温度和湿度传感器 (SNT-963, 青岛), 打开空调使箱内空气进行内循环, 将温度控制在与外界环境相差  $1^\circ\text{C}$  以内. 待玉米植株至成熟期, 标记结束. 将收获的玉米秸秆杀青、烘干, 切成  $1 \text{ cm}$  小段、混匀. 经稳定同位素质谱仪 (Thermo Scientific MAT 253, 美国) 测定秸秆  $^{13}\text{C}$  丰度为  $2.65\%$ , 碳氮元素分析仪 (Vario MAX CN, 德国) 测定秸秆 C/N 为  $14.8$ .

### 1.2 试验设计与土壤样品采集

2016年11月取耕作层(0~10 cm)新鲜土壤, 除去动植物残体等, 过  $2 \text{ mm}$  筛, 充分混匀, 置于  $4^\circ\text{C}$  冰箱保存, 试验处理前, 将土壤水分调至田间持水量含量的  $40\%$ , 在  $25^\circ\text{C}$  培养室预培养一周. 2017年3月进行3种长期施肥处理土壤的室内培养试验, 设置4个处理: 不添加秸秆和氮素(对照组, control)、添加玉米秸秆(S+N0: 仅秸秆  $2.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 以干基土计, 下同)、添加玉米秸秆和低水平氮素(S+N1: 按照氮用量  $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、土壤容重  $1.15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和耕层厚度  $20 \text{ cm}$  计算出硝酸铵添加量为  $214.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和添加玉米秸秆和高水平氮素(S+N2: 按照氮用量  $400 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  计算出硝酸铵添加量为  $571.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 每处理设8个重复, 4个用于矿化试验采气, 4个用于采集土样, 具体培养方法如下: 取经预培养相当于  $200 \text{ g}$  (以干基土计) 上述3种长期施肥处理土壤, 加入  $^{13}\text{C}$  标记的玉米秸秆以及硝酸铵溶液, 与土混匀, 分别装入  $1 \text{ L}$  广口瓶中, 置于恒温  $25^\circ\text{C}$  遮光培养  $100 \text{ d}$ , 分别于  $1、3、5、7、10、15、20、25$  和  $30 \text{ d}$  以及之后每  $10 \text{ d}$  采一次气体, 测定气体中  $\text{CO}_2$  和  $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ ; 培养结束后采集土样, 分析理化性质, 其中 DOC 含量特征如表 2 所示, 剩下土壤冷冻干燥后于  $-80^\circ\text{C}$  冰箱保存, 用于土壤磷脂脂肪酸 (PLFA) 含量测定.

表 2 培养结束后土壤 DOC 含量的变化<sup>1)</sup>

Table 2 Soil DOC content after incubation

土壤类型	control	S+N0	S+N1	S+N2
CK	8.26c	12.43b	30.81a	14.24b
NPK	10.12b	33.99a	21.81a	29.14a
NPKS	9.59a	9.41a	14.52a	16.59a

1) 同一行不同小写字母代表同一土壤、不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 1.3 样品分析

#### 1.3.1 土壤基本理化性质的测定

土壤 pH 用蒸馏水浸提后 Metro-pH 320 计测定; 土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定; 土壤全氮采用半微量开氏法测定, 土壤全磷采用  $\text{NaOH}$  熔融-钼锑抗比色法测定, 土壤全钾采用  $\text{NaOH}$  熔融-火焰光度法测定, 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定, 土壤 Olsen 磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定, 土壤交换性钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定, 土壤交换性钙和交换性镁采用原子吸收分光光度法测定, 土壤质地采用比重计法测定<sup>[19]</sup>, 土壤 DOC 含量采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪测定<sup>[20]</sup>.

#### 1.3.2 气体的测定

$\text{CO}_2$  含量采用气相色谱仪 (Agilent GC 6890, 美国) 测定,  $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$  含量采用稳定性同位素质谱仪 (Thermo Scientific MAT 253, 美国) 测定<sup>[21]</sup>.

#### 1.3.3 土壤微生物群落结构测定

土壤 PLFA 测定根据 Bligh-Dyer 方法提取<sup>[22]</sup>, 采用美国 MIDI 公司 PLFA 数据库对提取物进行定量和定性分析<sup>[22]</sup>, 代表细菌的脂肪酸标记物:  $i15:0$ 、 $a15:0$ 、 $i16:0$ 、 $16:17c$ 、 $17:0$ 、 $i17:0$ 、 $a17:0$ 、 $cy17:0$ 、 $18:17c$ 、 $18:15c$ 、 $cy19:0$  和  $16:02OH$ <sup>[23]</sup>; 代表真菌的脂肪酸标记物:  $16:5c$ 、 $18:36$ 、 $9c$  和  $18:19c$ <sup>[23, 25]</sup>,  $a17:0$  和  $i17:0$  代表革兰氏阳性菌 ( $G^+$ )<sup>[24, 26]</sup>,  $16:17c$ 、 $cy17:0$ 、 $18:17c$  和  $cy19:0$  代表革兰氏阴性菌 ( $G^-$ )<sup>[23, 26]</sup>.

土壤 PLFA 提取步骤如下: 首先将新鲜土壤冷冻干燥, 后称取  $3.0 \text{ g}$  土壤于  $50 \text{ mL}$  玻璃离心管中, 按顺序加入定量柠檬酸缓冲液、氯仿提取液、甲醇提取液, 涡旋振荡后离心, 收集溶液, 重复两次; 然后加入定量氯仿、丙酮、甲醇, 置于 SPE 柱上进行萃取得到磷脂, 接下来加入内标; 最后加入定量甲醇甲苯、氢氧化钾-甲醇溶液、正己烷-氯仿混合液、醋酸和离子水, 转移至 GC 内插管, 采用色谱仪测定.

#### 1.4 数据处理

计算方法如下<sup>[3]</sup>:

$$\text{CO}_2 \text{ 总排放量} = \text{CO}_2 \text{ 排放速率} \times \text{培养时间}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 总排放量来自秸秆的比例} = \frac{\text{培养气体}^{13}\text{C丰度} - \text{control 处理气体}^{13}\text{C丰度}}{\text{试验秸秆}^{13}\text{C丰度} - \text{土壤自然丰度}}$$

$$\text{秸秆 CO}_2 \text{ 总排放量} = \text{CO}_2 \text{ 总排放量来自秸秆的比例} \times \text{CO}_2 \text{ 总排放量}$$

$$\text{土壤 CO}_2 \text{ 总排放量} = \text{CO}_2 \text{ 总排放量} \times (1 - \text{CO}_2 \text{ 总排放量来自秸秆的比例})$$

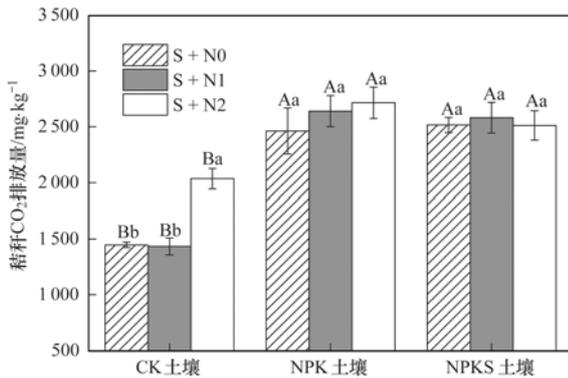
激发效应 = 土壤 CO<sub>2</sub> 总排放量 - control 处理下  
土壤 CO<sub>2</sub> 排放量

图表制作采用 Excel 2007 和 Origin 8.0, 利用 Canoco 4.5 进行土壤微生物群落结构多样性的 PCA 分析, 利用 Amos 21.0 软件构建结构方程模型分析长期不同施肥模式和秸秆还田配施氮肥处理下, 土壤理化性质和微生物对秸秆和土壤有机碳矿化的综合影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田配施氮肥对秸秆有机碳矿化的影响

培养结束后秸秆 CO<sub>2</sub> 排放量范围为 1 433.7 ~ 2 582.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 且 NPK 和 NPKS 土壤的秸秆 CO<sub>2</sub> 排放量均显著高于 CK 土壤。氮素水平显著影响 CK 土壤的秸秆 CO<sub>2</sub> 排放, 且高水平氮素(S + N2)下秸秆 CO<sub>2</sub> 排放量较高, 而氮素水平对 NPK 和 NPKS 土壤的秸秆 CO<sub>2</sub> 排放影响不显著(图 1)。



图中不同大写字母代表不同土壤、同一处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母代表同一土壤、不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 1 秸秆 CO<sub>2</sub> 排放量

Fig. 1 Cumulative mineralization amount of straw organic carbon

### 2.2 秸秆还田配施氮肥对土壤激发效应的影响

培养结束后土壤单施秸秆(S + N0)引起的累积激发效应范围为 838.8 ~ 1 587.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 且 CK 土壤显著大于 NPK 和 NPKS 土壤。秸秆还田配施较低水平氮素(S + N1)显著降低激发效应, CK 和 NPKS 土壤尤为明显, 说明低水平氮素配施显著降低秸秆添加引起的累积激发效应。但配施的氮素水平较高时(S + N2), 土壤激发效应显著高于其他两个处理, 说明高水平氮素配施反而增大土壤激发效应(图 2)。

### 2.3 秸秆还田配施氮肥对微生物群落的影响

#### 2.3.1 土壤微生物群落磷脂脂肪酸含量

培养结束后土壤微生物群落结构特征如图 3 所示, 与 control 处理相比, 秸秆与氮素配施(S + N0、S + N1 和 S + N2)显著增加土壤总 PLFAs 质量摩尔浓度, 增幅为 40.3% ~ 53.0% [图 3(a)], 其中真

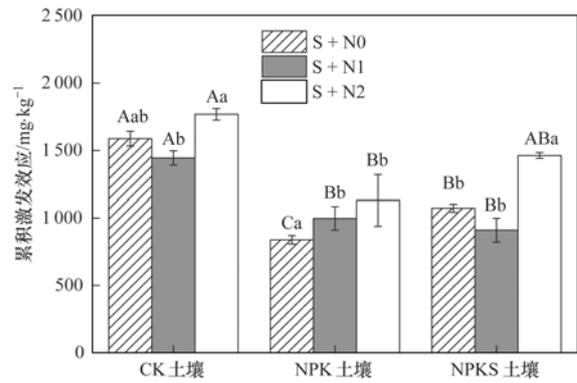


图 2 土壤原有有机碳矿化的累积激发效应

Fig. 2 Cumulative priming effect on SOC mineralization

菌和细菌 PLFA 质量摩尔浓度均显著增加, 增幅分别为 41.1% ~ 62.6%、60.5% ~ 148.6% [图 3(b) 和 3(c)], 但氮素水平对其影响不显著, 因此秸秆与氮素配施显著增加土壤微生物数量, 尤其是增加土壤真菌和细菌数量。

土壤革兰氏阳性菌/土壤革兰氏阴性菌 ( $G^+ / G^-$ ) 反映土壤饥饿压力, 其值越高表明土壤养分越贫瘠。与 control 处理相比, 秸秆与氮素配施处理(S + N0、S + N1 和 S + N2)土壤的  $G^+ / G^-$  偏低, 基本稳定在 0.8 左右, 因此秸秆与氮素配施提高土壤可利用性养分, 促进土壤微生物生长[图 3(d)]。

#### 2.3.2 土壤微生物群落结构特征

对各处理土壤真菌、革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌和放线菌进行 PCA 分析, 第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的方差贡献率分别为 72.53% 和 22.55%, 累积贡献率达到 95.08%, 因此前两个主成分足以代表大部分数据信息。由各样点在图 4 中分布可知, control 处理与其他处理样点分布较分散, CK 与 NPK 和 NPKS 土壤样点分布较分散, 说明长期施肥、秸秆与氮素配施显著改变土壤微生物群落结构, 主要表现在 control 处理与其他 3 个处理土壤的放线菌、真菌存在显著差异, CK 与 NPK 和 NPKS 土壤的真菌、革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌存在显著差异。

#### 2.4 影响秸秆和土壤有机碳矿化的关键因子

采用最大似然估计法拟合关于秸秆和土壤有机碳矿化的结构方程模型, 模型评价标准采用  $X^2$  检验、拟合优度检验(GFI)和近似误差均方根(RMSEA), 关于秸秆和土壤有机碳矿化的结构方程模型适配度指标分别为  $X^2 = 4.1$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.13$ ,  $GFI = 0.96$ ,  $RMSEA = 0.00$  与  $X^2 = 4.0$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.13$ ,  $GFI = 0.97$ ,  $RMSEA = 0.00$ , 均能解释秸秆和土壤有机碳矿化 86% 的变异, 其中秸秆还田配施氮肥、 $G^+ / G^-$  和土壤 DOC 含量对秸秆和土壤

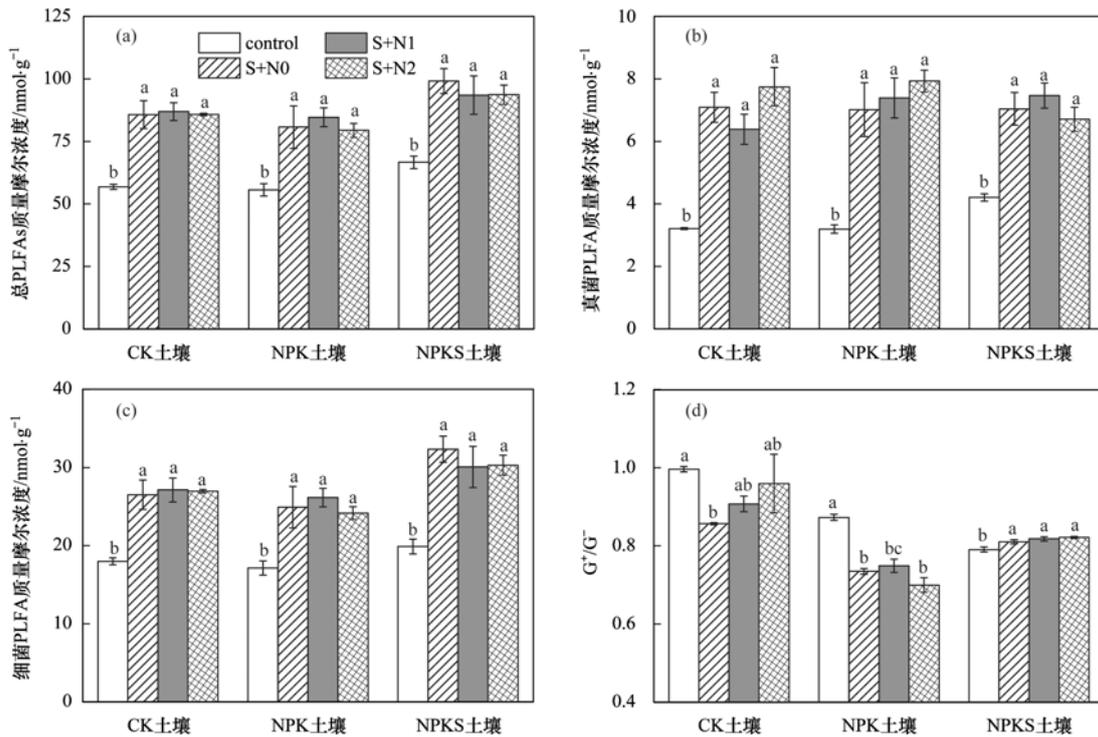


图3 土壤微生物群落结构特征

Fig. 3 Soil microbial community structure

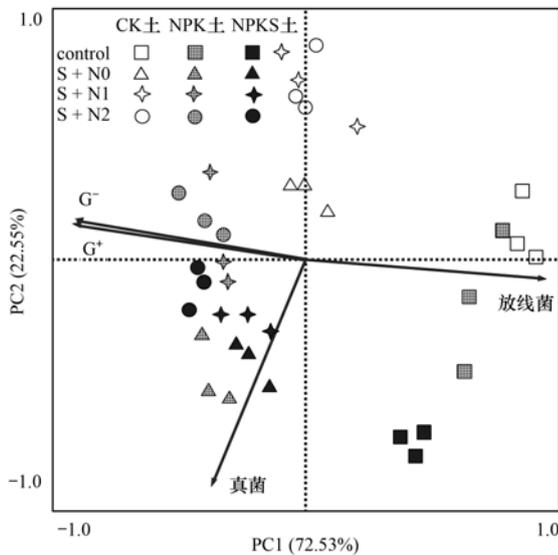


图4 土壤微生物群落结构的主成分分析

Fig. 4 PCA of the soil microbial community structure

有机碳矿化影响显著,且分别以秸秆还田配施氮肥(影响系数0.51)、 $G^+/G^-$ (影响系数-0.39)影响最显著,因此,秸秆与氮素配施通过增加土壤DOC含量,影响革兰氏菌群落,从而影响秸秆和土壤有机碳矿化(图5)。

### 3 讨论

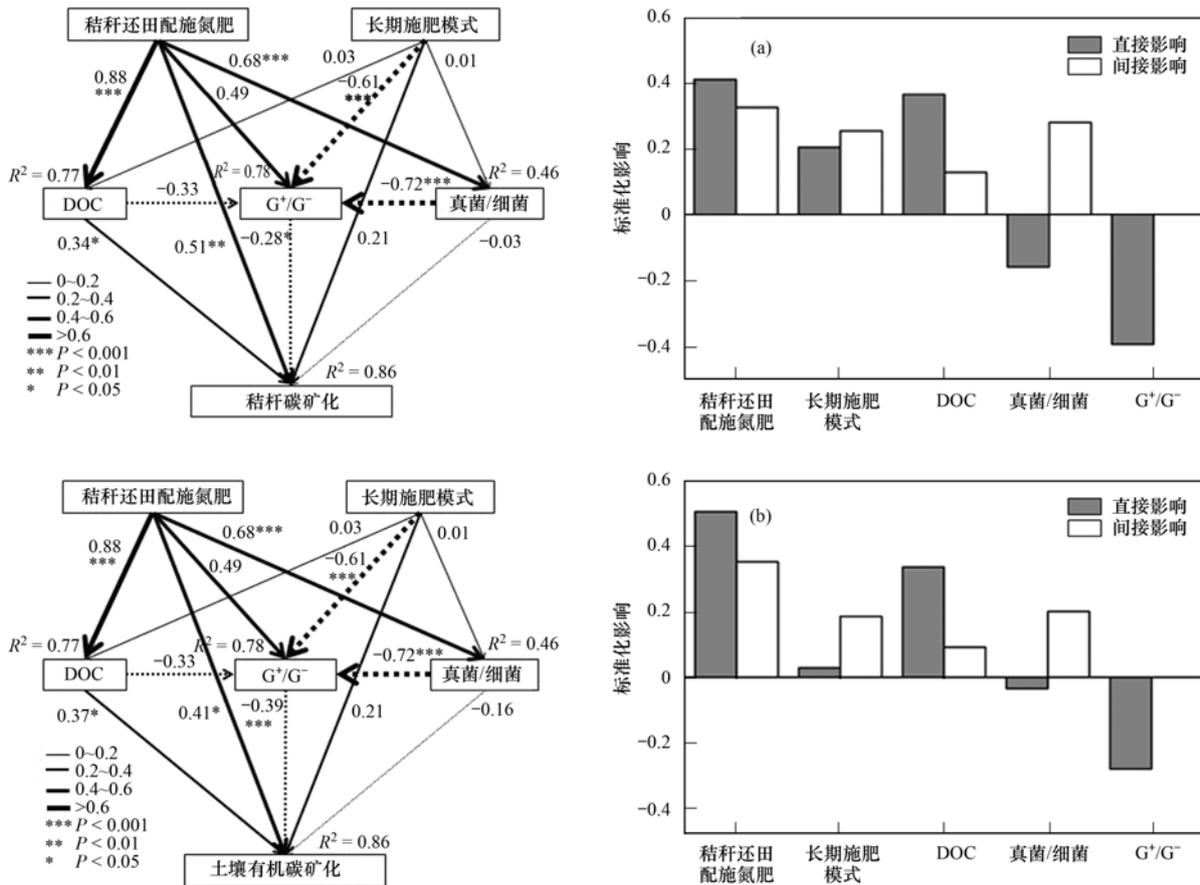
#### 3.1 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田秸秆和土壤有机碳矿化的影响

本研究表明对于不施肥土壤,秸秆还田配施高

水平氮素造成秸秆  $\text{CO}_2$  排放量增大,说明此时秸秆残留物的利用效率较低,与李平等<sup>[27]</sup>的研究结果一致,而黄容等<sup>[28]</sup>的研究表明高水平氮素抑制秸秆矿化,更有利于土壤有机碳固持,与本研究结果不一致的原因可能是喀斯特土壤pH相对偏高,外源氮素增加碱性土壤微生物含量,相反地限制酸性土壤微生物数量和活性<sup>[14]</sup>。对于长期施肥土壤,秸秆还田配施氮肥的水平对秸秆矿化影响不显著,原因可能是长期施肥提高土壤有机碳和养分含量(表1),显著高于长期不施肥土壤,而且土壤结构和孔隙性等物理性质可能受到改善<sup>[14]</sup>。因此在喀斯特农田进行秸秆还田时,建议根据土壤理化性质等确定配施的氮素水平。

本研究发现低水平氮素配施降低秸秆添加引起的正激发效应,说明单施秸秆时土壤氮素有效性较低,微生物分解秸秆能力受限,从而促进微生物分解原有有机碳,释放氮素<sup>[3]</sup>,所以低水平氮素配施可提高秸秆利用效率,降低土壤激发效应,然而当氮素水平过高时,碳为微生物生长的限制性因子,土壤激发效应反而增大。

本研究发现不施肥土壤的秸秆  $\text{CO}_2$  排放量均显著低于长期施肥土壤,说明不施肥土壤对秸秆利用效率相对较高,这可能与土壤肥力等因素有关,因此与长期施肥土壤相比,不施肥土壤更需要进行秸秆还田等农田管理措施。另外,本研究发现不施肥土壤的激发效应均显著大于长期施肥土壤,这是



实线和虚线箭头分别代表显著的正效应和负效应；箭头旁边的数字代表回归系数；

箭头的粗细代表回归关系强度； $R^2$  表示有关变量的共同解释度

图5 结构方程模型中影响秸秆和土壤有机碳矿化的关键因子

Fig. 5 SEM describing the key factors influencing the mineralization of straw and soil organic carbon

由于长期施肥促进土壤有机质积累、丰富其化学抗性官能团结构，使土壤具有较强缓冲、保肥能力<sup>[29]</sup>，也进一步说明提高土壤固碳能力需要长期过程。

### 3.2 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田土壤微生物群落的影响

本研究发现土壤细菌尤其是革兰氏菌驱动秸秆和土壤有机碳矿化，与 Ramirez 等<sup>[15]</sup>的结果一致，而且已有研究表明秸秆还田提高有效性较高、易被微生物利用的土壤活性有机碳含量，尤其是促进土壤 DOC 中类胡敏酸和富里酸物质积累<sup>[29]</sup>，从而影响微生物代谢，与本研究结构方程模型结果一致。

本研究 PCA 结果，表明秸秆与氮素配施造成土壤放线菌和真菌群落结构发生变化，原因可能是秸秆和氮素为土壤提供充足碳源和不同形态的氮素，从而改善土壤微生物群落结构，增加有益放线菌和真菌的数量<sup>[30]</sup>。进一步分析发现培养结束后，秸秆配施不同水平氮素处理的土壤微生物总量、真菌和细菌数量差异不显著(图4)，而一些学者研究发现高水平氮素促进潮土、棕壤等的革兰氏阴性菌

和真菌生长<sup>[16, 17]</sup>，存在差异的原因可能是喀斯特土壤处于特殊的地球化学背景下，主要由石灰岩或白云岩发育而来<sup>[13]</sup>，而且氮素有效性较高(表1)，试验土壤微生物生长和繁殖主要受到碳限制，与 Chen 等<sup>[31]</sup>通过化学计量学方法研究发现喀斯特农田棕色石灰土受碳限制的结果一致，说明喀斯特土壤对外源碳氮的响应有别于非喀斯特土壤，这对喀斯特农田土壤的资源可利用性研究具有重要价值。

本研究结果表明长期施肥土壤与不施肥土壤的微生物群落结构差异主要表现在真菌、革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌，与王伟华等<sup>[32]</sup>的研究结果一致，而且 Yuan 等<sup>[33]</sup>的研究发现长期施肥显著增加土壤 *cbbl* 基因的微生物活性，对土壤固碳具有重要意义。而 Sun 等<sup>[5]</sup>的研究发现长期无机肥与秸秆配施对农田细菌群落影响不显著，存在差异的原因可能与土壤理化性质差异以及微生物利用外源物料偏好有关<sup>[11]</sup>。

## 4 结论

本研究通过同位素技术发现在喀斯特地区，低

水平氮素配施降低秸秆添加引起的农田土壤激发效应, 较高水平氮素配施反而增大, 而且长期施肥土壤的激发效应小于不施肥土壤, 因此在喀斯特农田施肥实践中, 秸秆还田配施低水平氮肥有利于土壤有机碳固持, 同时长期施肥提升喀斯特农田土壤缓冲、保肥能力; 秸秆还田配施氮肥主要通过增加土壤 DOC 含量、影响土壤革兰氏菌群落结构, 从而间接影响秸秆和土壤有机碳矿化, 因此, 喀斯特农田土壤细菌(尤其是革兰氏菌)是驱动秸秆还田效果的关键微生物群落, 通过农业管理措施调控土壤 DOC 含量或许是喀斯特区农田土壤可持续利用的有效策略。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Liu C, Lu M, Cui J, *et al.* Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [ J ]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(5): 1366-1381.
- [ 2 ] Chen R R, Senbayram M, Blagodatsky S, *et al.* Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories [ J ]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(7): 2356-2367.
- [ 3 ] Li L J, Zhu-Barker X, Ye R Z, *et al.* Soil microbial biomass size and soil carbon influence the priming effect from carbon inputs depending on nitrogen availability [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **119**: 41-49.
- [ 4 ] Zhou J, Guan D W, Zhou B K, *et al.* Influence of 34-years of fertilization on bacterial communities in an intensively cultivated black soil in northeast China [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **90**: 42-51.
- [ 5 ] Sun R B, Zhang X X, Guo X S, *et al.* Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 9-18.
- [ 6 ] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: past, present, and future [ J ]. *Biogeochemistry*, 2004, **70**(2): 153-226.
- [ 7 ] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [ J ]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [ 8 ] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, *et al.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition [ J ]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(5): 315-322.
- [ 9 ] Conde E, Cardenas M, Ponce-Mendoza A, *et al.* The impacts of inorganic nitrogen application on mineralization of <sup>14</sup>C-labelled maize and glucose, and on priming effect in saline alkaline soil [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(4): 681-691.
- [ 10 ] Meyer N, Welp G, Bornemann L, *et al.* Microbial nitrogen mining affects Spatio-temporal patterns of substrate-induced respiration during seven years of bare fallow [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **104**: 175-184.
- [ 11 ] Drake J E, Darby B A, Giasson M A, *et al.* Stoichiometry constrains microbial response to root exudation- insights from a model and a field experiment in a temperate forest [ J ]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(2): 821-838.
- [ 12 ] Yan J H, Li J M, Ye Q, *et al.* Concentrations and exports of solutes from surface runoff in Houzhai Karst Basin, southwest China [ J ]. *Chemical Geology*, 2012, **304-305**: 1-9.
- [ 13 ] De Waele J, Gutiérrez F, Parise M, *et al.* Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review [ J ]. *Geomorphology*, 2011, **134**(1-2): 1-8.
- [ 14 ] Geisseler D, Scow K M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms-a review [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 54-63.
- [ 15 ] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes [ J ]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(6): 1918-1927.
- [ 16 ] Yevdokimov I V, Gättinger A, Buegger F, *et al.* Change in the structure and activity of a soil microbial community caused by inorganic nitrogen fertilization [ J ]. *Microbiology*, 2012, **81**(6): 743-749.
- [ 17 ] Ai C, Liang G Q, Sun J W, *et al.* Different roles of rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 30-42.
- [ 18 ] Zhu Z K, Ge T D, Liu S L, *et al.* Rice rhizodeposits affect organic matter priming in paddy soil: The role of N fertilization and plant growth for enzyme activities, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 369-377.
- [ 19 ] 鲍士旦. 土壤农化分析 [ M ]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-108.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] Wu J, O'Donnell A G. Procedure for the simultaneous analysis of total and radioactive carbon in soil and plant materials [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, **29**(2): 199-202.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] Salomonová S, Lamacova J, Rulík M, *et al.* Determination of phospholipid fatty acids in sediments [ J ]. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis Facultas Rerum Naturalium; Chemica*, 2003, **42**: 39-49.
- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] 李平, 郎漫, 李森, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 [ J ]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2360-2367.
- Li P, Lang M, Li M, *et al.* Short-term effects of different fertilization treatments on greenhouse gas emissions from northeast black soil [ J ]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2360-2367.
- [ 28 ] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 [ J ]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4694-4704.
- Huang R, Gao M, Li J C, *et al.* Effect of straw residues in combination with reduced fertilization rate on greenhouse gas

- emissions from a vegetable field [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4694-4704.
- [29] 罗璐, 周萍, 童成立, 等. 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 692-697.  
Luo L, Zhou P, Tong C L, *et al.* Study on mechanism of SOM stabilization of paddy soils under long-term fertilizations [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 692-697.
- [30] 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.  
Wang F, Yuan T, Gu S K, *et al.* Effects of organic and inorganic slow-release compound fertilizer on different soils microbial community structure [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1461-1467.
- [31] Chen H, Li D J, Mao Q G, *et al.* Resource limitation of soil microbes in karst ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 241-248.
- [32] 王伟华, 刘毅, 唐海明, 等. 长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 430-437.  
Wang W H, Liu Y, Tang H M, *et al.* Effects of long-term fertilization regimes on microbial biomass, community structure and activity in a paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 430-437.
- [33] Yuan H Z, Ge T D, Zhou P, *et al.* Soil microbial biomass and bacterial and fungal community structures responses to long-term fertilization in paddy soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, **13**(5): 877-886.

## CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing .....	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing .....	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction .....	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin .....	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes .....	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant .....	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method .....	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather .....	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China .....	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016 .....	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017 .....	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring .....	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province .....	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China .....	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River .....	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments .....	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches .....	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands .....	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir .....	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China .....	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City .....	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo .....	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province .....	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area .....	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems .....	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer .....	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir .....	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin .....	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir .....	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir .....	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures .....	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation .....	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution .....	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar .....	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater .....	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant .....	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor .....	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes .....	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm .....	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area .....	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland .....	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N <sub>2</sub> O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field .....	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland .....	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area .....	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China .....	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model .....	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region .....	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China .....	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland .....	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil .....	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the <sup>15</sup> N-DNA-SIP Method .....	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification .....	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches .....	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting .....	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)