

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈镉改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响

孔培君^{1,2}, 郑洁^{1,2}, 栾璐¹, 陈紫云¹, 薛敬荣¹, 孙波¹, 蒋瑀霁^{1*}

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探讨长期不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响, 基于中国科学院鹰潭红壤生态实验站设置的不同秸秆还田方式长期定位试验(9 a), 选取不施肥(CK)、单施化肥(N)、化肥+秸秆(NS)、化肥+秸秆猪粪配施(NSM)和化肥+生物质炭(NB)这5个处理, 通过高通量测序技术研究旱地红壤细菌多样性和群落结构差异, 揭示了细菌群落对土壤有机碳矿化和玉米产量的影响机制。结果表明: ①不同秸秆还田处理下, 红壤化学性质发生显著变化, 其中NSM处理对旱地红壤肥力的综合提升效果最好, 并显著提高了玉米产量。②相比于CK和N处理, 秸秆还田处理均提高了细菌多样性。主成分分析发现, 秸秆还田处理改变了土壤细菌群落结构。③秸秆还田处理提高了土壤有机碳矿化能力, NSM处理的土壤有机碳矿化速率和累积矿化量最高。④相关性分析表明土壤AN/AP比值显著改变了细菌群落结构, 结构方程模型结果表明, 土壤AN/AP比可能通过影响土壤细菌多样性和群落结构, 间接提高了土壤有机碳矿化能力和玉米产量。本研究结果为协同提升旱地红壤生物多样性和耕地地力水平, 保障健康红壤生态系统和粮食安全提供了科学依据。

关键词: 秸秆还田; 旱地红壤; 细菌群落; 有机碳矿化; 玉米产量

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-6047-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103170

Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil

KONG Pei-jun^{1,2}, ZHENG Jie^{1,2}, LUAN Lu¹, CHEN Zi-yun¹, XUE Jing-rong¹, SUN Bo¹, JIANG Yu-ji^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To investigate the effects of straw returning on the bacterial community, organic carbon mineralization, and maize yield in an upland red soil, a long-term field experiment (established in 2011) with different types of straw returning in a corn mono-cropping system was performed at the National Agro-Ecosystem Observation and Research Station in Yingtan. The diversity and structure of the soil bacterial community were evaluated under five treatments (CK, no fertilizer; N, chemical fertilizer; NS, chemical fertilizer with straw; NSM, chemical fertilizer with straw and manure; and NB, chemical fertilizer with biochar) using high-throughput sequencing technology. The effect of the bacterial community on maize yield and soil organic carbon (SOC) mineralization was revealed. The results showed that fertilization treatments significantly changed the chemical properties of the red soil, such that the NSM treatment had the highest level of soil fertility and the maximal maize yield. The straw returning treatments (NS, NSM, and NB) significantly increased the bacterial diversity compared to that under the CK and N treatments. The principal component analysis (PCA) indicated that the straw returning treatments significantly affected the bacterial community structure. Straw returning significantly improved SOC mineralization capacity, with the maximal SOC accumulation and mineralization rate under the NSM treatment. Correlation analysis indicated that the structure of the soil bacterial community was greatly influenced by the AN/AP ratio. Structural equation modeling suggested that the AN/AP ratio may indirectly improve SOC mineralization capacity and maize yield by shaping the bacterial diversity and community structure. Our results provide the basis for synergistically improving the microbial diversity and soil fertility and protecting the health of red soil ecosystems and food security.

Key words: straw returning; dryland red soil; bacterial community; organic carbon mineralization; maize yield

中国作为一个农业大国, 每年秸秆产量近10亿吨, 约占世界秸秆总产量的25%^[1]。目前秸秆和畜禽粪污等废弃物中丰富的养分资源未能被合理利用^[2], 导致中国种养业废弃物资源化利用率较低, 这些资源施用于土壤将有助于提升土壤有机碳, 提高土壤微生物多样性和生态功能。土壤C/N比是影响土壤中碳氮循环的重要因素^[3], 土壤C/P比是衡量土壤有机质矿化释放或吸收固持磷潜力的重要指标, N/P比常用于土壤养分限制因子的诊断和养分限制阈值的确定^[4], 施用化肥和秸秆还田直接向土壤投入C、N和P等化学元素, 改变了土壤化学计

量比和碳循环过程, 进而强烈地影响生态系统和地球气候之间的相互作用^[5]。相比于单施化肥, 秸秆还田提高了土壤活性碳组分含量, 改变了土壤的养分含量和水气热分布, 显著增加了土壤微生物数量和有机碳矿化强度^[6~8], 从而影响作物产量^[9]。但秸秆还田对土壤肥力和作物产量的提升潜力相对有

收稿日期: 2021-03-18; 修订日期: 2021-05-13

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目(41922048); 江苏省杰出青年基金项目(BK20180049); 国家自然科学基金项目(41771297)

作者简介: 孔培君(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态学与农业环境, E-mail: kongpeijun@issas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yjiang@issas.ac.cn

限,因而需要在不同秸秆还田方式下,系统揭示土壤微生物群落的演变过程和调控机制,探明合理高效的秸秆还田方式,这对科学评判秸秆施用效果,调整秸秆配施措施具有指导意义。

东南丘陵区红壤带位于长江以南的 16 个省、区内,其中红壤面积 148 万 km^2 ,占全国土壤总面积的 15.4%,旱地农田约占红壤耕地总面积的 40%^[10].红壤生态系统在固碳减排和粮食生产方面扮演着重要角色,然而红壤区中低产田比例高(占 45%),面临着酸化加速、有机碳库容贫瘠以及生态功能退化等严重问题,亟需建立瘠薄红壤快速培肥的秸秆还田关键技术.在农业生产中,化肥在提高粮食生产的同时,造成了养分不均衡等土壤障碍问题,威胁到我国农业的可持续发展^[11].不平衡施肥对土壤微生物生物量有显著影响,如磷肥对好气性纤维素分解菌的生长具有抑制作用^[12].秸秆猪粪配施可为微生物提供速效氮,调节秸秆碳氮比促进其分解,影响土壤有机碳周转^[13].因此,通过秸秆还田协同提升微生物多样性和红壤肥力,是实现耕地健康、落实“藏粮于地”战略的核心任务之一。

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,在有机碳转化与固持、土壤肥力形成中发挥着重要作用^[14],土壤健康微生物区系是充分发挥生态服务功能的根本基础^[15].尽管当前微生物纯培养技术愈发完善,但仍有 99% 的细菌无法通过传统技术培养^[16].土壤矿化释放的 CO_2 是微生物分解土壤活性碳库(active carbon pool)和慢性碳库(slow carbon pool)的产物^[17].近年来高通量测序技术不断突破,已成为微生物生态学研究的重要手段.本研究通过 Illumina 高通量测序技术,依托旱地红壤秸秆还田长期定位试验,研究不同秸秆还田方式对红壤细菌多样性和群落结构的影响,揭示秸秆还田处理下土壤有机碳矿化和玉米产量的微生物调控机制,以期为建立合理的秸秆还田措施、快速提升红壤耕地健康提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验建于江西省鹰潭农田生态系统国家野外研究站内(116°55'E, 28°13'N).试验区属中亚热带季风气候,年均气温 17.8℃,年均降水量 1 795 mm,无霜期 262 d.供试土壤属于第四纪红黏土母质发育的典型红壤(黏化湿润富铁土),呈强酸性,有机质含量和氮磷库容低.本试验开始前表层土壤(0~20 cm)基本理化性质: pH 4.73、容重 1.31 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 ω (有机碳) 2.52 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (全氮) 0.40

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (碱解氮) 38.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (全磷) 0.23 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (速效磷) 0.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ω (速效钾) 47.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和阳离子交换量 12.12 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计

本试验供试玉米品种为苏玉 24 号,生物炭利用风干的玉米秸秆在生物质炭炉中 450℃ 厌氧环境下热解制备而成.秸秆还田长期定位试验设置 5 个处理:①对照(CK):不施肥;②单施化肥(N):NPK 化肥;③秸秆还田(NS):NPK + 秸秆还田;④秸秆猪粪配施(NSM):NPK + 秸秆猪粪配施(秸秆猪粪按 9:1 的碳输入比);⑤秸秆生物炭(NB):NPK + 秸秆生物炭.本试验为单作玉米种植系统,每个处理 3 次重复,每个试验小区的面积为 100 m^2 (5 m × 20 m),采用随机区组排列,各小区之间用水泥板隔离(埋入深度 ≥ 60 cm).自 2011 年起,除 CK 外,每年 4 月一次性施入尿素(N, 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、钙镁磷肥(P_2O_5 , 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和钾肥(K_2O , 60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$);按每年 1 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的碳输入量计算玉米秸秆、猪粪和秸秆生物炭的施用量,种植前随化肥一起施入土壤并翻耕混匀;试验期间不再施入任何肥料,以避免对秸秆还田效果产生干扰。

1.3 样品采集与分析

秸秆连续还田 9 a 后,于 2019 年在玉米收获期采集土壤样品,各小区用土钻按 S 型采样法采集耕层土(0~20 cm)的 10 个样点,混匀后立刻带回实验室.所有土样分为 3 份,1 份自然风干,用于测定土壤基本化学性质;1 份保存于 -80℃ 冰箱用于提取土壤 DNA;剩余 1 份 4℃ 保存,用于测定有机碳矿化潜力.土壤 pH 采用电位法测定(水:土 = 2.5:1),土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-容量法测定,全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,全磷(TP)采用碳酸钠熔融法测定,全钾(TK)采用氢氧化钠熔融法测定,碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定,有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[18].植株样采集:玉米成熟后去除边际株进行人工采摘,玉米籽粒风干后,计算每个试验小区的玉米产量。

1.4 DNA 提取及高通量测序

称取 0.5 g 土壤样品,采用 Fast DNA® SPIN Kit for Soil 试剂盒(MP Biomedicals,美国)参照试剂盒说明书的具体方法和步骤提取 DNA.利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组 DNA.使用对应细菌 16S rRNA 基因的 V4~V5 区域的特异性引物 515F(5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3')和 907R(5'-CCGTCGAATTCMTTTRAGTTT-3')进行 PCR 扩增(ABI GeneAmp® 9700 型 PCR 仪).PCR 反应混合

物 (20 μL) 包含 $5 \times \text{FastPfu}$ 缓冲液 4 μL , 正、反向引物 ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 各 0.25 μL , dNTP ($2.5 \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 2 μL , 10 ng 模板 DNA 和 FastPfu 聚合酶 0.4 μL , 添加无菌水至 20 μL . PCR 扩增反应程序为: 95°C 预变性 5 min; (94°C 变性 30 s, 55°C 退火 30 s, 72°C 延伸 1 min) $\times 35$ 个循环; 72°C 延伸 10 min, 采用 PCR 产物纯化试剂盒 (AXYGEN 公司) 纯化 PCR 产物, 通过 Illumina MiSeq PE300 平台进行高通量测序.

1.5 有机碳矿化培养试验

土壤有机碳矿化的测定采用室内恒温培养, 碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量^[19]: 称取 100 g 鲜土于 500 mL 培养瓶中平铺于瓶底, 根据土壤含水量及土壤最大持水量计算出最大持水量 60%~70% 时的需水量, 均匀加在铺于瓶底的土壤中. 然后将盛有 20 mL 浓度为 $0.5 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液的吸收瓶置于培养瓶内, 将培养瓶加盖密封, 放置在 25°C 恒温培养箱内, 黑暗条件下培养 1 个月. 按一定时间间隔 (培养第 1、2、3、5、8、12、16、21、26 和 31 d) 取出吸收瓶, 更换新的 NaOH 溶液按上述方法继续培养; 取出吸收瓶中的溶液完全洗入锥形瓶中, 加入 $1 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BaCl_2 溶液 20 mL 及两滴酚酞指示剂, 用浓度为 $0.4 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液滴定中和未耗尽的 NaOH, 直至红色消失, 通过 HCl 消耗量计算 CO_2 释放量.

$$\text{土壤有机碳矿化量 (以 } \text{CO}_2 \text{ 释放量计)} = c(\text{HCl}) \times (V_0 - V_1) \times 22 / 0.1$$

式中, $c(\text{HCl})$ 为盐酸浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), V_0 为空白滴定的体积 (mL), V_1 为盐酸消耗的体积 (mL).

1.6 数据处理

高通量测序结果使用 Quantitative Insights into Microbial Ecology (QIIME2) 流程进行分析^[20]. 将高通量测序得到的原始序列进行拼接, 拼接时碱基重叠数不少于 20 个, 碱基配对错误率为 0. 拼接后去除 q 值 (质量分数) 低于 25% 的低质量序列, 同时对序列质量进行质控和过滤, 区分样本后以 97% 的相似性进行 OTU (可操作分类单元) 聚类分析; 为了得到每个 OTU 对应的物种分类信息, 采用贝叶斯算法将每个 OTU 代表序列与 silva 数据库对比, 进行系统分类学分析, 并分别在各个分类水平: domain (域)、kingdom (界)、phylum (门)、class (纲)、order (目)、family (科)、genus (属) 和 species (种) 统计各样本的群落组成. 利用 R 软件 (version 3.6.2) 相关软件包 (vegan、randomForest 和 stats) 进行蒙特尔检验 (mantel test)、随机森林分析和主成分分析 (PCA), 计算细菌群落丰富度指数 (Chao1)、物种多

样性指数 (Shannon-Wiener index)、细菌群落组成、有机碳矿化速率和累计矿化量, 以揭示土壤因子、生物因子、有机碳矿化和玉米产量之间的关系. 组间差异物种分析采用 LEfSe (<http://huttenhower.org/galaxy/>) 进行. 在 SPSS 24.0 软件中进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 经过描述统计, 表明数据符合正态分布和方差齐性, 多重比较采用 LSD 法 (显著性水平为 $\alpha = 0.05$). 通过随机森林分析筛选显著影响 SOC 累积矿化量和玉米产量的土壤因子和生物因子, 在 AMOS 23 软件中构建结构方程模型 (SEM), 以分析土壤化学性质和微生物群落对土壤有机碳矿化和玉米产量的综合影响.

2 结果与分析

2.1 土壤化学性质与玉米产量

秸秆还田对旱地红壤化学性质产生了显著影响 (表 1). 与 CK 处理相比, N 处理下土壤 pH 降低至 4.51, NS 和 NSM 处理土壤 pH 降低至 4.44 和 4.50, 而 NB 处理的土壤 pH 降低至 4.53. 与 CK 处理相比, N、NS、NSM 和 NB 处理均提高了土壤 SOC、TN、TP 和 AN, 其中 NB 处理的 SOC 比 CK 和 N 处理增加了 155% 和 97%; N、NS 和 NB 处理显著提高了土壤 TP, 分别比 CK 处理增加了 79%、88% 和 75%; NSM 处理显著提高了土壤 TN、TP 和 AN, 其中 TN 分别比 CK 和 N 处理增加了 81% 和 36%, TP 增加了 187% 和 60%, AN 增加了 69% 和 35%. 秸秆还田下土壤速效养分 AP 和 AK 增加更为显著 ($P < 0.05$), NSM 处理的 AP 分别比 CK 和 N 处理增加了 35.66 倍和 4.86 倍, AK 增加了 152% 和 35%. 此外, 秸秆还田改变了土壤化学计量比 (图 1). 相较于 CK 和 N 处理, NB 处理显著提高了 TC/TN 比值 ($P < 0.05$); 与 CK 处理相比, N 和 NSM 处理显著降低了土壤 TC/TP 比值 ($P < 0.05$), 而 NB 处理下 TC/TP 比值变化趋势相反; 相较于 CK 处理, N、NS 和 NSM 处理均显著降低了土壤 TN/TP 比值 ($P < 0.05$), 其中 NSM 的效果最为显著; 与 CK 处理相比, 3 种秸秆还田处理显著降低了土壤 AN/AP 比值 ($P < 0.05$). 相比 CK 和 N 处理, 3 种秸秆还田处理均提高了玉米产量, 其中 NSM 处理下玉米产量的提高效果最明显, 分别比 CK 和 N 处理提高了 32.08 倍和 3.60 倍.

2.2 土壤细菌多样性与群落组成

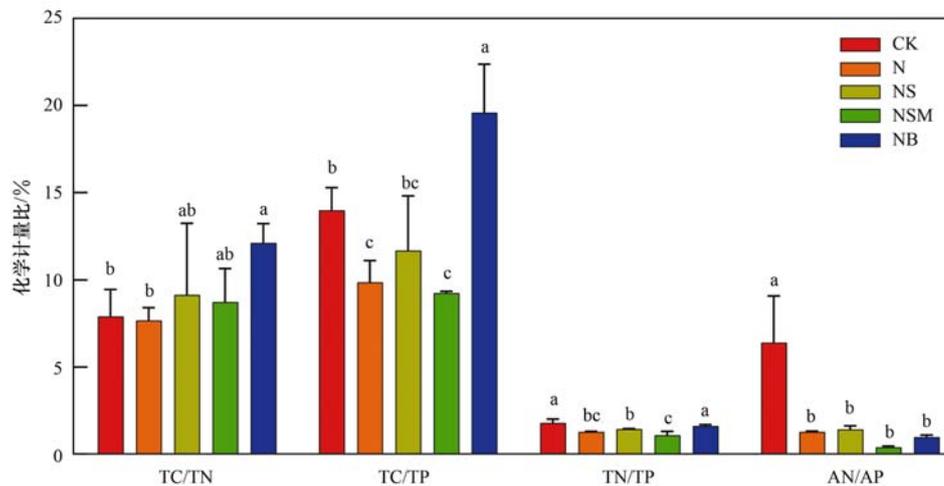
不同施肥处理改变了红壤细菌群落多样性 (图 2), N 处理降低了土壤细菌多样性, 而秸秆还田提高了细菌多样性. NS 处理的红壤细菌丰富度指数分别比 CK 和 N 处理提高了 15.78% 和 14.52%, NSM 处

表 1 不同处理条件下的红壤化学性质和玉米产量¹⁾

Table 1 Soil chemical properties and maize yield under different treatments

处理	pH	SOC /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	AN /mg·kg ⁻¹	AP /mg·kg ⁻¹	AK /mg·kg ⁻¹	产量 /kg·hm ⁻²
CK	4.70 ± 0.01a	3.32 ± 0.39b	0.42 ± 0.20b	0.24 ± 0.02c	13.31 ± 0.36c	1.36 ± 0.37c	59.33 ± 0.67d	211 ± 58c
N	4.51 ± 0.02b	4.28 ± 0.34b	0.56 ± 0.15b	0.43 ± 0.01b	16.59 ± 0.74b	8.51 ± 0.65b	111.00 ± 4.58c	1938 ± 870bc
NS	4.44 ± 0.02c	5.23 ± 0.89b	0.60 ± 0.52a	0.45 ± 0.03b	19.3 ± 1.62a	8.02 ± 1.38b	131.33 ± 3.33b	2704 ± 840b
NSM	4.50 ± 0.03b	6.40 ± 0.23a	0.76 ± 0.95a	0.69 ± 0.03a	22.44 ± 1.17a	49.86 ± 1.19a	149.67 ± 1.67a	6984 ± 271a
NB	4.53 ± 0.02b	8.45 ± 1.35a	0.69 ± 0.78a	0.42 ± 0.04b	20.59 ± 0.18a	8.67 ± 1.84b	143.33 ± 6.01a	3784 ± 569b

1) 同一列中不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)



同一组柱形图上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同处理下土壤化学计量比的变化

Fig. 1 Changes in soil stoichiometric ratio under different treatments

理的红壤细菌丰富度指数分别比 CK 和 N 处理提高了 23.00% 和 21.66%, NB 处理的红壤细菌丰富度指数分别比 CK 和 N 处理提高了 16.90% 和 15.63%. 相较于 N 处理, NS、NSM 和 NB 处理均显

著提高了土壤细菌群落物种多样性指数 ($P < 0.05$), 分别提高了 3.41%、3.83% 和 2.83%.

高通量测序结果表明, 细菌群落中共有 30 个门, 69 个纲, 146 个目, 208 个科和 435 个属类细菌. 门水平上各处理中绿弯菌门 (Chloroflexi, 30.46%)、变形菌门 (Proteobacteria, 23.69%)、酸杆菌门 (Acidobacteria, 15.06%) 和放线菌门 (Actinobacteria, 13.98%) 为优势菌群 [图 3 (a)]. 科水平上纤线杆菌科 (Ktedonobacteraceae, 14.22%)、伯克氏菌科 (Burkholderiaceae, 4.35%)、酸杆菌科 (Acidobacteriaceae, 3.61%)、Solirubrobacteraceae (2.47%) 黄色杆菌科 (Xanthobacteraceae, 2.38%) 和 Solibacteraceae 为优势菌科 [图 3 (b)]. NSM 处理显著提高了伯克氏菌科伯克氏菌科 (Burkholderiaceae) 的相对丰度 ($P < 0.05$), 分别比 CK 和 N 处理增加了 57% 和 62%. 主成分分析中前 3 个主成分轴共解释了 58.3% 的总方差 (图 4). 各处理与 CK 处理有显著差异 ($P < 0.05$), 其中 NSM 与 NB 处理聚为一类, N 与 NS 处理聚为一类. 组间群落差异分析发现 (图 5), CK 处理显著性差异物种为纤线杆菌目 (Ktedonobacterales) 和粘球菌目 (Mycococcales), N

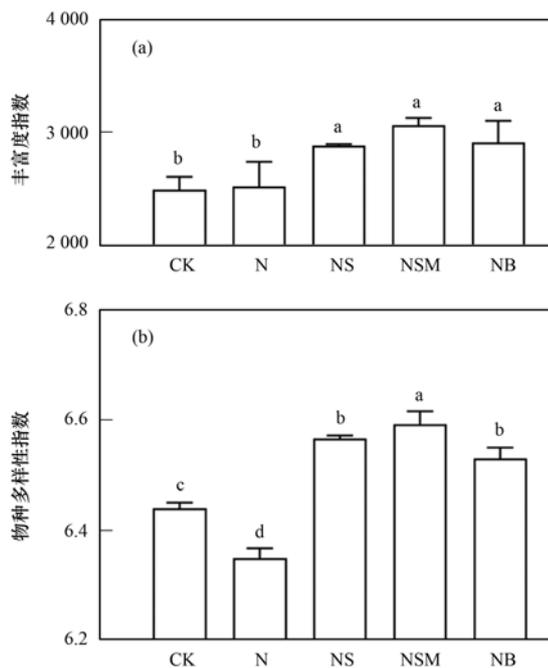


图 2 不同处理下土壤细菌多样性指数

Fig. 2 Soil bacterial diversity relative to treatment

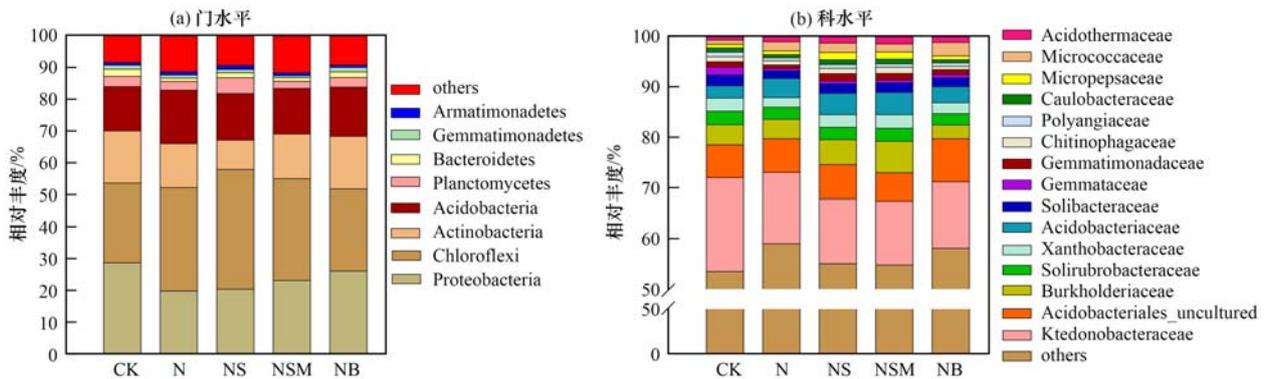


图 3 不同处理下土壤细菌在门水平和科水平上优势物种的相对丰度

Fig. 3 Dominant species relative abundance at the phylum and family levels under different treatments

处理中显著性差异物种为戴氏菌属 (*Dyella*)、黄单胞菌目 (*Xanthomonadales*) 和 *Rhodanobacteraceae*, NS 处理中显著性差异物种为链霉菌科 (*Streptomycetales*) 和 γ -*Proteobacteria*, NSM 处理中显著性差异物种为酸杆菌科 (*Acidobacteriaceae*)、*Frankiales*、*Burkholderiaceae* 和黄色杆菌科 (*Xanthobacteraceae*), NB 处理中显著性差异物种为酸杆菌目 (*Acidobacteriales*) 和微球菌科 (*Sinomonas*)。

2.3 土壤有机碳矿化速率和累积矿化量

不同施肥处理下, SOC 矿化速率随着培养时间表现出先增后降的趋势, 在第 3 d 达到最大速率后, 矿化速率逐渐变缓 [图 6(a)]. 不同处理间 SOC 矿化速率主要在前 5 d 呈现差异, 其中 NSM 处理 [$31.65 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 矿化速率最高, 其次为 NB 处理 [$23.61 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]、NS [$23.09 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]

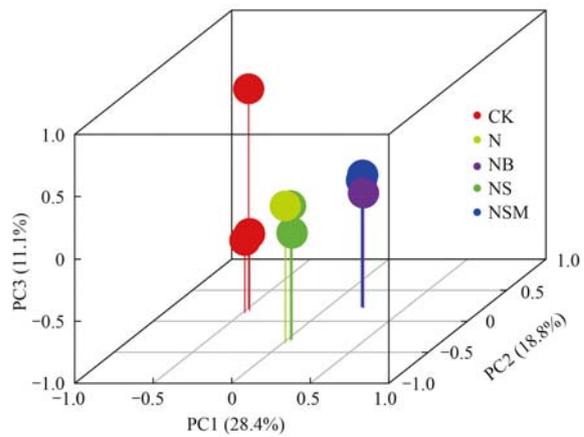


图 4 土壤细菌群落的 PCA 分析

Fig. 4 Principal component analysis of soil microbial community relative to treatment

和 N 处理 [$22.13 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 均明显高于 CK 处理 [$15.99 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, $P < 0.05$]. 在整个培养

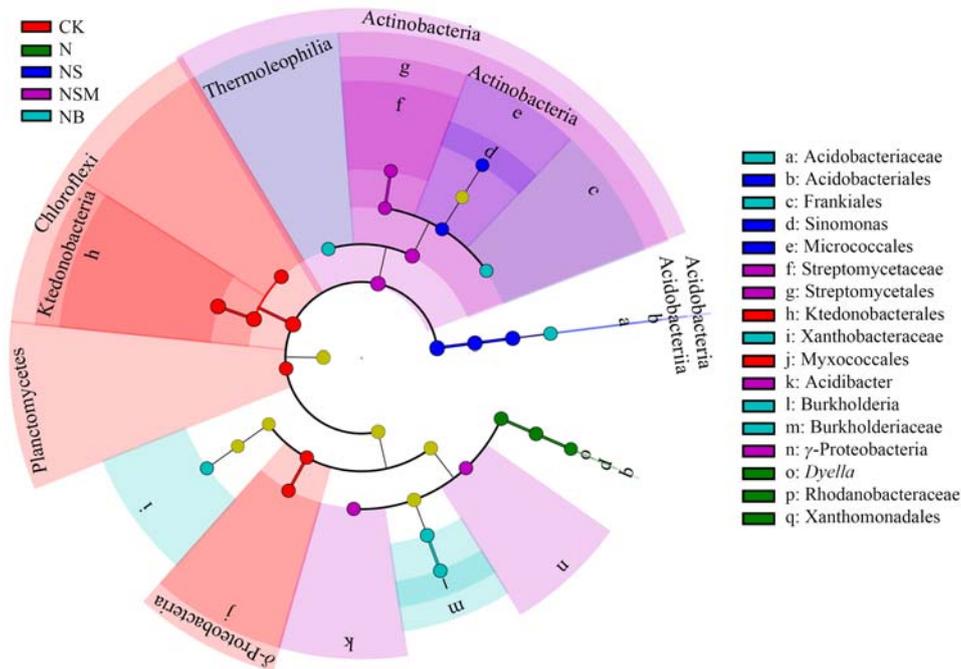


图 5 土壤细菌群落的 LEfSe 分析

Fig. 5 LDA Effect Size analysis of soil microbial community relative to treatment

过程中,NSM 处理下 SOC 平均矿化速率分别比 CK 和 N 处理提高了 92.83% 和 85.32%。在培养第 3 d 后,各处理均达到最大 SOC 矿化速率,其中 NSM 处理比 CK 和 N 处理分别高 78.48% 和 22.61%。30 d

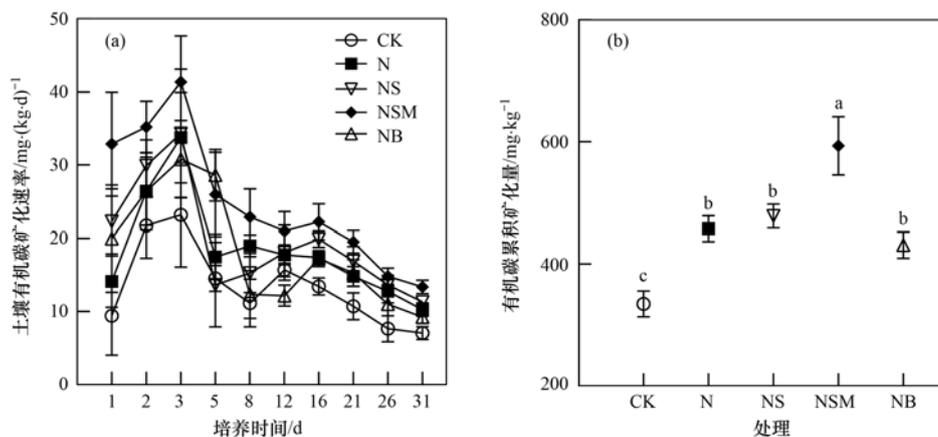


图 6 不同处理下土壤有机碳矿化速率与累积矿化量

Fig. 6 Mineralization rate of soil organic carbon and cumulative organic carbon mineralization relative to treatment

2.4 土壤化学性质、土壤细菌群落、SOC 矿化与玉米产量关系

Mantel Test 分析表明[图 7(a)],相异矩阵系数 (Bray-Curtis dissimilarity) 随着土壤 AN/AP 比差异的增大而提高 ($r = 0.673, P = 0.001$), 土壤 AN/AP 比显著影响微生物群落组成. 不同细菌类群对土壤化学计量比变化的响应不同[图 7(b)], Chloroflexi ($r = 0.546, P = 0.001$) 和 δ -Proteobacteria ($r = 0.777, P < 0.001$) 的相对丰度与 AN/AP 比呈显著正相关, Actinobacteria ($r = -0.721, P < 0.001$) 和 γ -Proteobacteria ($r = -0.613, P < 0.001$) 的相对丰度与 AN/AP 比呈显著负相关.

随机森林分析发现,影响 SOC 累积矿化量的主要土壤因子是 AP (5.03%, $P < 0.001$)、AN/AP 比

后, N、NS 与 NB 处理的 SOC 累积矿化量无显著差异 ($P > 0.05$), NSM 处理的 SOC 累积矿化量最大 [图 6(b)], 比 CK 处理增加了 77.30%, 比 N、NS 和 NB 处理分别提高了 29.60%、24.03% 和 37.71%.

(4.83%, $P < 0.01$) 和 AK (4.19%, $P < 0.01$) [图 8(a)], 主要生物因子是 Holophagae (6.17%, $P < 0.01$)、 γ -Proteobacteria (5.24%, $P < 0.01$)、 δ -Proteobacteria (4.82%, $P < 0.01$) 和 Actinobacteria (4.80%, $P < 0.01$) [图 8(b)]; 影响 SOC 矿化速率的主要土壤因子是 AN/AP 比值 (6.38%, $P < 0.01$)、TP (5.59%, $P < 0.01$) 和 AP (4.77%, $P < 0.01$) [图 8(c)], 主要生物因子是 δ -Proteobacteria (5.69%, $P < 0.05$)、 γ -Proteobacteria (5.67%, $P < 0.01$)、Holophagae (4.90%, $P < 0.05$) 和 Actinobacteria (4.62%, $P < 0.01$) [图 8(d)].

结构方程模型表明,土壤 AP 对玉米产量表现出最大直接正效应 (0.62, $P < 0.001$), 而 AN/AP 比对 Actinobacteria 则表现为最大负效应 (-0.59, $P <$

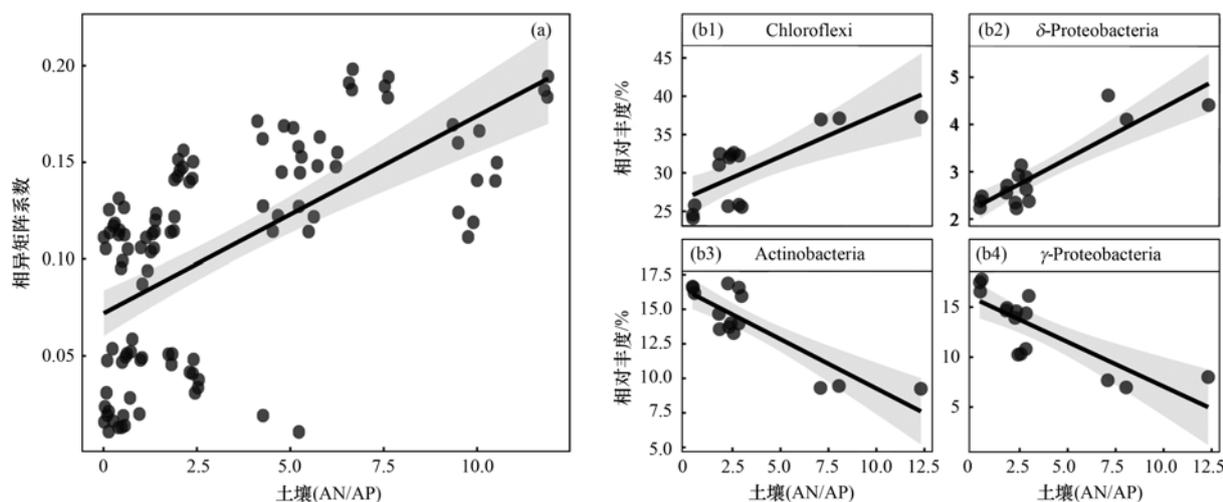
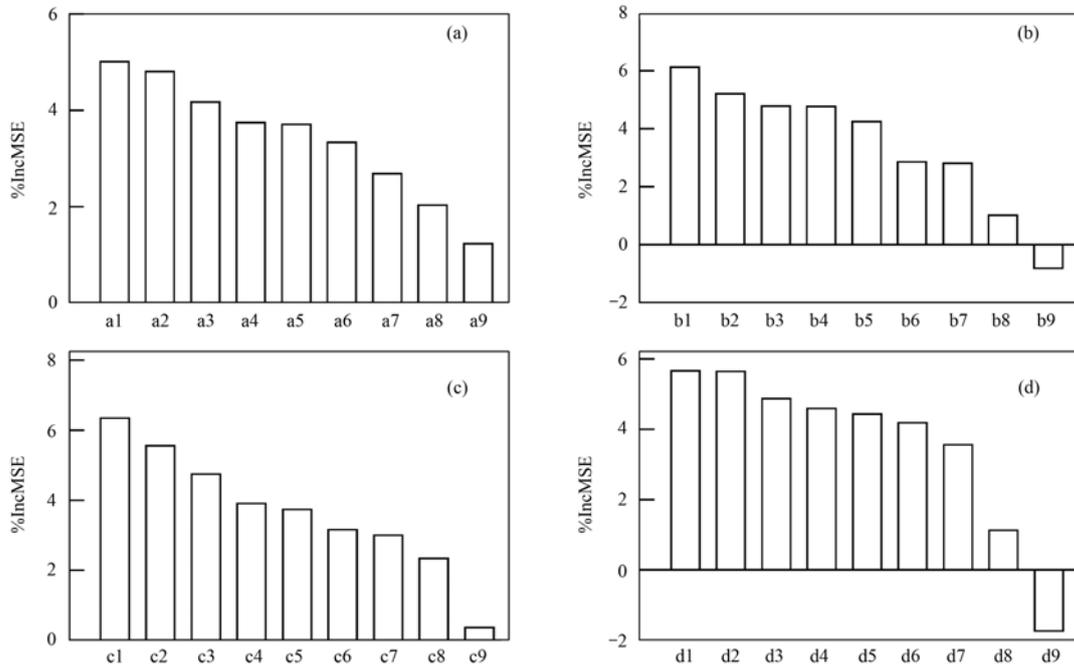


图 7 不同土壤 AN/AP 比下相异矩阵系数和细菌相对丰度的变化

Fig. 7 Bray-Curtis dissimilarity and relative abundance of bacterial community relative to soil AN/AP ratio



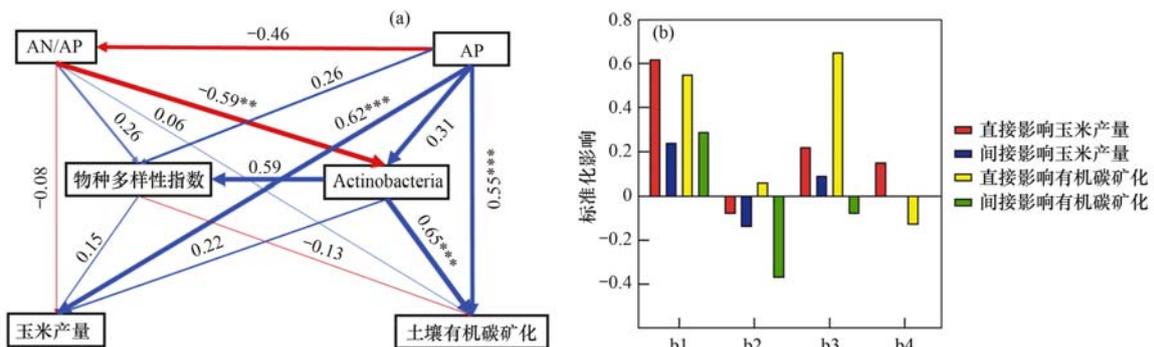
a1 : AP, a2: AN/AP, a3: AK, a4: TP, a5: AN, a6: TN/TP, a7: TN, a8: SOC, a9: TC/TP; b1: Holophagae, b2: γ -Proteobacteria, b3: δ -Proteobacteria, b4: Actinobacteria, b5: Thermoleophilia, b6: Chloroflexia, b7: Ktedonobacteria, b8: α -Proteobacteria, b9: Acidobacteriia; c1: AN/AP, c2: TP, c3: AP, c4: AN, c5: TN, c6: AK, c7: TN/TP, c8: SOC, c9: TC/TP; d1: δ -Proteobacteria, d2: γ -Proteobacteria, d3: Holophagae, d4: Actinobacteria, d5: Ktedonobacteria, d6: Thermoleophilia, d7: Chloroflexia, d8: α -Proteobacteria, d9: Acidobacteriia; % IncMSE 表示 increase in mean squared error, 通过随机森林回归模型对每一个预测变量随机赋值, 如果该预测变量更为重要, 那么其值被随机替换后模型预测的误差会增大, 该值越大表示该变量的重要性越大

图 8 影响土壤有机碳累积矿化量和矿化速率的土壤因子与生物因子

Fig. 8 Cumulative mineralization and mineralization rate of soil organic carbon relative to soil factors and microbial factors

0.01) (图 9). AP (0.55, $P < 0.001$) 和 Actinobacteria (0.65, $P < 0.001$) 对 SOC 累积矿化量表现出显著的

正效应. 土壤 AN/AP 比可以通过影响土壤中 Actinobacteria 的相对丰度, 进而影响 SOC 矿化潜力.



Actinobacteria; Actinobacteria (相对丰度); b1: AP, b2: AN/AP, b3: Actinobacteria (相对丰度), b4: 物种多样性指数; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$; 蓝线表示正相关关系, 红线表示负相关关系; 箭头旁边的数字代表回归系数; 线条粗细表示相关性大小

图 9 化学性质与细菌群落影响下玉米产量和有机碳累积矿化量的路径

Fig. 9 Impacts of soil properties and bacterial community on cumulative organic carbon mineralization as estimated using the structural equation modeling

3 讨论

3.1 不同秸秆还田处理对土壤化学性质和玉米产量的影响

本研究发现由于化学氮肥的施用, 土壤 pH 均呈下降趋势. 这可能是由于铵态氮肥通过硝化作用释放质子, 加速了土壤酸化过程. NS 处理下 pH 进

一步降低, 这可能是由于玉米秸秆含有有机酸和氨基酸等酸性物质^[21]. 孟红旗等^[22]的研究发现, 猪粪肥年输入量为 $10.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时可有效控制农田土壤酸化, 施用生物炭能够在一定程度上缓冲土壤酸化^[23], 有研究表明, 生物质炭年施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 能显著提高红壤 pH, 但低于此施用量时, 红壤 pH 并无显著变化^[24], 本研究中 NSM 和

NB 处理对化肥引起的土壤酸化具有一定缓解作用,但由于猪粪 ($3.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和生物炭年输入量 ($2.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 较低,酸化改良效果并不显著. 相比于 CK 和 N 处理,NSM 和 NB 处理显著提高了土壤 TN 和 SOC. 秸秆还田配施化肥不仅促进秸秆矿化,增加土壤养分,而且明显提高土壤氮素含量^[25]. 添加生物炭后土壤 TN 增加,主要归因于土壤持水能力和氮素固定能力的提高. 刘佳等^[26] 基于祁阳红壤长期定位试验发现,与 CK 处理相比,氮磷钾肥施用使红壤旱地 SOC 显著提高,而骆坤等^[27] 在东北黑土研究中发现,施氮并未提高 SOC 含量. 这可能是由于试验地基础 SOC 含量不同,东北黑土 SOC 含量 ($15.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 远高于祁阳红壤 ($6.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),对于高 SOC 含量的黑土,长期单施化肥无法维持其原有的 SOC 水平^[28],而对于低 SOC 含量的红壤,化肥促进了秸秆的矿化和土壤 SOC 积累. 单施化肥,仅仅对 NPK 等元素提高明显,对 SOC 提高并不显著. 玉米秸秆中含有纤维素和木质素等富碳物质,秸秆本身 C/N 比一般高于土壤,施用猪粪提高 TN 的同时,带入了新鲜 SOC. 生物质炭输入显著增加了 SOC,但并未成比例地增加 N 含量,因而本研究中 NB 处理的 TC/TN 显著高于其他处理,而 NSM 和 NS 处理相较于 CK 和 N 处理略有提高. 南方红壤有效磷含量低^[29],秸秆猪粪配施能较好地提高土壤 AP. 本研究发现与 CK 处理相比,N 和 NSM 处理土壤 AP 显著增加,因而降低了土壤 AN/AP 比值. NB 处理中秸秆生物炭含有更丰富的碳,显著增加了土壤 SOC 含量,提高了土壤 TC/TP 比值,而 NSM 处理中输入了较多的有机磷,降低了土壤 TC/TP 比值. 较低的 C/P 比是表征磷有效性高的一个重要指标^[3],因此 NSM 处理在快速提升土壤肥力水平的同时,更好地保障了红壤氮磷养分的平衡供应. 土壤氮素营养状况是影响玉米生长及子粒产量形成的关键因素^[30],秸秆还田处理为玉米生长发育提供充足的营养物质^[31]. 一方面花期是作物对温度最敏感的时期,此时高温可能会造成严重减产^[32],本试验区夏季气温高 (30°C),正值玉米花期易受高温胁迫影响;另一方面试验土壤为第四纪红黏土母质发育的典型红壤(黏化湿润富铁土)呈强酸性,土壤 pH 降低导致铝和锰等对植物的毒害,以及 Ca 和 Mg 等营养元素缺乏,从而使作物减产^[33],造成本研究中各处理下玉米产量都相对较低,但 NSM 处理玉米产量显著高于其他处理,可能由于秸秆猪粪配施能显著提高土壤肥力,并对土壤铝毒有一定缓解作用^[34],柳开楼等^[35] 的研究指出,猪粪还田可阻控土壤酸化、显著提高土壤有机质和氮磷钾等养分含量,从而促进作物增产. 未来需

要继续开展长期试验,深入揭示长期秸秆还田对旱地红壤玉米产量的影响机制.

3.2 不同秸秆还田处理对土壤微生物多样性和群落结构的影响

不同施肥处理由于养分投入状况的差异,对土壤微生物造成不同程度的养分限制^[3]. Wardle 等^[36] 的研究发现热带地区土壤呼吸和微生物生物量主要是受磷素限制. 施用有机物料主要是通过改变土壤有机碳、全氮、速效氮和交换性 K^+ 等土壤因子,提高磷素有效性^[37],秸秆猪粪配施显著提高了土壤 AP 含量,改变土壤微生物群落结构与多样性. 本研究中 NS、NSM 和 NB 处理显著提高红壤细菌多样性,但 N 处理却降低了细菌群落的多样性指数,这可能是由于单施化肥破坏了土壤团聚体结构,土壤细菌的生存环境恶化^[38],导致细菌种类减少和群落的物种多样性降低;施用有机肥可以使有机胶结作用形成的水稳性团聚体的稳定性保持时间更长^[39],添加有机肥和秸秆改变了土壤理化性质,进而改变了土壤细菌群落组成,其中 AP 对细菌群落的 α -多样性具有显著地积极作用^[40]. 与其他研究结果相同,秸秆还田显著改变了微生物群落结构^[41],本研究发现 NSM 处理造成 Acidobacteria 和变形菌门丰度增加,特别是改变了酸杆菌科 (Acidobacteriaceae)、Frankiales、Xanthobacteraceae 和伯克氏菌科 (Burkholderiaceae) 的丰度,其原因可能是秸秆还田下土壤 C/P 和 N/P 比决定了土壤微生物群落组成^[42]. 本研究发现,NSM 处理显著提高了土壤速效养分 (AN, AP 和 AK) 的供应能力,降低了土壤 AN/AP 比,从而提高了 Actinobacteria 和 γ -Proteobacteria 的丰度,降低了 Chloroflexi 和 δ -Proteobacteria 的相对丰度. 理鹏等^[43] 的研究也发现,AP 对 Chloroflexi 和酸杆菌门有正相关作用,猪粪施用显著增加了土壤 AP 含量,从而提高了 Chloroflexi 和 Acidobacteria 的丰度. 这表明秸秆还田为微生物生长提供丰富资源的同时,也驱动了特定的微生物种群变化,例如有土壤优势菌种从 α -Proteobacteria 向 δ -Proteobacteria 转变^[44].

3.3 不同秸秆还田处理下微生物群落对有机碳矿化和玉米产量的影响

土壤生物是土壤养分转化的主要执行者,细菌的呼吸代谢活性在土壤碳循环中起着不容忽视的作用. SOC 矿化是土壤微生物分解同化土壤中活性有机质,完成自身代谢并释放 CO_2 的过程,关系到土壤中养分元素的释放与供应、土壤生产力维持及温室气体形成等^[45],而 SOC 中活性碳组分的矿化是土壤呼吸和 CO_2 排放的主要贡献者^[46]. 本研究发

现,相比 CK 处理,NSM 处理显著提高了 SOC 矿化能力和玉米产量,增加了 CO₂ 的释放速率和释放量.这是由于猪粪激发了秸秆快速分解,其分解过程引起了土壤氮磷养分的暂时固定,对土壤有机质分解存在正激发效应,增加了土壤 CO₂ 排放^[47].土壤性质及微生物群落是影响外源碳矿化及氮素供应的关键因素^[13],土壤中微生物分解有机质释放养分,转化土壤碳素,固定无机营养元素形成微生物生物量^[48].Fisk 等^[49]通过土壤微域试验发现,随着外源 P 输入量增加,SOC 矿化速率和累积矿化量增加.本研究发现 AP、AN/AP 比和 AK 显著影响 SOC 累积矿化量,NSM 处理可能显著提高了土壤 AP 含量,降低了土壤 AN/AP 比,进而改变了微生物群落多样性和结构,导致其 SOC 累积矿化量和玉米产量提高.外源养分资源供应对微生物的 SOC 代谢活性有促进作用,微生物群落功能显著影响土壤肥力水平高低,由土壤生物合成的酶活性也是土壤肥力的重要指标之一^[50].微生物分布密集,活性强,有利于土壤中养分转化,促进植物养分供应^[51],从而能够显著提高玉米产量.本研究中 γ -Proteobacteria 和 Actinobacteria 与土壤 SOC 矿化功能显著正相关,其丰度能较好地反映土壤 SOC 矿化能力.有研究表明,有机质增加导致部分细菌类群等(变形菌门和厚壁菌门等)组成发生变化,刺激了土壤呼吸^[52].放线菌的丝状群落形态有助于其在土壤中有效定殖,高效分解土壤中秸秆的复杂有机质组分^[53].NB 处理中 SOC 矿化速率显著低于 NSM 处理,这可能由于生物炭中的 SOC 主要为惰性碳,并且生物炭可能刺激了细菌和真菌网络中关键类群与其他物种之间的竞争作用,促进了微生物多样性,减少了碳水化合物分解代谢和 CO₂ 释放量^[54].由此可见,NSM 处理可能通过提高土壤磷库总量和有效性改变了微生物群落组成,显著提高了土壤 SOC 矿化潜力和玉米产量,有助于促进红壤 SOC 库容容量和周转速率增加.

4 结论

不同秸秆还田方式显著影响了土壤养分水平,其中 NSM 处理对土壤肥力和玉米产量的综合提升效果最佳.秸秆还田改变了红壤细菌多样性和群落组成,N 处理降低了红壤细菌多样性,而 NSM 处理显著提高了红壤细菌多样性,增加了 Actinobacteria 和 γ -Proteobacteria 丰度,但降低了 Chloroflexi 和 δ -Proteobacteria 丰度.秸秆还田处理均能提高 SOC 矿化速率和累计矿化量,NSM 处理对土壤有机碳矿化能力的提高最为显著.因此,秸秆猪粪配施促进了红

壤养分库容和微生物多样性的协同提升,增强土壤有机碳矿化功能,研究结果为保障红壤健康和农田生态系统功能稳定提供理论依据.

参考文献:

- [1] 田慎重,郭洪海,姚利,等.中国种养业废弃物肥料化利用发展分析[J].农业工程学报,2018,34(S1):123-131.
Tian S Z, Guo H H, Yao L, et al. Development analysis for fertilizer utilization of agricultural planting and animal wastes in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(S1): 123-131.
- [2] 杨兴明,徐阳春,黄启为,等.有机(类)肥料与农业可持续发展和生态环境保护[J].土壤学报,2008,45(5):925-932.
Yang X M, Xu Y C, Huang Q W, et al. Organic-like fertilizers and its relation to sustainable development of agriculture and protection of eco-environment [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 925-932.
- [3] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [4] 程欢,宫渊波,吴强,等.川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J].自然资源学报,2018,33(1):161-172.
Cheng H, Gong Y B, Wu Q, et al. Content and ecological stoichiometry characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus of typical soils in sub-alpine/alpine mountain of western Sichuan [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(1): 161-172.
- [5] Ågren G I, Andersson F O. Terrestrial ecosystem ecology: principles and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [6] 王玉竹,周萍,王娟,等.亚热带几种典型稻田与旱作土壤中外源输入秸秆的分解与转化差异[J].生态学报,2017,37(19):6457-6465.
Wang Y Z, Zhou P, Wang J, et al. Decomposition and transformation of input straw in several typical paddy and upland soils in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6457-6465.
- [7] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等.中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):1-21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 1-21.
- [8] 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.
- [9] Chen Z M, Wang H Y, Liu X W, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 121-127.
- [10] 赵其国.红壤物质循环及其调控[M].北京:科学出版社,2002.
- [11] 孙波.红壤退化阻控与生态修复[M].北京:科学出版社,2011.
- [12] 文顺元,王伯仁,李冬初,等.长期不同施肥对红壤微生物生长影响[J].中国农学通报,2010,26(22):206-209.
Wen S Y, Wang B R, Li D C, et al. Effect of long term different

- fertilization on the growth of microbe in red soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, **26**(22): 206-209.
- [13] 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.
- [14] Kušlienė G, Rasmussen J, Kuzyakov Y, *et al.* Medium-term response of microbial community to rhizodeposits of white clover and ryegrass and tracing of active processes induced by ^{13}C and ^{15}N labelled exudates [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **76**: 22-33.
- [15] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality [J]. Applied Soil Ecology, 2000, **15**(1): 3-11.
- [16] Pham V H T, Kim J. Cultivation of unculturable soil bacteria [J]. Trends in Biotechnology, 2012, **30**(9): 475-484.
- [17] Robertson G P, Wedin D, Groffmann P M, *et al.* Soil carbon and nitrogen availability: nitrogen mineralization, nitrification, and soil respiration potentials [A]. In: Robertson P, Coleman D C, Bledsoe C, *et al.* (Eds.). Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research [M]. New York: Oxford University Press, 1999. 258-271.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] Sauerbeck D R, 著. 夏荣基, 译. 土壤有机质研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [20] Bolyen E, Rideout J R, Dillon M R, *et al.* Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2 [J]. Nature Biotechnology, 2019, **37**(8): 852-857.
- [21] He Z Q, Mao J D, Honeycutt C W, *et al.* Characterization of plant-derived water extractable organic matter by multiple spectroscopic techniques [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, **45**(6): 609-616.
- [22] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(5): 1153-1160.
- Meng H Q, Lv J L, Xu M G, *et al.* Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, **18**(5): 1153-1160.
- [23] Liu Z Q, He T Y, Lan Y, *et al.* Maize stover biochar accelerated urea hydrolysis and short-term nitrogen turnover in soil [J]. BioResources, 2017, **12**(3): 6024-6039.
- [24] 陶朋闯, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭长期施用对旱地红壤微生物特性及理化性质的影响 [J]. 土壤通报, 2017, **48**(6): 1423-1428.
- Tao P C, Chen X M, Jin Z W, *et al.* Long-term effects of biochar application on microbial properties and physicochemical properties in upland red soil, China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(6): 1423-1428.
- [25] 张亚丽, 张娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, **13**(12): 1575-1578.
- Zhang Y L, Zhang J, Shen Q R, *et al.* Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, **13**(12): 1575-1578.
- [26] 刘佳, 陈晓芬, 刘明, 等. 长期施肥对旱地红壤细菌群落的影响 [J]. 土壤学报, 2020, **57**(2): 468-478.
- Liu J, Chen X F, Liu M, *et al.* Effects of long-term fertilization on bacterial community in upland red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(2): 468-478.
- [27] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 [J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 676-684.
- Luo K, Hu R G, Zhang W J, *et al.* Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 676-684.
- [28] 赵丽娟, 韩晓增, 王守宇, 等. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力变化 IV. 有机碳组分的变化 [J]. 应用生态学报, 2006, **17**(5): 817-821.
- Zhao L J, Han X Z, Wang S Y, *et al.* Changes of crop yield and soil fertility under long-term fertilization and nutrients-recycling and reutilization on a black soil: IV. Soil organic carbon and its fractions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, **17**(5): 817-821.
- [29] 全国土壤普查办公室. 中国土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [30] Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, *et al.* Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture [J]. Annals of Botany, 2010, **105**(7): 1141-1157.
- [31] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究 [J]. 土壤肥料, 2004, (5): 12-16.
- Wang L G, Li W J, Qiu J J, *et al.* Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield [J]. Soils and Fertilizers, 2004, (5): 12-16.
- [32] Prasad P V V, Djanaguiraman M, Perumal R, *et al.* Impact of high temperature stress on floret fertility and individual grain weight of grain sorghum: sensitive stages and thresholds for temperature and duration [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, **6**, doi: 10.3389/fpls.2015.00820.
- [33] Ritchie G S P. The chemical behavior of aluminum, hydrogen and manganese in acid soils [A]. In: Robson A D (Ed.). Soil Acidity and Plant Growth [M]. Sydney: Academic Press, 1989.
- [34] 陈梅, 陈亚华, 沈振国, 等. 猪粪对红壤铝毒的缓解效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(2): 173-176.
- Chen M, Chen Y H, Shen Z G, *et al.* Amelioration of aluminum toxicity on wheat plants grown in acid red soil by pig manure [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, **8**(2): 173-176.
- [35] 柳开楼, 余跑兰, 谭武贵, 等. 长期施用猪粪对红壤旱地和水稻土肥力和土壤 As 转化的影响 [J]. 生态环境学报, 2015, **24**(6): 1057-1062.
- Liu K L, Yu P L, Tan W G, *et al.* Effect of long-term application of pig manure on soil arsenic content and fertility of red upland and paddy soils [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(6): 1057-1062.
- [36] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. Science, 2004, **305**(5683): 509-513.
- [37] 陈利军, 蒋瑛霁, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响 [J]. 土壤, 2020, **52**(3): 451-457.
- Chen L J, Jiang Y J, Wang H T, *et al.* Effects of long-term application of organic materials on phosphorus fractions and availability in red soil [J]. Soils, 2020, **52**(3): 451-457.
- [38] 孟祥天, 蒋瑛霁, 王晓玥, 等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响 [J]. 土壤, 2018, **50**(2): 326-332.
- Meng X T, Jiang Y J, Wang X Y, *et al.* Effects of long-term application of biochar and straws on red soil aggregate composition and organic carbon distribution [J]. Soils, 2018, **50**(2): 326-

- 332.
- [39] 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4691-4699.
- Shao H Y, Li Z Y, Liu D, *et al.* Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4691-4699.
- [40] 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.
- [41] 张鑫, 周卫, 艾超, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对夏玉米不同时期土壤酶活性及细菌群落结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(2): 295-306.
- Zhang X, Zhou W, Ai C, *et al.* Effects of nitrogen management on soil enzyme activities and bacterial community structure in summer maize growing stages under straw incorporation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, **26**(2): 295-306.
- [42] Ma X Y, Liu M, Li Z P. Shifts in microbial biomass and community composition in subtropical paddy soils under a gradient of manure amendment [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, **52**(6): 775-787.
- [43] 理鹏, 吴建强, 沙晨燕, 等. 粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4262-4272.
- Li P, Wu J Q, Sha C Y, *et al.* Effects of manure and organic fertilizer application on soil microbial community diversity in paddy fields [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4262-4272.
- [44] 杨恒山, 萨如拉, 郜继承, 等. 不同质地土壤细菌多样性对玉米秸秆还田配施腐熟剂的响应[J]. 土壤通报, 2019, **50**(6): 1352-1360.
- Yang H S, Sa R L, Tai J C, *et al.* Response of bacterial diversities of soil with different textures to corn straw returning to field combined with straw decomposing inoculants [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(6): 1352-1360.
- [45] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, **41**(4): 544-552.
- Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, **41**(4): 544-552.
- [46] 王梦雅, 符云鹏, 黄婷婷, 等. 等碳量添加不同有机物料对土壤有机碳组分及土壤呼吸的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, **24**(2): 65-73.
- Wang M Y, Fu Y P, Huang T T, *et al.* Effects of organic material application on organic carbon in and respiration of soil [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2018, **24**(2): 65-73.
- [47] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, **45**(2): 115-131.
- [48] Jenkinson D. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients [J]. *Soil Science*, 1987, **144**(5): 387-388.
- [49] Fisk M, Santangelo S, Minick K. Carbon mineralization is promoted by phosphorus and reduced by nitrogen addition in the organic horizon of northern hardwood forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 212-218.
- [50] 蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. 土壤学报, 2020, **57**(5): 1128-1136.
- Cai Z C. Discussion on the strategies for development of the subdiscipline of soil fertility and soil nutrient cycling for the 14th five-year plan [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): 1128-1136.
- [51] Richardson A E, Barea J M, McNeill A M, *et al.* Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms [J]. *Plant and Soil*, 2009, **321**(1-2): 305-339.
- [52] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(27): 10316-10321.
- [53] Zucchi T D, De Moraes L A B, De Melo I S. *Streptomyces* sp. ASBV-1 reduces aflatoxin accumulation by *Aspergillus parasiticus* in peanut grains [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, **105**(6): 2153-2160.
- [54] Chen L J, Jiang Y J, Liang C, *et al.* Competitive interaction with keystone taxa induced negative priming under biochar amendments [J]. *Microbiome*, 2019, **7**(1), doi: 10.1186/s40168-019-0693-7.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)