

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



2020

Vol.41 No.10  
第41卷 第10期

目次

|                                                                                 |                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 .....                                                 | 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)                          |
| 基于在线观测的天津市 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 .....                                    | 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)      |
| 2017~2018年北京大气 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子特征 .....                               | 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)  |
| 北京南部城区 PM <sub>2.5</sub> 中碳质组分特征 .....                                          | 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374) |
| 成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 .....                                                      | 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)       |
| 南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 .....                                                          | 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)                     |
| 2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 .....                                        | 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)              |
| 保定市大气污染变化趋势及特征 .....                                                            | 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)    |
| 郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 .....                                                   | 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)                               |
| 郑州市少数民族运动会期间 O <sub>3</sub> 及 VOCs 污染特征的演变和评估 .....                             | 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)  |
| 我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 .....                                                      | 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)          |
| 典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 .....                                                       | 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)          |
| 不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析 .....                                                   | 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)                     |
| 天津市 2017 年移动源高分时空分辨率排放清单 .....                                                  | 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)   |
| 四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 .....                                           | 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)          |
| 抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 .....                                                        | 李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)                               |
| 宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 .....                                                       | 张军, 梁青芳, 高煜 (4504)                                |
| 潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估 .....                                            | 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)             |
| 泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 .....                                            | 韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)                               |
| 长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 .....                                          | 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)                  |
| 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 .....                                                        | 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)             |
| 基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 .....                                                | 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)            |
| 降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响 .....                                                  | 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)               |
| 硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 .....                                              | 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)                      |
| 海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 .....                                                  | 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)                |
| 内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 .....                                                   | 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)            |
| 透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 .....                                                    | 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)           |
| 铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能 .....                                     | 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)                          |
| 纳米 Cu <sup>0</sup> @Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制 ..... | 石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)                               |
| 紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 .....                                                    | 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)             |
| 污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 .....                                                        | 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)               |
| 不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 .....                                 | 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)                      |
| 全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 .....                                                  | 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)                |
| 不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 .....                                                   | 袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)                              |
| 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 .....                                                 | 吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)    |
| 不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 .....                                                  | 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)                           |
| 酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 .....                                          | 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)                          |
| 稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 .....                                                   | 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)            |
| 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发 .....                                                       | 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)            |
| 外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 .....                                                     | 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)   |
| 水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期 .....                                                 | 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)            |
| 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 .....                                                     | 周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)             |
| 浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 .....                                           | 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)                            |
| 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 .....                                                  | 王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)             |
| 重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 .....                                                | 彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)                               |
| 《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)                       |                                                   |

# 酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响

张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰\*

(贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006)

**摘要:**为实现酱香型酒糟资源化综合利用和黄壤氮素有效性提升,采取田间培养试验,通过设置5个生物炭施用量0% (MB<sub>0</sub>)、0.5% (MB<sub>0.5</sub>)、1.0% (MB<sub>1.0</sub>)、2.0% (MB<sub>2.0</sub>)和4.0% (MB<sub>4.0</sub>),研究酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响。结果表明,施用酒糟生物炭使土壤全氮(TN)和硝态氮(NN)含量分别提高35.79%~365.26%和122.96%~171.80%,微生物量氮(MBN)含量降低34.10%~59.95%,且随着生物炭施用量的增加,铵态氮/全氮(AN/TN)、硝态氮/全氮(NN/TN)和微生物量氮/全氮(MBN/TN)呈现出降低趋势。施用酒糟生物炭显著降低了土壤细菌OTU数量、群落丰富度和多样性,且随酒糟生物炭施用量的增加,该影响程度随之增加。与未施用酒糟生物炭MB<sub>0</sub>处理相比,酒糟生物炭的施用显著改变土壤细菌群落结构,随着生物炭施用量的增加,拟杆菌门(Bacteroidetes)相对丰度提高了1.76~2.11倍,而酸杆菌门(Acidobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、浮霉菌门(Planctomycetes)、装甲菌门(Armatimonadetes)、奇古菌门(Thaumarchaeota)和硝化螺旋菌门(Nitrospirae)相对丰度均出现不同程度的降低,均以MB<sub>4.0</sub>处理降幅最为显著。同时,酒糟生物炭的施用还增加了一些土壤功能细菌的相对丰度,如链霉菌属(*Streptomyces*)、极小单胞菌属(*Puillimonas*)等,降低了溶杆菌属(*Lysobacter*)和芽孢杆菌属(*Gemmatimonas*)等优势菌属的相对丰度。此外,冗余分析(RDA)结果显示,MBN/TN、NN和MBN是引起土壤细菌群落结构变化的主要氮素环境因子,而且MBN/TN、MBN与奇古菌门(Thaumarchaeota)和硝化螺旋菌门(*Nitrospira*)均呈显著正相关性,说明短期内酒糟生物炭的施用可以显著降低氨氧化古菌和硝化细菌的丰度,抑制土壤氨氧化作用和硝化速率,提高土壤氮素有效性。综上所述,短期内施用酒糟生物炭可以提高黄壤氮素养分,改变土壤细菌群落结构和多样性,并可以通过抑制土壤氨氧化作用和硝化作用有效阻控土壤氮素淋溶发生的风险,提高土壤氮素有效性。

**关键词:**酱香型酒糟生物炭;黄壤;土壤氮素;细菌群落结构;细菌群落多样性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4690-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202003113

## Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province

ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, GOU Jiu-lan\*

(Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** To realize the comprehensive utilization of resources of moutai-flavor vinasse and improve the nitrogen efficiency of yellow soil, a field culture experiment was carried out to study the effects of short-term application of vinasse biochar on nitrogen availability and bacterial community structure diversity in yellow soil of Guizhou by setting 5 biochar dosages of 0% (MB<sub>0</sub>), 0.5% (MB<sub>0.5</sub>), 1.0% (MB<sub>1.0</sub>), 2.0% (MB<sub>2.0</sub>), and 4.0% (MB<sub>4.0</sub>). The results showed that the total nitrogen (TN) and nitrate nitrogen (NN) content in the soil increased by 35.79%~365.26% and 122.96%~171.80%, the microbial biomass nitrogen (MBN) content decreased by 34.10%~59.95%, and the AN/TN, NN/TN, and MBN/TN exhibited a decreasing trend with an increase in the amount of biochar applied. The application of vinasse biochar significantly reduced the number of OTU and community richness and diversity of soil bacteria; the influence degree increased with an increase in the application amount of vinasse biochar. In comparison with the MB<sub>0</sub> treatment, the application of biochar significantly changed the soil bacterial community structure. The relative abundance of Bacteroidetes increased by 1.76~2.11 times with an increase in the biochar application. However, the relative abundance of Acidobacteria, Chloroflexi, Gemmatimonadetes, Planctomycetes, Armatimonadetes, Thaumarchaeota, and Nitrospirae decreased to different degrees, with the most significant decrease in the MB<sub>4.0</sub> treatment. The application of vinasse biochar increased the relative abundance of certain soil functional bacteria, such as *Streptomyces* and *Puillimonas*, and simultaneously also decreased the relative abundance of the dominant bacteria, such as *Lysobacter* and *Gemmatimonas*. In addition, the redundancy analysis (RDA) showed that the MBN/TN, NN, and MBN were the main cause of soil bacterial community structure change in nitrogen environment factor. The MBN/TN and MBN exhibited a significantly positive correlation with Thaumarchaeota and *Nitrospira*, which indicated that the short-

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860594); 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2017]1181号); 中央引导地方科技发展专项(黔科中引地[2019]4003号)

作者简介: 张萌(1989~), 硕士, 男, 助理研究员, 主要研究方向为作物养分管理与现代施肥技术, E-mail: zhangmeng1105@163.com

\* 通信作者, E-mail: 150046390@qq.com

term application of vinasse biochar can significantly reduce the abundance of ammonia-oxidizing archaea and nitrifying bacteria, inhibit the ammonia-oxidizing effect and nitrification rate of soil, and improve the availability of soil nitrogen. In summary, the short-term application of vinasse biochar can improve nitrogen nutrients, change the structure and diversity of soil bacterial community, and effectively control the risk of soil nitrogen leaching by inhibiting ammonia oxidation and nitrification of soil, to improve the availability of soil nitrogen.

**Key words:** moutai-flavor vinasse biochar; yellow soil; soil nitrogen; bacterial community structure; diversity of bacterial community

黄壤作为我国西南山区的主要土壤类型之一, 主要分布于贵州、四川和云南等省. 贵州黄壤面积 700 多万  $\text{hm}^2$ , 占全国黄壤总面积的 30% 左右, 其中旱耕地黄壤约 460 万  $\text{hm}^2$ , 约占全省旱耕地面积的 46%<sup>[1,2]</sup>. 黄壤质地较为粘重、酸性较强, 土壤交换性盐基含量低, 尽管黄壤表层有机质含量较高, 但土壤氮素转化淋溶现象却尤为突出, 这就导致黄壤氮库亏缺十分明显<sup>[3,4]</sup>. 因此如何提高黄壤氮素有效性和减少氮素养分损失, 是目前亟待解决的一个重要问题.

近年来, 将生物炭用作土壤改良剂来增加土壤养分固持和减少养分淋失的研究日益增多, 通过对生物炭在土壤中的驻留及影响土壤氮素循环的研究与探索, 使人们看到其正向调控土壤氮素活动的潜力<sup>[5-8]</sup>. 生物炭作为一种外源输入材料, 不仅具有较高的表面电荷密度, 可以通过阳离子交换来为土壤保留更多的阳离子<sup>[9-11]</sup>, 而且生物炭较大的比表面积和多孔性结构及其极性和非极性表面位点的存在, 使得生物炭可以更好地吸附有机分子和相关营养元素<sup>[12,13]</sup>, 更重要的是生物炭可直接为土壤微生物提供良好的栖息环境和生长所需养分, 从而改变土壤微生物群落结构和生物多样性<sup>[14-16]</sup>. 例如, 盖霞普等<sup>[17]</sup>的研究发现, 玉米秸秆生物炭能够通过提高土壤微生物活性进而增强微生物对无机氮的固持能力, 从而有效减少  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的淋溶损失; 侯建伟等<sup>[10]</sup>的研究表明, 生物炭改变了黄壤细菌的群落构成和化学性质, 土壤全氮和 pH 是提高土壤细菌群落多样性和丰富度的主控环境因子; 张梦阳等<sup>[18]</sup>的研究发现, 短期内施用生物炭显著改变了黄棕壤和潮土的微生物群落结构, 并且可以显著降低潮土合成氨相关酶基因表达量和氨氧化古菌丰度, 抑制了潮土的氨氧化作用; 王晶等<sup>[19]</sup>通过连续秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响表明, 持续秸秆炭化还田显著增加了酸杆菌门、芽单胞菌门、硝化螺旋菌门以及亚硝化单胞菌科的相对丰度, 提高了多聚物类碳源的代谢活性. 由此可见, 生物炭在提高土壤氮素有效性和改善土壤微生态等方面表现出明显的优越性.

然而, 生物炭对土壤微生物群落组成以及土壤氮素养分循环的作用效果受多种因素的影响<sup>[20-22]</sup>,

其中定性研究不同材质生物炭对土壤微生物群落组成以及土壤氮素就显得尤为重要. 以往关于生物炭对土壤氮素利用及土壤微生物影响的研究多数是以水稻<sup>[14,23]</sup>、玉米<sup>[17,24]</sup>和小麦<sup>[25,26]</sup>等秸秆生物炭作为供试材料开展的, 而关于酱香型酒糟生物炭的研究鲜见报道. 酱香型酒糟作为贵州特色农业有机废弃物, 不仅资源巨大, 而且含有丰富的微生物菌群, 制备成酒糟生物炭可解决酒糟闲置堆弃的问题, 充分实现农业有机废弃物的资源化利用<sup>[27,28]</sup>. 因此, 本研究以酱香型酒糟生物炭作为试验材料, 通过短期田间培养试验定性分析了不同酒糟生物炭用量对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响, 以期对贵州黄壤氮素有效性提升和酒糟资源化合理利用提供理论参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

本试验于 2019 年 4~6 月在贵州省农业科学院试验基地进行, 具体降雨和气温情况见图 1. 供试土壤为贵州典型地带性黄壤, 其基础理化性质为: pH 6.37, 有机质  $26.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮  $0.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 铵态氮  $0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 硝态氮  $11.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $48.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $175.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 供试肥料包括: 尿素 (N 46%), 供试生物炭为酱香型酒糟生物炭, 由贵州省农业科学院土壤肥料研究所利用专用炭化设备于  $550^\circ\text{C}$  制备而成, 其基本理化性质为: pH 8.78, 有机碳  $281.33 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮  $7.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 铵态氮  $1.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 硝态氮  $24.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $1.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $4.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### 1.2 试验设计

本试验采用露天田间培养方法进行, 试验装置为直径 20 cm、高 35 cm 的 PVC 管, 先在 PVC 管底层填充 3~5 cm 厚的石英砂, 并用纱布将 PVC 管底部包住, 防止土壤或石英砂流失. 然后将风干、磨细、过 2 mm 筛的 10 kg 黄壤与所占质量分数分别为 0% ( $\text{MB}_0$ )、0.5% ( $\text{MB}_{0.5}$ )、1.0% ( $\text{MB}_{1.0}$ )、2.0% ( $\text{MB}_{2.0}$ ) 和 4.0% ( $\text{MB}_{4.0}$ ) 的酒糟生物炭混合后装入 PVC 管中, 并适当按压避免溢出. 试验装置填装完毕后, 将尿素按照每千克土 0.15 g 纯氮的用量撒施于土壤表面, 然后铺盖一层细沙以防止降雨对表层

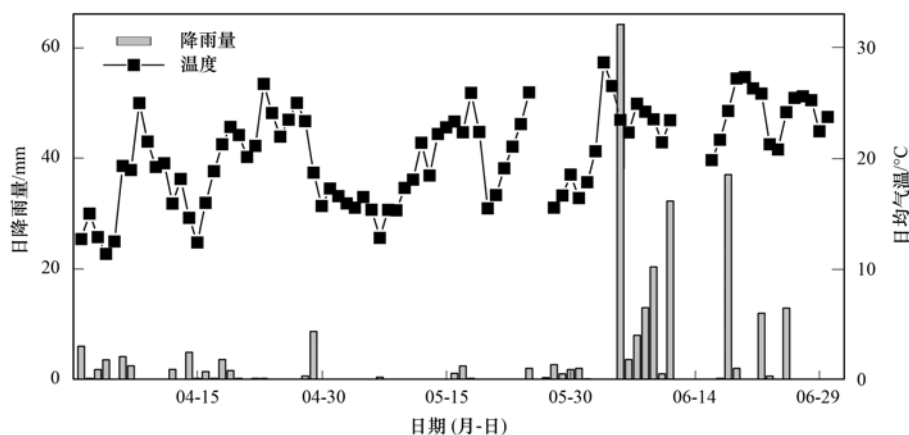


图1 试验期间的降雨和气温情况

Fig. 1 Rainfall and temperature conditions during the test period

土壤的扰动. 将试验装置置于田间, 培养 60 d 后采集土壤进行分析. 每个处理设置 3 次重复, 共计 15 盆.

### 1.3 土壤样品的采集

本试验于 2019 年 6 月 18 日结束, 然后将每个 PVC 管中的土壤充分混匀后采集土壤样品. 土壤样品分 3 部分: 第一部分用锡箔纸包裹, 迅速装入离心管, 投入液氮冷冻运输, 之后转移至  $-80^{\circ}\text{C}$  冰箱保存, 用于土壤微生物高通量测序分析; 第二部分采集新鲜土样用于铵态氮、硝态氮和微生物量氮的测定; 第三部分取新鲜样品自然风干、研磨过筛后, 用于测定全氮的测定.

### 1.4 测定项目和分析方法

#### 1.4.1 土壤理化性质测定

土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定, 土壤铵态氮和硝态氮用  $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCl 溶液浸-连续流动分析仪 (德国 AA3) 测定, 微生物量氮采用氯仿熏蒸- $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法测定<sup>[29]</sup>.

#### 1.4.2 土壤 DNA 提取和 16S rRNA 基因高通量测序

每个样品称取相当于 0.5 g 干土重量的新鲜土壤, 采用 FastDNA® SPIN Kit for Soil (MP Biomedicals) 试剂盒提取土壤微生物总 DNA, 1% 的琼脂糖电泳检测 DNA 样品是否有降解以及杂质, Nanodrop 2000 分光光度计检测样品纯度. 经 DNA 浓度和纯度检测后 (DNA 浓度  $\geq 20\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ , 总量  $\geq 500\text{ ng}$ ,  $D_{260/280}$  为 1.8 ~ 2.0), 利用 ABI GeneAmp R9700 型 PCR 对细菌 16S rRNA 进行 PCR 引物扩增, 扩增引物为使用 338F (5'-ACTCCTACGGGAGG CAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCT AAT-3'). PCR 反应体系为:  $5\times\text{TransStart FastPfu}$  缓冲液  $4\mu\text{L}$ ,  $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  dNTPs  $2\mu\text{L}$ , 上游引物 ( $5\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )  $0.8\mu\text{L}$ , 下游引物 ( $5\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )  $0.8\mu\text{L}$ ,  $\text{TransStart FastPfu}$  DNA 聚合酶  $0.4\mu\text{L}$ , 模板 DNA  $10\text{ ng}$ , 补足至  $20\mu\text{L}$ . 每个样本 3 个重复. 获得扩增产

物后, 进一步通过 2.0% 琼脂凝胶电泳检测 PCR 产物纯化效果, 测定纯化后 PCR 产物的浓度. 将土壤样品 16S rRNA 基因的 PCR 纯化产物等摩尔系数混合, 利用 Thermo Scientific 公司的 GeneJET 胶回收试剂盒, 割胶回收目标条带. 测序服务委托上海美吉生物医药科技有限公司完成.

### 1.5 统计与分析

采用 Mothur 软件计算丰富度指数 Ace、Chao1 和多样性指数 Shannon、Simpson 指数. 采用 Canoco 4.5 软件进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA), 采用 Origin 8.0 软件进行作图, 利用 SPSS 20.0 进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和方差分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 酒糟生物炭对土壤氮素有效性的影响

由表 1 可以看出, 与  $\text{MB}_0$  处理相比, 施用酒糟生物炭使土壤全氮含量提高了 35.79% ~ 365.26%, 其中以  $\text{MB}_{4.0}$  处理增幅最大且显著高于其他处理; 硝态氮含量提高了 122.96% ~ 171.80%, 均显著高于  $\text{MB}_0$  处理; MBN 含量则降低了 34.10% ~ 59.95%, 其中  $\text{MB}_{1.0}$ 、 $\text{MB}_{2.0}$ 、 $\text{MB}_{4.0}$  处理降低显著. 此外, 随着酒糟生物炭施用量的增加, AN/TN、NN/TN 和 MBN/TN 的变化趋势均表现为  $\text{MB}_{0.5} > \text{MB}_{1.0} > \text{MB}_{2.0} > \text{MB}_{4.0}$  处理, 均以  $\text{MB}_{4.0}$  处理最低.

### 2.2 酒糟生物炭对土壤细菌群落组成的影响

通过对土壤样品中的细菌 16S rRNA V3 ~ V4 序列进行过滤后发现, 共获得 11 408 317 条序列, 筛选后获得优质序列 10 410 540 条, 平均碱基长度为 376.40 bp, 平均测序覆盖率达到 99.13%. 由图 2 可知, 土壤样品中测到的细菌 OTU 稀释曲线趋向平坦, 说明测到的 OTU 趋于饱和, 且 OTU 数量表现为  $\text{MB}_0 > \text{MB}_{0.5} > \text{MB}_{1.0} > \text{MB}_{2.0} > \text{MB}_{4.0}$ .

表 1 酒糟生物炭对土壤氮素有效性的影响<sup>1)</sup>  
Table 1 Effect of biochar on soil nitrogen availability

| 处理                | 全氮 (TN)<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 铵态氮 (AN)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 硝态氮 (NN)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 微生物量氮 (MBN)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | AN/TN<br>× 10 <sup>-3</sup> | NN/TN<br>× 10 <sup>-3</sup> | MBN/TN<br>× 10 <sup>-2</sup> |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| MB <sub>0</sub>   | 0.95 ± 0.06c                   | 0.59 ± 0.15a                     | 34.75 ± 21.36b                   | 76.16 ± 23.61a                      | 0.62 ± 0.19ab               | 44.51 ± 2.73ab              | 8.18 ± 3.03a                 |
| MB <sub>0.5</sub> | 1.29 ± 0.01c                   | 1.04 ± 0.56a                     | 77.48 ± 11.50a                   | 50.19 ± 8.11ab                      | 0.81 ± 0.43a                | 59.95 ± 8.99a               | 3.88 ± 0.63b                 |
| MB <sub>1.0</sub> | 1.57 ± 0.05c                   | 1.08 ± 0.15a                     | 82.25 ± 7.62a                    | 32.48 ± 17.83b                      | 0.68 ± 0.10ab               | 52.50 ± 6.34a               | 2.08 ± 1.17bc                |
| MB <sub>2.0</sub> | 2.70 ± 0.76b                   | 0.86 ± 0.45a                     | 89.39 ± 10.41a                   | 30.50 ± 16.17b                      | 0.31 ± 0.05b                | 34.60 ± 7.21bc              | 1.28 ± 0.88bc                |
| MB <sub>4.0</sub> | 4.42 ± 0.59a                   | 1.35 ± 0.60a                     | 94.45 ± 3.21a                    | 33.84 ± 9.89b                       | 0.29 ± 0.11b                | 22.65 ± 1.82c               | 0.78 ± 0.28c                 |

1) 同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

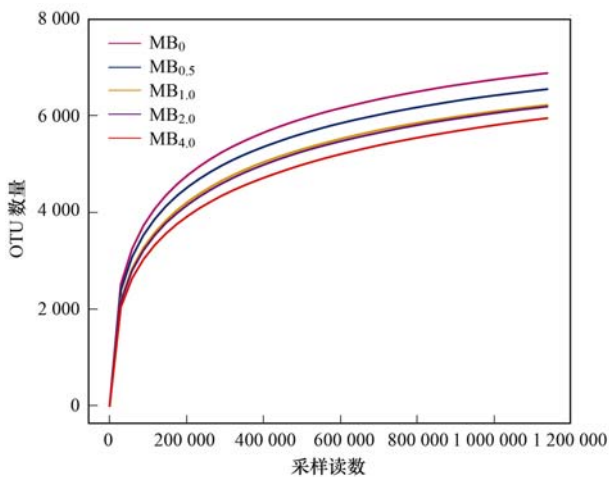


图 2 土壤中检测到的细菌 OTU 稀释曲线  
Fig. 2 OTU rarefaction curves of soil

图 3 显示,通过对土壤样品检测共得到 8 721 个 OTU,其中 MB<sub>0</sub>、MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>、MB<sub>4.0</sub> 处理的 OTU 数量分别为 6 869、6 542、6 216、6 183、5 944 个,5 个处理的共同有 OTU 为 4 192 个,占 MB<sub>0</sub>、MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>、MB<sub>4.0</sub> 处理总 OTU 的比例分别为 61.03%、64.08%、67.44%、67.80%、70.52%,而 MB<sub>0</sub>、MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>、MB<sub>4.0</sub> 处理各自特有的 OTU 数分别为 564、274、186、172、197,占相应处

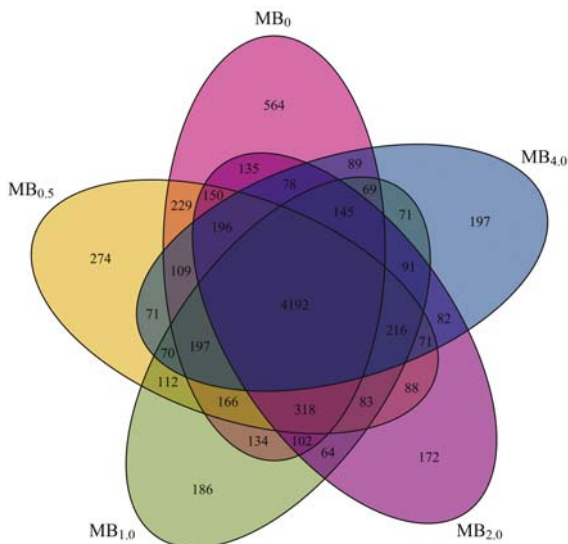


图 3 土壤中细菌 OTU 数量 Venn 图  
Fig. 3 Venn diagram of bacteria OTU in soil

理总 OTU 的比例分别为 8.21%、4.19%、2.99%、2.78%、3.31%。

2.3 土壤细菌群落结构的主成分分析

对不同酒糟生物炭处理下的土壤细菌群落进行主成分分析,共提取 4 个主成分因子,累积贡献率达到 94.31%,其中第 1 主成分 (PC1) 和第 2 主成分 (PC2) 的贡献率分别为 57.85% 和 17.76%。从图 4 可以看出,MB<sub>0</sub> 处理的土壤样品分布在 PC1 的负值区域,而 MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>、MB<sub>4.0</sub> 处理则逐步从 PC1 的负值区域向正值区域变化,且分布在 PC2 坐标轴的附近,说明酒糟生物炭的施用对黄壤土壤细菌群落有显著影响,且随酒糟生物炭施用量的增加,该影响程度随之增加。

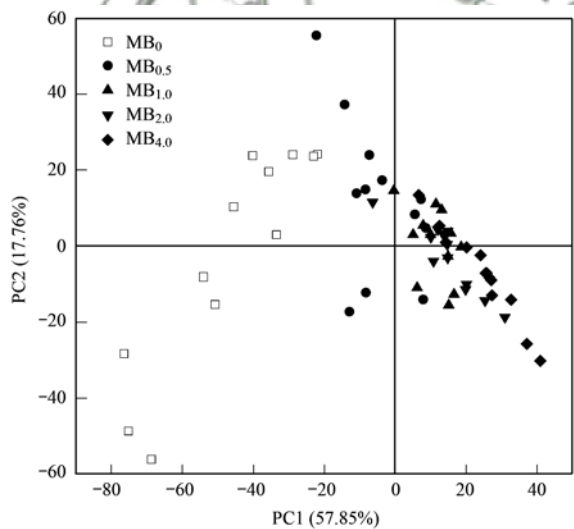


图 4 土壤细菌群落结构主成分分析  
Fig. 4 Principal component analysis of soil bacterial community structure

2.4 酒糟生物炭对土壤细菌群落多样性指数的影响

由表 2 可知,随着酒糟生物炭施用量的增加,土壤细菌 Ace、Chao1 和 Shannon 指数均表现出降低趋势,其中与 MB<sub>0</sub> 处理相比,MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>、MB<sub>4.0</sub> 处理的 Ace 指数显著降低了 6.78%~16.48%,Chao1 指数显著降低了 6.63%~16.62%,Shannon 指数降低了 1.00%~8.13%。Simpson 指数则随着酒糟生物炭施用量的增加表现出增加趋势,与 MB<sub>0</sub> 处

表 2 酒糟生物炭对土壤细菌群落多样性指数的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of biochar on soil bacterial community diversity index

| 处理                | 覆盖度/%          | Ace 指数        | Chao1 指数      | Shannon 指数   | Simpson 指数          |
|-------------------|----------------|---------------|---------------|--------------|---------------------|
| MB <sub>0</sub>   | 99.05 ± 0.04b  | 4 175 ± 109a  | 4 176 ± 105a  | 6.03 ± 0.09a | 0.009 5 ± 0.001 9b  |
| MB <sub>0.5</sub> | 99.12 ± 0.03ab | 3 892 ± 102b  | 3 899 ± 110b  | 5.97 ± 0.07a | 0.013 4 ± 0.003 6ab |
| MB <sub>1.0</sub> | 99.16 ± 0.04a  | 3 653 ± 161bc | 3 647 ± 172bc | 5.73 ± 0.06b | 0.013 2 ± 0.001 4ab |
| MB <sub>2.0</sub> | 99.17 ± 0.03a  | 3 608 ± 93c   | 3 601 ± 83c   | 5.70 ± 0.07b | 0.013 1 ± 0.001 9ab |
| MB <sub>4.0</sub> | 99.17 ± 0.04a  | 3 487 ± 215c  | 3 482 ± 222c  | 5.54 ± 0.25b | 0.015 2 ± 0.004 6a  |

1) 同一列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

理相比, MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>、MB<sub>4.0</sub>处理的 Simpson 指数提高了 37.89%~60.00%, 其中 MB<sub>4.0</sub>显著高于 MB<sub>0</sub> 处理.

2.5 酒糟生物炭对土壤细菌群落丰度和多样性的影响

2.5.1 酒糟生物炭对土壤细菌门水平群落结构的影响

通过对不同处理下的土壤细菌群落组成分析发现, 在门水平上共检测到 31 个细菌种类和未确定类群, MB<sub>0</sub>、MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>和 MB<sub>4.0</sub>处理分别有 33、31、31、31 和 30 个门. 图 5 显示, 变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes) 和绿弯菌门 (Chloroflexi) 的相对丰度较高, 分别为 37.76%~42.66%、10.68%~14.90%、10.35%~14.25%、5.22%~11.00% 和 6.08%~8.11%, 属于细菌优势菌群, 相对丰度合计为 78.56%~83.86%. 在这 5 类优势菌群中, 施用酒糟生物炭显著提高了拟杆菌门 (Bacteroidetes) 的相对丰度, 较 MB<sub>0</sub> 处理提高 1.76

~2.11 倍; 而酸杆菌门 (Acidobacteria) 和绿弯菌门 (Chloroflexi) 的相对丰度则随着酒糟生物炭施用量的增加呈现出明显的降低趋势, 其中 MB<sub>4.0</sub>处理较 MB<sub>0</sub> 处理分别降低了 27.36% 和 17.98%. 在其他相对丰度较小的细菌门中, 施用酒糟生物炭降低了芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、装甲菌门 (Armatimonadetes) 和硝化螺旋菌门 (Nitrospirae) 的相对丰度, 且生物炭施用量越高, 相对丰度越低; 而厚壁菌门 (Firmicutes) 则随着酒糟生物炭施用量的增加表现出显著增加趋势, 其中 MB<sub>4.0</sub>处理较 MB<sub>0</sub> 处理提高 4.24 倍.

2.5.2 酒糟生物炭对土壤细菌属水平群落结构的影响

在属水平上, 共检测到 499 个细菌种类和未确定类群, MB<sub>0</sub>、MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>和 MB<sub>4.0</sub>处理分别有 447、442、429、429 和 441 个属. 图 6 显示, 未施用酒糟生物炭 MB<sub>0</sub> 处理土壤的优势菌群主要包括未分类的  $\beta$ -变形菌 ( $\beta$ -Proteobacteria)、溶杆菌属 (*Lysobacter*)、Gp6、芽孢杆菌属 (*Gemmatimonas*) 和 *Ramlibacter* 等, 而施用酒糟生物炭后处理的土壤优势菌群则主要包括未分类的  $\beta$ -变形菌 ( $\beta$ -Proteobacteria)、溶杆菌属 (*Lysobacter*)、Gp6、芽孢杆菌属 (*Gemmatimonas*)、*Ohtaekwangia* 和 *Aridibacter* 等. 通过对比分析发现, 与 MB<sub>0</sub> 处理相比, 施用酒糟生物炭显著降低了 Gp6、溶杆菌属 (*Lysobacter*) 和芽孢杆菌属 (*Gemmatimonas*) 这 3 类优势菌群的相对丰度, 降幅分别为 22.75%~49.93%、49.35%~90.52% 和 29.88%~59.59%, 均以 MB<sub>4.0</sub>处理的降幅最大, 但却明显提高了 *Ohtaekwangia* 和 *Aridibacter* 两类优势菌群的相对丰度. 除此之外, 随着酒糟生物炭施用量的增加, 链霉菌属 (*Streptomyces*)、极小单胞菌属 (*Pusillimonas*)、*Parasegetibacter* 和 *Steroidobacter* 的相对丰度呈现明显增加趋势, 而 Gp4 以及与氮素转化相关的硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*) 和亚硝化螺菌属 (*Nitrosospora*) 的相对丰度则表现出显著降低趋势.

2.5.3 酒糟生物炭对土壤细菌群落结构影响的 LefSe 分析

LefSe 分析可以显示出不同处理间具有统计学

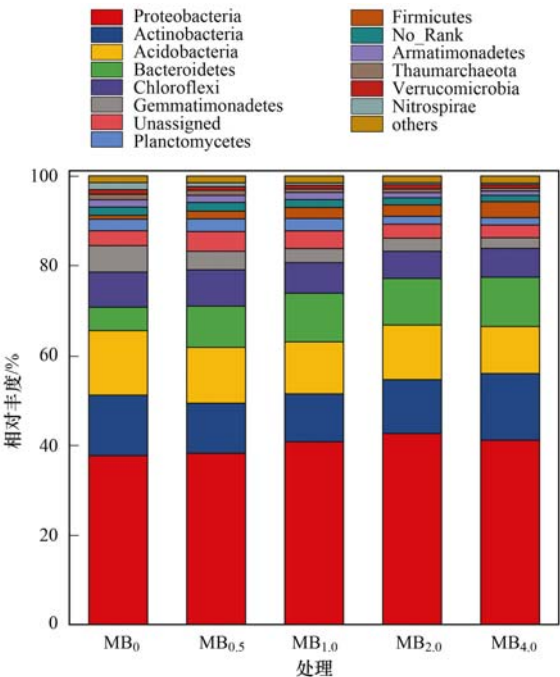


图 5 酒糟生物炭处理土壤细菌门水平主要菌群相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of major microflora at phylum level in soil

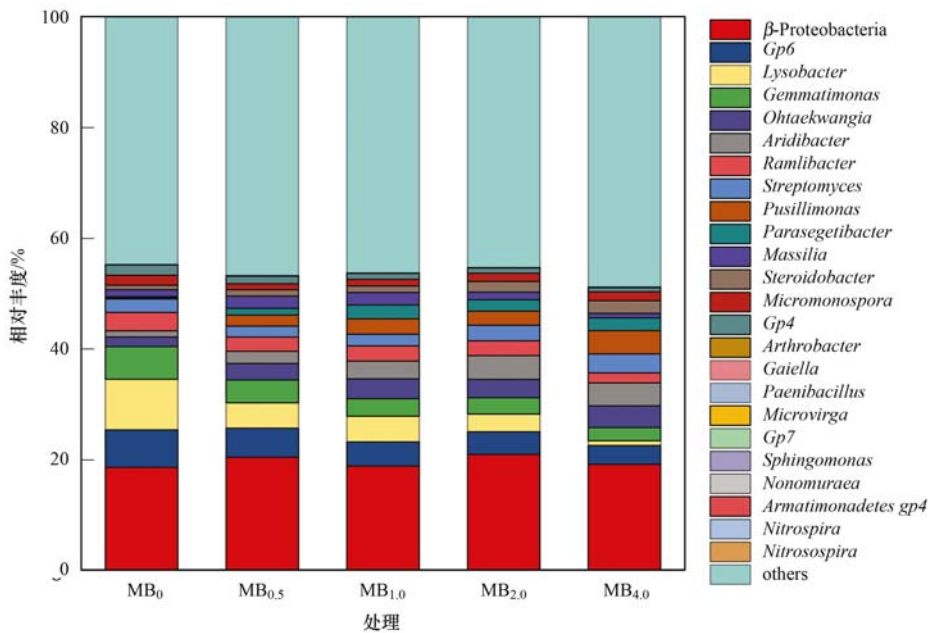


图 6 酒糟生物炭处理土壤细菌属水平主要菌群相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of major microflora at genus level in soil

差异的细菌种类,通过对不同酒糟生物炭施用量下的土壤细菌群落进行 LefSe 分析发现(图 7),未施用酒糟生物炭 MB<sub>0</sub> 处理土壤具有显著性差异的土

壤细菌为奇古菌门(Thaumarchaeota),而施用生物炭 MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub> 和 MB<sub>4.0</sub> 处理具有显著性差异的土壤细菌分别为:酸杆菌门(Acidobacteria)、衣

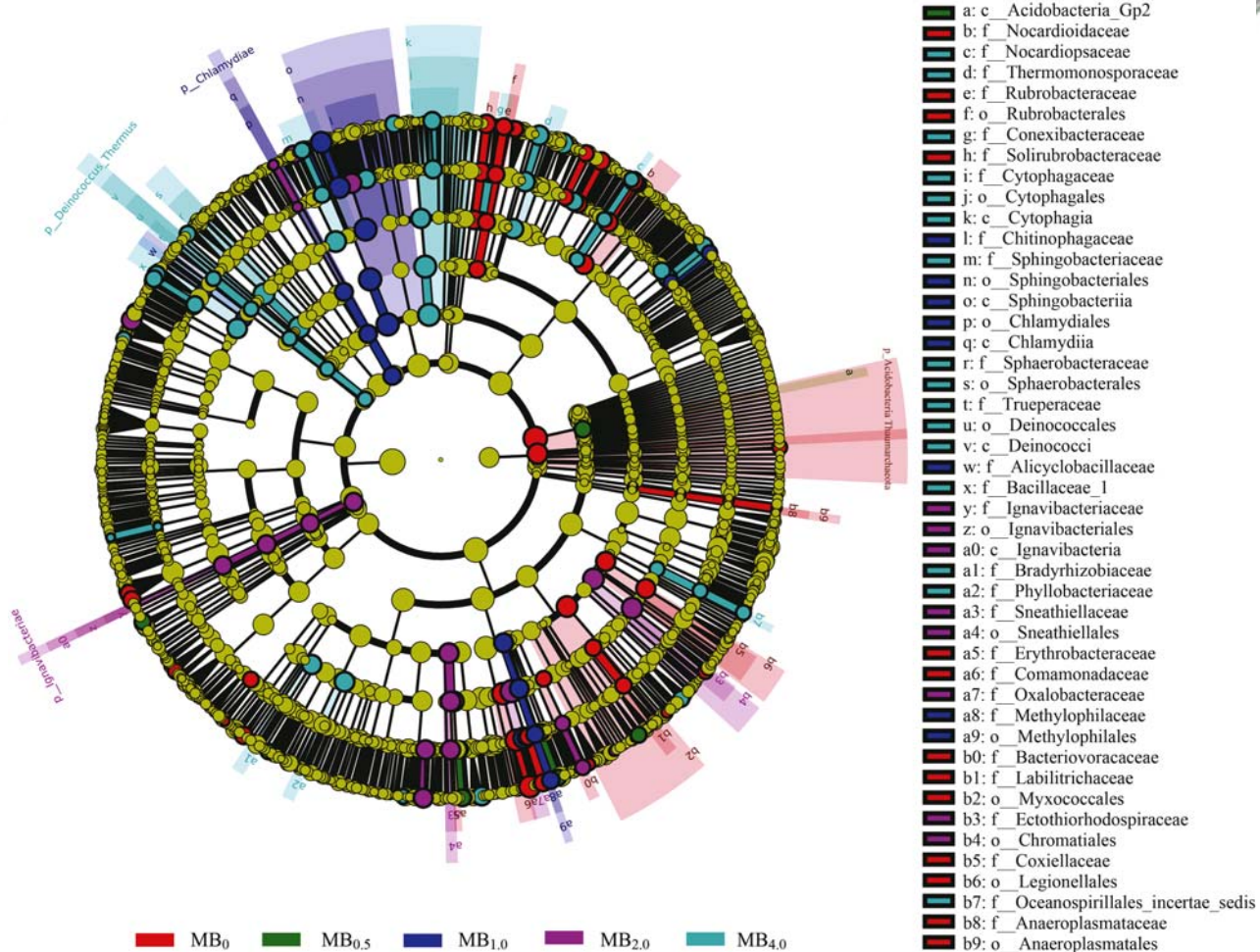


图 7 土壤细菌群落 LefSe 分析

Fig. 7 LefSe analysis of soil bacterial community

原体门(Chlamydiae)、Ignavibacteriae 和异常球菌-栖热菌门(Deinococcus\_Thermus)。

## 2.6 土壤细菌群落结构与土壤氮素的冗余分析

将土壤细菌群落前 12 个优势菌门相对丰度数据进行去趋势对应分析(DCA),结果显示 4 个轴中梯度最大值为 0.64(小于 3),进一步将 12 个优势菌门与土壤氮素进行 RDA 冗余分析(图 8),结果表明土壤门水平细菌群落结构影响前 3 位的依次是 MBN/TN、NN 和 MBN. RDA 分析的第 1 轴解释率为 63.1%,第 2 解释率为 31.1%,累积解释率为 94.2%。同时,将土壤细菌群落前 24 个优势菌属相对丰度数据也进行去趋势对应分析(DCA),结果显示 4 个轴中梯度最大值为 1.37(小于 3),进一步将 24 个优势菌属与土壤氮素进行 RDA 冗余分析(图 9),结果表明土壤属水平细菌群落结构影响前 3 位的依次是 MBN/TN、NN 和 MBN. RDA 分析的第 1 轴解释率为 77.6%,第 2 解释率为 13.4%,累积解释率为 91.0%。

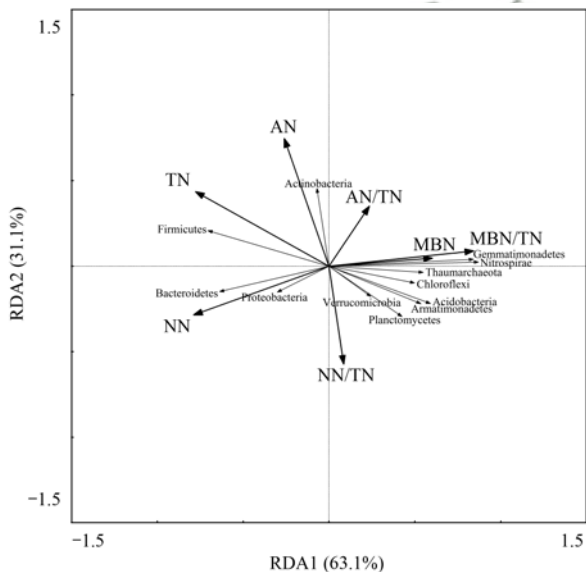


图 8 土壤细菌群落结构与土壤氮素的冗余分析(门水平)

Fig. 8 Redundancy analysis of soil bacterial community structure and soil nitrogen (phylum)

## 3 讨论

### 3.1 生物炭对土壤氮素有效性的影响

土壤氮素转化过程是生态系统氮素循环中的重要组成部分,所有生命均以氮化合物为其营养成分,化合物氮如有机氮、铵态氮、硝态氮等在土壤中的含量经常是植物和微生物生长的限制性因子<sup>[30]</sup>。生物炭还田后,可通过其自身物理化学特性或与土壤相互作用进而影响土壤氮素转化与迁移分布过程,而生物炭施用量以及土壤类型则成为影响土壤氮素迁移分布及淋溶的重要因素<sup>[31,32]</sup>。本研究,施用酒

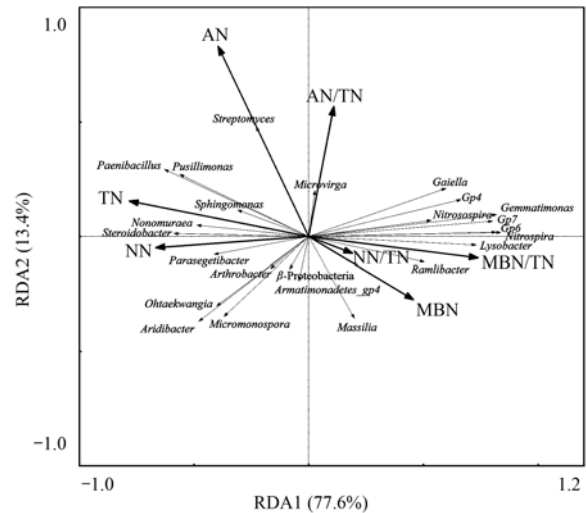


图 9 土壤细菌群落结构与土壤氮素的冗余分析(属水平)

Fig. 9 Redundancy analysis of soil bacterial community structure and soil nitrogen (genus)

糟生物炭使土壤全氮和硝态氮含量分别提高了 35.79%~365.26% 和 122.96%~171.80%,说明短期施用生物炭可以明显提高土壤氮素含量。其主要原因:一方面是由于酒糟生物炭本身含有丰富的氮素,施入土壤后可以瞬间提高土壤氮素含量<sup>[28]</sup>;另一方面,生物炭由于具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积,可以吸附和固持土壤氮素,减少土壤氮素淋溶损失,进而提高土壤氮素养分含量<sup>[33]</sup>。土壤微生物量氮(MBN)是土壤有机氮中最活跃的组分,在土壤有机-无机氮转化以及氮循环过程中起着重要的调节作用。盖霞普等<sup>[34]</sup>的研究发现,生物炭可以提高黑土的 MBN 含量,但是却降低了红壤 MBN 含量,可能与土壤中可利用态碳氮养分消耗有关,说明生物炭对不同土壤类型的土壤微生物量影响差异较大。本研究发现,施用酒糟生物炭显著降低了 MBN 含量,降幅达到 34.10%~59.95%,这与盖霞普等<sup>[34]</sup>的研究结果类似,这可能主要是由于生物炭具有较高的 C/N,施入土壤后碳源过量打破了原有的微生物碳氮平衡,从而抑制了微生物的数量和活性<sup>[35,36]</sup>。此外,虽然短期内酒糟生物炭施用提高了土壤全氮和硝态氮的含量,但是却明显降低了 MBN、NN/TN 和 MBN/TN,说明短期内生物炭的添加能够降低土壤无机氮素的淋失风险,从而提高黄壤的氮素有效性<sup>[37]</sup>,这可能与生物炭通过抑制土壤的氨氧化作用进而影响硝化过程有关<sup>[18]</sup>。

### 3.2 生物炭对土壤细菌群落结构多样性的影响

生物炭的施用必然会直接或间接地导致土壤微生物群落的丰富度和多样性发生改变,这种变化受土壤类型、生物炭种类以及生物炭施用量等多种因素的影响<sup>[10,38]</sup>。本研究发现,短期条件下施用酒糟

生物炭不仅显著降低了贵州黄壤细菌物种丰富度和群落多样性,而且随着生物炭施用量的增加,细菌群落多样性呈明显的降低趋势,这与前人<sup>[39]</sup>的研究结果有所不同。侯建伟等<sup>[10]</sup>研究了不同秸秆生物炭对贵州黄壤细菌群落的影响,结果发现玉米、水稻和油菜秸秆生物炭可以增加黄壤细菌 16S rRNA 基因拷贝数,提高土壤细菌群落多样性和丰富度,而生物炭种类对土壤细菌群落结构影响存在差异。在本研究中,酒糟生物炭是酱香型酒糟经过高温炭化后制得的,酱香型酒糟由于自身发酵后含有丰富的特定微生物群落结构,经过高温炭化后部分特定微生物群落得以保留,而在施入土壤后,抑制了土壤原有细菌群落,改变了原有土壤的微生物环境,从而降低了细菌群落多样性<sup>[40]</sup>;另外,生物炭在土壤中的存留时间也会影响微生物群落结构的变异,而短期内生物炭施用则会明显降低土壤中细菌多样性<sup>[41]</sup>。本研究中,各处理土壤细菌群落优势菌门为变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和绿弯菌门(Chloroflexi),这与前人研究结果较为吻合<sup>[42]</sup>。随着生物炭施用量的增加,拟杆菌门(Bacteroidetes)的相对丰度有所增加,而酸杆菌门(Acidobacteria)和绿弯菌门(Chloroflexi)的相对丰度则出现降低;另外,生物炭的施用还增加了一些功能细菌的相对丰度,如链霉菌属(*Streptomyces*)、极小单胞菌属(*Pusillimonas*)等,降低了溶杆菌属(*Lysobacter*)和芽孢杆菌属(*Gemmatimonas*)等优势菌属的相对丰度,这主要与生物炭施用后土壤微环境发生改变有关<sup>[38,43]</sup>。

氨氧化作用是硝化过程的第一及限速步骤,该作用主要由氨氧化微生物(主要包括氨氧化古菌 AOA 和氨氧化细菌 AOB)推动,而奇古菌门(Thaumarchaeota)的丰度变化则在一定程度上可以反映出 AOA 的变化情况<sup>[18,44]</sup>。本研究通过 LeSe 分析发现,奇古菌门(Thaumarchaeota)在未施用酒糟生物炭(MB<sub>0</sub>)处理中显著高于施用酒糟生物炭(MB<sub>0.5</sub>、MB<sub>1.0</sub>、MB<sub>2.0</sub>和 MB<sub>4.0</sub>)处理,这表明酒糟生物炭的施用显著降低了氨氧化古菌的丰度,抑制氨氧化作用的进行。有研究显示,AOA 和 AOB 的数量均与土壤硝化潜势呈明显正相关性,而在南方酸性土壤中土壤硝化潜势仅与 AOA 存在正相关性,与 AOB 无关<sup>[44~46]</sup>。这可能主要是因为一方面 AOA 对 NH<sub>3</sub> 分子的高亲和力使得其更能适应酸性土壤,而且有机氮更容易刺激 AOA 的生长,因此施用酒糟生物炭后 MBN 的降低可能是导致氨氧化古菌 AOA 丰度降低的主要原因,进而降低了土壤硝化潜势,从而

减少土壤氮素淋溶损失,提高土壤氮素有效性<sup>[44]</sup>;另一方面,可能是由于生物炭施用降低了合成氨相关酶基因表达量,氨氧化古菌丰度也明显降低,从而抑制了氨氧化作用<sup>[18]</sup>。与此同时,本研究中还发现,未施用酒糟生物炭(MB<sub>0</sub>)处理中硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)的丰度为 1.60%,而施用酒糟生物炭处理的硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)的丰度为 0.36%~0.89%,说明施用酒糟生物炭也可以抑制亚硝酸盐氧化过程,从而降低硝化潜势,减少硝酸盐淋溶损失<sup>[47]</sup>。

### 3.3 土壤细菌群落结构与土壤氮素环境的关系

土壤微环境与土壤微生物生长密切相关,土壤养分、水分、通气状况等的改变均可以引起土壤细菌群落组成和结构的变化<sup>[40]</sup>。本研究通过将 12 个优势菌门与土壤氮素进行 RDA 冗余分析发现,MBN/TN、NN 和 MBN 是影响土壤细菌群落结构主要因素,而且 MBN/TN、MBN 与奇古菌门(Thaumarchaeota)和硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)均呈显著正相关性,而 NN 则与奇古菌门(Thaumarchaeota)和硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)呈显著负相关性,说明短期内施用酒糟生物可以通过改变 MBN/TN、NN 和 MBN 来影响土壤细菌群落结构多样性,抑制氨氧化古菌和硝化细菌,进而影响抑制土壤硝化速率<sup>[18,47]</sup>,但是随着生物炭施用时间和生物炭自身老化过程的推进,土壤硝化抑制作用会随之减缩<sup>[48]</sup>。因此,本研究下阶段将开展田间长期定位试验进一步探讨酒糟生物炭对黄壤氮素有效性及微生物群落结构多样性的影响,以期为黄壤氮素利用效率和土壤生产潜力提升提供科学依据。

## 4 结论

(1)施用酒糟生物炭提高了土壤全氮和硝态氮含量,但却降低了 MBN 含量、AT/TN、NN/TN 和 MBN/TN 以及土壤细菌物种总数和群落结构多样性,且随酒糟生物炭施用量的增加,该影响程度随之增加。

(2)酒糟生物炭的施用提高了拟杆菌门(Bacteroidetes)的相对丰度,而酸杆菌门(Acidobacteria)和绿弯菌门(Chloroflexi)的相对丰度则出现降低,同时还能增加了一些功能细菌的相对丰度,如链霉菌属(*Streptomyces*)和极小单胞菌属(*Pusillimonas*)等,降低了溶杆菌属(*Lysobacter*)和芽孢杆菌属(*Gemmatimonas*)等优势菌属的相对丰度。

(3)短期内酒糟生物炭的施用可以通过影响 MBN/TN、NN 和 MBN 的变化显著降低奇古菌门(Thaumarchaeota)和硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)的丰

度,抑制氨氧化作用和硝化作用的进行,从而抑制土壤硝化速率,提高土壤氮素有效性。

#### 参考文献:

- [1] 李渝,刘彦伶,白怡婧,等. 黄壤稻田土壤微生物生物量碳磷对长期不同施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(4): 1327-1334.  
Li Y, Liu Y L, Bai Y J, *et al.* Responses of soil microbial biomass C and P to different long-term fertilization treatments in the yellow paddy soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(4): 1327-1334.
- [2] 张萌,赵欢,肖厚军,等. 贵州典型黄壤辣椒生长、品质及光合特性对新型肥料的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2017, **35**(6): 187-193.  
Zhang M, Zhao H, Xiao H J, *et al.* Responses of growth, quality and photosynthetic characteristics of pepper to new-type fertilizers in Guizhou typical yellow soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, **35**(6): 187-193.
- [3] 宋丹丹,何丙辉,罗松平,等. 黑麦草和生物炭对喀斯特地区黄壤养分影响研究[J]. 草业学报, 2018, **27**(4): 195-201.  
Song D D, He B H, Luo S P, *et al.* The effects of ryegrass and biochar on soil nutrient distribution in Karst area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, **27**(4): 195-201.
- [4] 张萌,肖厚军,赵欢,等. 贵州黄壤区辣椒干物质、氮素积累与分配及氮素利用对新型肥料的响应[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(9): 2983-2990.  
Zhang M, Xiao H J, Zhao H, *et al.* Responses of dry matter, nitrogen accumulation and distribution and nitrogen utilization of pepper to new-type fertilizers in Guizhou yellow soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(9): 2983-2990.
- [5] 王舒,王子芳,龙翼,等. 生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2406-2415.  
Wang S, Wang Z F, Long Y, *et al.* Effect of Fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2406-2415.
- [6] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, *et al.* Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science, 2009, **174**(2): 105-112.
- [7] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, **48**(7): 577-585.
- [8] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. Soil Use and Management, 2011, **27**(1): 110-115.
- [9] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**(5): 1719-1730.
- [10] 侯建伟,邢存芳,卢志宏,等. 不同秸秆生物炭对贵州黄壤细菌群落的影响[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(23): 4485-4495.  
Hou J W, Xing C F, Lu H Z, *et al.* Effects of the different crop straw biochars on soil bacterial community of yellow soil in Guizhou[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(23): 4485-4495.
- [11] 罗梅,田冬,高明,等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4327-4337.  
Luo M, Tian D, Gao M, *et al.* Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4327-4337.
- [12] 王萌萌,周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. 环境化学, 2013, **32**(5): 768-780.  
Wang M M, Zhou Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils[J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(5): 768-780.
- [13] 惠锦卓,张爱平,刘汝亮,等. 添加生物炭对灌溉土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, **35**(2): 156-161.  
Hui J Z, Zhang A P, Liu R L, *et al.* Effects of biochar on soil nutrients and nitrogen leaching in Anthropogenic-Alluvial soil[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, **35**(2): 156-161.
- [14] 李明,李忠佩,刘明,等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(7): 1361-1369.  
Li M, Li Z P, Liu M, *et al.* Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(7): 1361-1369.
- [15] 张星,刘杏认,张晴雯,等. 生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(10): 1943-1950.  
Zhang X, Liu X R, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw direct return on soil microbial biomass during maize growth season in North China Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(10): 1943-1950.
- [16] 张倩,刘冰洁,余璐,等. 生物炭对滨海湿地盐碱土壤碳氮循环的影响[J]. 自然资源学报, 2019, **34**(12): 2529-2543.  
Zhang Q, Liu B J, Yu L, *et al.* Effects of biochar amendment on carbon and nitrogen cycling in coastal saline soils: a review[J]. Journal of Natural Resources, 2019, **34**(12): 2529-2543.
- [17] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **34**(2): 310-318.  
Gai X P, Liu H B, Zhai L M, *et al.* Effects of corn-stalk biochar on inorganic nitrogen leaching from soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(2): 310-318.
- [18] 张梦阳,夏浩,吕波,等. 短期生物炭添加对不同类型土壤细菌和氨氧化微生物的影响[J]. 中国农业科学, 2019, **52**(7): 1260-1271.  
Zhang M Y, Xia H, Lü B, *et al.* Short-term effect of biochar amendments on total bacteria and ammonia oxidizers communities in different type soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, **52**(7): 1260-1271.
- [19] 王晶,马丽娟,龙泽华,等. 秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 420-429.  
Wang J, Ma L J, Long Z H, *et al.* Effects of straw biochar on soil microbial metabolism and bacterial community composition in drip-irrigated cotton field[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 420-429.
- [20] 刘杰云,邱虎森,汤宏,等. 生物质炭对双季水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3799-3807.  
Liu J Y, Qiu H S, Tang H, *et al.* Effects of biochar amendment on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in paddy soils[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3799-3807.
- [21] 陈义轩,宋婷婷,方明,等. 四种生物炭对潮土土壤微生物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(2): 394-404.

- Chen Y X, Song T T, Fang M, *et al.* The effect of four biochar on the structure of microbial communities in alluvial soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(2): 394-404.
- [22] 刘杰云, 邱虎森, 王聪, 等. 生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2394-2403.
- Liu J Y, Qiu H S, Wang C, *et al.* Influence of biochar amendment on soil denitrifying microorganisms in double rice cropping system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2394-2403.
- [23] 刘园, Jamal Khan M, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(4): 849-858.
- Liu Y, Jamal Khan M, Jin H Y, *et al.* Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(4): 849-858.
- [24] 侯建伟, 邢存芳, 邓晓梅, 等. 不同秸秆生物炭对黄壤理化性质及综合肥力的影响[J]. *西北农林科技大学学报*, 2019, **47**(11): 49-59.
- Hou J W, Xing C F, Deng X M, *et al.* Effect of straw biochar on yellow soil physicochemical properties and comprehensive fertility [J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2019, **47**(11): 49-59.
- [25] 悦飞雪, 李继伟, 乔鑫鑫, 等. 生物炭对豫西丘陵区农田土壤团聚体稳定性及碳、氮分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(6): 265-272.
- Yue F X, Li J W, Qiao X X, *et al.* Effects of biochar application on soil aggregates stability and organic carbon and total nitrogen distribution in the Hilly area of western Henan Province, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(6): 265-272.
- [26] 杨倩, 李登科, 王永斌, 等. 秸秆生物炭及秸秆对大豆生长及土壤微生物活性的影响[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2016, **42**(6): 591-597.
- Yang Q, Li D K, Wang Y B, *et al.* Effect of different utilization of residue on soybean growth and soil microbial activity [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2016, **42**(6): 591-597.
- [27] 李青. 贵州省白酒酒糟综合利用的探讨[J]. *酿酒科技*, 2014, (10): 92-93.
- Li Q. Discussion on the comprehensive utilization of distiller's grains of Guizhou Baijiu (Liquor) [J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2014, (10): 92-93.
- [28] 王维锦. 原料和温度对生物质炭性质的影响及便捷式生物质炭化机的试验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- Wang W J. Influence of biomass and temperatures on the properties of biochar and test on the simply-speedy-biomass-pyrolyser [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [30] Haynes R J, Goh K M. Ammonium and nitrate nutrition of plants [J]. *Biological Reviews*, 1978, **53**(4): 465-510.
- [31] Palansooriya K N, Wong J T F, Hashimoto Y, *et al.* Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review [J]. *Biochar*, 2019, **1**(1): 3-22.
- [32] Abujabbar I S, Doyle R B, Bound S A, *et al.* Assessment of bacterial community composition, methanotrophic and nitrogen-cycling bacteria in three soils with different biochar application rates [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(1): 148-158.
- [33] 崔虎, 王莉霞, 欧洋, 等. 生物炭-化肥配施对稻田土壤氮磷迁移转化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(2): 412-421.
- Cui H, Wang L X, Ou Y, *et al.* Effect of the combined application of biochar and chemical fertilizer on the migration and transformation of nitrogen and phosphorus in paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(2): 412-421.
- [34] 盖霞普, 翟丽梅, 王洪媛, 等. 生物质炭对土壤微生物量及其群落结构的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, **48**(4): 399-410.
- Gai X P, Zhai L M, Wang H Y, *et al.* Impacts of biochar on soil microbial biomass and community structure [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, **48**(4): 399-410.
- [35] 孟繁昊, 高聚林, 于晓芳, 等. 生物炭配施氮肥改善表土层生物化学性状研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24**(5): 1214-1226.
- Meng F H, Gao J L, Yu X F, *et al.* Improvement of biochemical property of surface soil by combined application of biochar with nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(5): 1214-1226.
- [36] 吕盛, 王子芳, 高明, 等. 秸秆不同还田方式对紫色土微生物量碳、氮、磷及可溶性有机质的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(5): 265-272.
- Lü S, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of different straw returning methods on soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and soluble organic matter in purple soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(5): 266-272.
- [37] 刘玉学, 吕豪豪, 石岩, 等. 生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 304-310.
- Liu Y X, Lyu H H, Shi Y, *et al.* Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 304-310.
- [38] 王颖, 孙层层, 周际海, 等. 生物炭添加对半干旱区土壤细菌群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2170-2179.
- Wang Y, Sun C C, Zhou J H, *et al.* Effects of biochar addition on soil bacterial community in semi-arid region [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2170-2179.
- [39] Xu N, Tan G C, Wang H Y, *et al.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, **74**: 1-8.
- [40] 陈懿, 吴春, 李彩斌, 等. 炭基肥对植烟黄壤细菌、真菌群落结构和多样性的影响[J]. *微生物学报*, doi: 10.13343/j.cnki.wxsb.20190258.
- Chen Y, Wu C, Li C B, *et al.* Effect of biochar-based fertilizer on bacterial and fungal community composition, diversity in tobacco-planting yellow soil [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, doi: 10.13343/j.cnki.wxsb.20190258.
- [41] Khodadad C L M, Zimmerman A R, Green S J, *et al.* Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(2): 385-392.
- [42] Yao Q, Liu J J, Yu Z H, *et al.* Changes of bacterial community compositions after three years of biochar application in a black soil of northeast China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **113**: 11-21.

- [43] 刘洋, 黄懿梅, 曾全超. 黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3931-3938.  
Liu Y, Huang Y M, Zeng Q C. Soil bacterial communities under different vegetation types in the loess plateau[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3931-3938.
- [44] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制[J]. 微生物学通报, 2013, **40**(1): 98-108.  
He J Z, Zhang L M. Key processes and microbial mechanisms of soil nitrogen transformation[J]. Microbiology China, 2013, **40**(1): 98-108.
- [45] Ying J Y, Zhang L M, He J Z. Putative ammonia-oxidizing bacteria and archaea in an acidic red soil with different land utilization patterns [J]. Environmental Microbiology Reports, 2010, **2**(2): 304-312.
- [46] Yao H Y, Gao Y M, Nicol G W, *et al.* Links between ammonia oxidizer community structure, abundance, and nitrification potential in acidic soils [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, **77**(13): 4618-4625.
- [47] 王晓辉, 郭光霞, 郑瑞伦, 等. 生物炭对设施退化土壤氮相关功能微生物群落丰度的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(3): 624-631.  
Wang X H, Guo G X, Zheng R L, *et al.* Effect of biochar on abundance of N-related functional microbial communities in degraded greenhouse soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(3): 624-631.
- [48] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 等. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展[J]. 生态学报, 2016, **36**(19): 5998-6011.  
Wang H Y, Gai X P, Zhai L M, *et al.* Effect of biochar on soil nitrogen cycling: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(19): 5998-6011.

环 境 科 学

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                    |                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival .....                                                        | FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)       |
| Characterization and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on the Online Observation in Tianjin .....                                                                                    | XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)           |
| Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2017-2018 .....                                                                                             | LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)       |
| Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Southern Beijing .....                                                                                                             | DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374) |
| Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter .....                                                                                               | FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382) |
| Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing .....                                                                                          | XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)        |
| Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019 ..... | ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)       |
| Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City .....                                                                                                                       | GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)        |
| Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential .....                                                                                                       | LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)                       |
| Evolution and Evaluation of O <sub>3</sub> and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period .....                                                           | ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)       |
| Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China .....                                                                                              | KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)   |
| Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers .....                                                                                            | ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)    |
| Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction .....                                                        | ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)        |
| Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017 .....                                                                                                      | LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)            |
| Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province .....                                               | XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)          |
| Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution .....                                                                                                                    | LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)                      |
| Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City .....                                                                                             | ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)                        |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea .....                                          | XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)      |
| Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China .....                         | HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)                       |
| Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River .....          | JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)          |
| Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin .....                                                                        | WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)            |
| Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model .....                                                                                               | FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)          |
| Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution .....                                                                   | GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)     |
| Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years .....                                                                                      | ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)        |
| Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone .....                                                                                           | WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)       |
| Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia .....                                                        | WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)     |
| Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment .....                                                                                                   | JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)   |
| Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> for Degradation of Dyes .....                                              | LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)      |
| Synergistic Reaction Mechanism of Cu <sup>0</sup> @Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol .....                                                     | SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)                      |
| Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process .....                                                                                               | YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)                |
| Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter .....                                                                                                               | SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)          |
| Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment .....                                                                            | LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)           |
| Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge .....                                                                        | QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)    |
| Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio .....                                                                                                            | YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)           |
| Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil .....                                                | WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)                   |
| Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns .....                                                                     | SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)           |
| Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province .....                   | ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)    |
| Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields .....                                                                                     | CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)        |
| <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization .....                                                                                                       | YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)           |
| Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress .....                                                                              | HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)           |
| Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages .....                                                                                                              | DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)       |
| Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area .....                                                                                                 | ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)            |
| Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend .....                                              | WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)           |
| Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing .....                                                                              | WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)           |
| Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing .....                                                                                   | PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)                     |