

目次

2013~2020年天津市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>污染变化趋势和影响因素分析 ..... 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)

2015~2020年济南市O<sub>3</sub>污染趋势及敏感性变化分析 ..... 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)

南京市南部地区O<sub>3</sub>污染特征、生成敏感性及传输影响分析 ..... 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)

天津市“十三五”期间O<sub>3</sub>污染特征和驱动因子 ..... 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)

基于随机森林的南京市PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>对减排的响应 ..... 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)

基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 ..... 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓桐, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)

污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 ..... 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)

2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 ..... 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)

滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 ..... 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)

重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 ..... 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)

衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 ..... 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 ..... 白凡, 周金龙, 周殿竹, 韩双宝, 孙英 (4325)

金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 ..... 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇斌, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 ..... 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)

基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 ..... 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 ..... 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 ..... 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)

太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价 ..... 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)

雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 ..... 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)

基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 ..... 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)

锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 ..... 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)

老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 ..... 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)

畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 ..... 丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)

地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究 ..... 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)

微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 ..... 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)

施加Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/桑秸秆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响 ..... 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)

生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制 ..... 张丽, 李如霞, 何玉玺, 姚彦坡, 林大松 (4479)

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 ..... 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)

椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响 ..... 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 ..... 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)

改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 ..... 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)

改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 ..... 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 ..... 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)

污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 ..... 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)

化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 ..... 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明 (4565)

黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 ..... 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)

微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响 ..... 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (4585)

高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 ..... 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)

土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 ..... 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)

中国省域碳达峰路径与政策 ..... 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 ..... 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 郭娜, 封强, 傅泽强 (4637)

不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 ..... 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 ..... 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)

陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 ..... 古圳威, 刘京, 陈怡, 户新冉, 王思轶 (4666)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 ..... 李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 ..... 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 ..... 秦纪法, 张佳彭, 桑奕, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 ..... 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 ..... 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 ..... 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)

生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 ..... 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)

铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 ..... 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)

畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析 ..... 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)

《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

# 化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响

谢军<sup>1</sup>, 王子芳<sup>1</sup>, 王莹燕<sup>2</sup>, 熊子怡<sup>1</sup>, 高明<sup>1\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 绵阳师范学院资源环境工程学院, 绵阳 621000)

**摘要:**为明确化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化细菌和反硝化势的影响,以柠檬根际土为研究对象,设置不施肥(CK)、化肥(CF)、有机肥(M)、化肥配施生物炭(CFBC)和有机肥配施生物炭(MBC)等5个处理,通过测定根际 *nirS* 型、*nirK* 型和 *nosZ* 型反硝化细菌群落特征、反硝化势和土壤环境因子,明确化肥和有机肥配施生物炭对根际反硝化作用的影响.结果表明,与 CK 相比,CF 处理显著降低根际土壤反硝化势 47.7%,M 和 MBC 处理分别显著增加反硝化势的 2192.7% 和 1989.9%;M 和 MBC 处理显著增加 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌的基因拷贝数,CF 和 CFBC 处理显著降低 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌基因拷贝数,而 4 个施肥处理均显著增加 *nirK* 型反硝化菌基因拷贝数.逐步回归分析结果表明:pH 是 *nirS* 型反硝化菌丰度的主要影响因子,有机质(SOM)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)是 *nirK* 型反硝化菌的主要影响因子,pH、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和氮磷比(N/P)则是 *nosZ* 型反硝化菌的主要影响因子.偏最小二乘法分析结果表明 *nirS* 型反硝化菌、*nosZ* 型反硝化菌、pH、全氮(TN)和 N/P 是影响根际反硝化势的主要因素.因此,在酸性紫色土中,化肥和猪粪有机肥配施生物炭条件下,*nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌是柠檬根际反硝化作用的主要驱动者,同时施肥通过调控根际土壤 pH、TN 和 N/P 影响反硝化过程.

**关键词:**有机肥;生物炭;根际;反硝化势;反硝化细菌

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4565-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209235

## Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil

XIE Jun<sup>1</sup>, WANG Zi-fang<sup>1</sup>, WANG Ying-yan<sup>2</sup>, XIONG Zi-yi<sup>1</sup>, GAO Ming<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** To clarify the effect of chemical fertilizer and manure combined with biochar on denitrifying microorganisms and denitrification potential of rhizosphere soil, a pot experiment growing lemon was conducted involving five treatments, namely no fertilization (CK), chemical fertilizer (CF), manure (M), chemical fertilizer combined with biochar (CFBC), and manure combined with biochar (MBC). We determined the characteristics of the rhizosphere soil *nirS*-, *nirK*-, and *nosZ*-type denitrifying bacteria populations; denitrification potential; and soil environmental factors to clarify the effects of chemical and manure combined with biochar on denitrification. Our results showed that compared with that in CK, the CF treatment reduced the rhizosphere soil denitrification potential by 47.7%, whereas the M and MBC treatments increased the denitrification potential by 2192.7% and 1989.9%, respectively. The M and MBC treatments increased the gene copy number of *nirS* and *nosZ*, the CF and CFBC treatments decreased the gene copy number of *nirS* and *nosZ*, and all four fertilization treatments increased the gene copy number of *nirK*. Stepwise regression analysis showed that pH was the main factor for the abundance of *nirS*-type denitrifying bacteria and SOM and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N were the main factors for the abundance of *nirK*-type denitrifying bacteria, whereas pH, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, and N/P were main factors for the abundance of *nosZ*-type denitrifying bacteria. The results of partial least squares analysis indicated that the abundance of *nirS*- and *nosZ*-type denitrifying bacteria, pH, TN, and N/P were the main factors affecting rhizosphere denitrification potential. Therefore, in acidic purple soil, *nirS*- and *nosZ*-type denitrifying bacteria were the main drivers of the soil denitrification process in lemon rhizospheres under chemical fertilizer and pig manure combined with biochar, whereas fertilizer affected the rhizosphere soil denitrification process by regulating soil pH, TN, and N/P.

**Key words:** manure; biochar; rhizosphere; denitrification potential; denitrifying bacteria

反硝化作用作为生态系统氮流失和释放 N<sub>2</sub>O 的主要途径,是指反硝化微生物在厌氧或微氧条件下将硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)中的氮通过一系列中间产物(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO 和 N<sub>2</sub>O)还原为氮气(N<sub>2</sub>)的过程<sup>[1,2]</sup>.亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)还原为一氧化氮(NO)的过程是反硝化作用中最重要限速步骤,主要由 *nirS* 型和 *nirK* 型亚硝酸盐还原酶功能基因所驱动<sup>[3,4]</sup>.同时,氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)还原为氮气(N<sub>2</sub>)的过程作为反硝化作用的最后一步,主要由氧化亚氮还原酶的唯一功能基因 *nosZ* 驱动<sup>[3]</sup>.施肥措施和环境因子(pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N

和水分等)决定着反硝化微生物的生态位分异<sup>[4,5]</sup>,影响其群落丰度、多样性和结构,从而影响反硝化过程<sup>[6,7]</sup>.因此深入研究反硝化作用并了解其影响机制,对改善土壤氮循环和减少氮损失具有重要意义.

近年来,过量施用氮肥影响了土壤反硝化及氮

收稿日期: 2022-09-25; 修订日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177019)

作者简介: 谢军(1994~),男,博士研究生,主要研究方向为土壤质量与微生物生态, E-mail: xiejun09@outlook.com

\* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

循环过程,不仅造成大量氮流失,增加了农业成本,还造成土壤退化、水体污染和大气污染等环境问题<sup>[8-10]</sup>.生物炭作为一种新兴改良剂,主要来源于农业废弃物,具有高度羧酸酯化和芳香化结构并拥有较大孔隙度和比表面积,能为土壤微生物提供营养元素和栖居场所,在减少氮损失和改善土壤环境方面效果较好<sup>[11-13]</sup>.Yanai等<sup>[14]</sup>、Xu等<sup>[15]</sup>和Wang等<sup>[16]</sup>研究发现生物炭通过改变土壤pH、TN和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,增加nirS型和nosZ型反硝化菌丰度,从而增加土壤反硝化势;Tang等<sup>[2]</sup>和Duan等<sup>[13]</sup>研究发现生物炭通过改变pH和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,增加nirK型反硝化菌丰度,但最终却降低反硝化势.有机肥作为一种传统肥料,具有养分平衡和养分释放慢的特点,能提高氮肥利用率并改良土壤环境<sup>[17,18]</sup>.Yin等<sup>[8]</sup>研究发现有机肥虽然对nirS型和nirK型反硝化菌丰度无显著影响,但能通过改变pH和有效磷(AP)从而增强反硝化势.王军等<sup>[19]</sup>和周慧等<sup>[20]</sup>研究表明有机肥通过提高SOM和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量,增加nirS型和nosZ型反硝化菌丰度,最终增强土壤反硝化势.Surey等<sup>[6]</sup>研究发现施用有机肥虽然会降低nirS型和nosZ型反硝化菌丰度,但会增强反硝化势.生物炭或有机肥对nirS型、nirK型和nosZ型反硝化菌和反硝化势的影响尚无定论,尤其是对有机肥配施生物炭条件下反硝化菌和反硝化势的变化特征知之甚少.

根际是植物根系周围土壤的重要区域,微生物在这个区域范围内丰度和活性均比较高<sup>[21-23]</sup>.与非根际土壤相比,根际作为植物-土壤-微生物相互作用的关键区域,反硝化菌群落具有更高的活性和丰度<sup>[24-26]</sup>.有机肥或生物炭对非根际土壤反硝化势以及nirS型、nirK型和nosZ型反硝化菌群落特征的影响已有大量研究<sup>[16,27-30]</sup>,然而有机肥配施生物炭对根际反硝化势和反硝化菌群落的影响却研究较少,尤其是有机肥配施生物炭调控根际土壤环境因子和反硝化菌从而影响反硝化势的过程和机制不明确.

因此,本文以柠檬根际土为研究对象,设置不施肥(CK)、化肥(CF)、有机肥(M)、化肥配施生物炭(CFBC)和有机肥配施生物炭(MBC)等处理,明确化肥和有机肥配施生物炭条件下,根际nirS型、nirK型和nosZ型反硝化菌丰度、多样性和群落结构,以及反硝化势和环境因子的变化特征,阐明有机肥配施生物炭通过改变根际土壤环境因子和反硝化菌群落特征从而调控反硝化势的过程和机制,以期改善土壤氮循环和减少氮损失提供依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试土壤为紫色潮土,采自重庆市潼南区太安镇柠檬种植基地(0~30 cm).采集的土壤置于阴凉干燥处自然风干,去除杂质后研磨过2 mm筛,保存备用.初始土壤理化性质:pH 5.19、 $\omega$ (SOM) 8.68 g·kg<sup>-1</sup>、 $\omega$ (TN) 0.68 g·kg<sup>-1</sup>、 $\omega$ (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 3.46 mg·kg<sup>-1</sup>、 $\omega$ [铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)] 4.82 mg·kg<sup>-1</sup>、 $\omega$ (AP) 9.14 mg·kg<sup>-1</sup>和 $\omega$ [速效钾(AK)] 244.12 mg·kg<sup>-1</sup>.供试柠檬品种为尤力克(Eureka),为嫁接7个月的脱毒苗,来自重庆市潼南区国家科技农业园区智能化柠檬脱毒育苗中心.

供试生物炭为稻壳生物炭,由四川省久晟农业公司提供,以稻壳为原料,在500℃高温厌氧条件下热解2 h制成.供试有机肥(腐熟猪粪)取自重庆市潼南温氏养猪场.生物炭和有机肥(腐熟猪粪)的性质如表1所示.化肥氮、磷和钾肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%).微量元素肥料为硼锌锰铁镁钙硅复合微量元素水溶肥料,pH为6.0,微量元素总量(质量分数)≥12%.

表1 供试生物炭和有机肥基本性质<sup>1)</sup>

供试材料	pH	$\omega$ /g·kg <sup>-1</sup>			
		C	N	P	K
稻壳生物炭	9.50	238.52	0.81	1.75	6.83
有机肥(腐熟猪粪)	8.89	—	22.91	51.5	8.80

1) “—”表示没有测定该项元素

### 1.2 试验设计

盆栽试验设置5个处理:①不施肥(CK)、②常规化肥(CF)、③有机肥(M)、④化肥+生物炭(CFBC)和⑤有机肥+生物炭(MBC),每个处理3次重复,试验采用随机区组设计.

2019年5月种植柠檬.称取过2 mm筛的备用土壤15 kg,按照等氮施肥的原则将化肥、有机肥或生物炭与土壤充分混匀后装入盆钵.盆钵是盆口直径22 cm,高30 cm的PVC圆桶.施用完基肥后放置15 d,然后选择大小和长势基本一致的柠檬苗移栽,每个盆钵1株.

移栽定植后浇水灌透,每个盆栽浇水的重量为田间持水量的60%.随后适时浇水,每次浇水的重量保持一致.生物炭作为基肥一次性施入,有机肥和无机肥则基肥施入三分之二,剩余三分之一用于追肥.每隔2个月进行一次追肥,共追肥4次.除CK处理外,各处理保持等氮的施肥原则,各处理单株柠

檬幼苗基肥施入纯氮均为 2.625 g,各处理肥料类型 和具体施肥量见表 2.

表 2 各处理施肥总量<sup>1)</sup>/g

处理	化肥			有机肥	生物炭	微量元素
	尿素	过磷酸钙	氯化钾			
CK	—	—	—	—	—	—
CF	13.32	51.05	7.12	—	—	5.04
M	—	—	—	757.38	—	—
CFBC	13.07	46.50	3.57	—	133.35	5.04
MBC	—	—	—	744.11	133.35	—

1) CK 表示不施肥, CF 表示施化肥, M 表示施有机肥, CFBC 表示化肥配施生物炭, MBC 表示有机肥配施生物炭, 下同; “—”表示没有该项数据

### 1.3 土壤样品采集与测定

2020 年 6 月进行破坏性取样, 用抖土法收集根际土<sup>[31,32]</sup>. 先慢慢取出带土的柠檬植株, 轻轻抖落植株根系上的较大颗粒土, 再用细毛刷将黏附在须根上的根际土收集至无菌自封塑料袋中, 将采集的新鲜土壤迅速带回实验室. 一部分置于 -20℃ 的冰箱中保存, 用于测定反硝化势、反硝化菌丰度和群落结构; 一部分自然风干, 去除杂质, 研磨后分别过 1 mm 和 0.15 mm 筛, 测定土壤理化性质.

土壤 pH 值采用酸度计测定(土水比 1:2.5), SOM 采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 外加热法测定, TN 采用凯氏定氮法测定, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用 KCl 溶液浸提分光光度法测定, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用 KCl 溶液浸提靛酚蓝比色法测定, AP 采用 Olsen 法测定, 土壤含水量(SMC)采用烘干法测定<sup>[33]</sup>. 土壤反硝化势采用乙炔抑制法测定<sup>[29]</sup>.

### 1.4 反硝化微生物基因丰度和群落结构的分析

#### 1.4.1 土壤总 DNA 提取

用 Fast DNA Spin Kit for Soil (MP Biomedicals, LLC) 试剂盒提取土壤总 DNA, 在 1.0% 琼脂糖凝胶上进行电泳检测后用 NanoDrop ND-1000UV-Vis 分光光度计测定总 DNA 的浓度.

#### 1.4.2 实时荧光定量 PCR (qPCR) 分析

标准样品制作: 设计特定引物, 对 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因片段进行 PCR 扩增, 扩增引物 *nirS* (*nirSCd3aF/nirSR3cd*)<sup>[34]</sup>、*nirK* (*nirK1040q/nirK876q*)<sup>[35]</sup>、*nosZ* (*nosZF/nosZ1622R*)<sup>[35]</sup>, 用 DNA 凝胶纯化试剂盒纯化目的基因片段, 将目的基因片段克隆至载体中, 进行测序检验出阳性重组质粒, 将阳性克隆质粒收集为标准品. 用 NanoDrop ND-1000 微光分光光度计测定质粒 DNA 浓度并计算拷贝数, 将其以 10 倍浓度梯度稀释成标准品.

样品测定: 将待测样品和标准品一起进行 qPCR 检测, 每个样品 3 个重复(包括阴性对照在内), 具体反应体系和程序见文献[35]. 每个循环中荧光收集在 83℃ 下进行, 避免引物二聚体引起的误差. 荧

光定量 PCR 分析由 ABI 7500 型实时荧光定量 PCR 系统进行.

#### 1.4.3 末端限制性片段长度多态性(T-RFLP)分析

利用 T-RFLP 技术测定反硝化功能基因的群落结构. 选用正向引物 5'端带荧光物质 FAM 标记的引物扩增 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因片段, 扩增所需引物见文献[34], 扩增体系和程序见文献[35]. 随后将 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因的 PCR 扩增产物分别用 *Hha*I 和 *Taq*2I 和 *Rsa*I 限制性内切酶进行单酶切, 置于 37℃ 的恒温培养箱中培养 14 ~ 16 h, *Hha*I 酶还要在 80℃ 的烘箱中灭活 30 min, 然后送至上海生工生物工程股份有限公司用 ABI Prism 3100 基因分析仪进行 T-RFLP 分析.

#### 1.5 数据分析

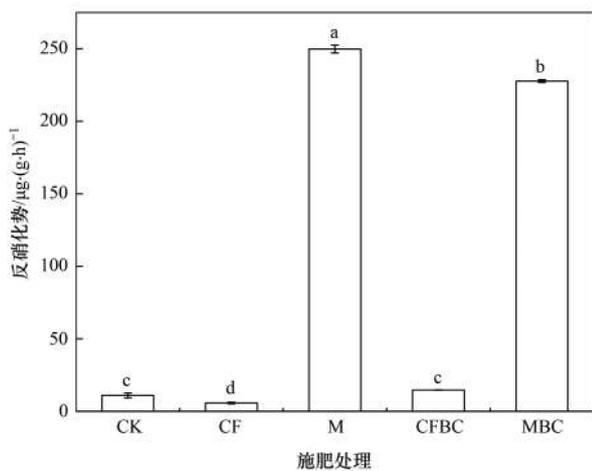
用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理, Origin 2021 软件进行图表绘制, 所有结果均用 3 次重复的平均值和标准偏差表示. 用 IBM SPSS 26.0 软件对土壤理化性质和基因拷贝数等数据进行 ANOVA 方差分析、Pearson 相关性分析以及逐步回归分析, 用 Duncan 法进行不同处理之间的多重比较 ( $P < 0.05$ ). 用 Canoco 5.0 软件进行土壤环境因子和反硝化菌群落结构的冗余分析(RDA). 用 Origin 2021 软件进行反硝化势与土壤环境因子和反硝化菌的偏最小二乘法分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对根际反硝化势和土壤性质的影响

不同施肥处理的反硝化势如图 1 所示. 与 CK 处理相比, CF 处理显著降低根际土壤反硝化势 47.7%, 而 M 和 MBC 处理分别显著增加反硝化势 2192.7% 和 1989.9%. 因此, 施用化肥会显著降低根际土壤反硝化势, 而有机肥和有机肥配施生物炭会增加反硝化势.

与 CK 处理相比, CF 和 CFBC 显著降低 pH 0.34 ~ 0.63 个单位, M 和 MBC 增加 pH 0.29 ~ 0.54



不同小写字母表示不同施肥处理间反硝化势的差异性( $P < 0.05$ )

图 1 不同施肥处理对根际土壤反硝化势的影响

Fig. 1 Effect of different fertilization treatments on denitrification potential of rhizosphere soil

表 3 不同施肥处理对根际土壤性质的影响<sup>1)</sup>

Table 3 Effect of different fertilizer treatments on rhizosphere soil properties

施肥处理	pH	SMC /%	$\omega(\text{SOM})$ /g·kg <sup>-1</sup>	$\omega(\text{TN})$ /g·kg <sup>-1</sup>	$\omega(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ /mg·kg <sup>-1</sup>	$\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})$ /mg·kg <sup>-1</sup>	$\omega(\text{AP})$ /mg·kg <sup>-1</sup>	C/N	N/P
CK	5.16 ± 0.12c	22.32 ± 0.55b	8.20 ± 0.09c	0.56 ± 0.03d	4.56 ± 0.63d	1.65 ± 0.11c	8.34 ± 0.49d	8.49 ± 0.11c	0.55 ± 0.06a
CF	4.53 ± 0.11e	16.70 ± 0.68c	8.27 ± 0.03c	0.66 ± 0.02c	13.19 ± 1.06a	15.59 ± 0.53a	51.61 ± 1.57b	7.26 ± 0.04d	0.26 ± 0.04b
M	5.45 ± 0.14b	26.91 ± 0.61a	13.05 ± 0.05a	0.81 ± 0.04a	7.68 ± 0.51c	7.13 ± 0.42b	85.70 ± 1.66a	9.35 ± 0.05b	0.05 ± 0.01e
CFBC	4.82 ± 0.09d	27.98 ± 0.94a	12.79 ± 0.398a	0.86 ± 0.09a	9.29 ± 0.34b	15.83 ± 0.41a	48.36 ± 1.59b	6.93 ± 0.23d	0.15 ± 0.02c
MBC	5.70 ± 0.10a	27.47 ± 0.91a	10.28 ± 0.06b	0.71 ± 0.06b	8.82 ± 0.30b	8.14 ± 1.05b	38.67 ± 0.98c	10.45 ± 0.12a	0.10 ± 0.01d

1) 数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误, 同列不同小写字母表示不同施肥处理间差异达 5% 显著水平, SMC: 土壤含水量, SOM: 有机质, TN: 全氮, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 铵态氮, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 硝态氮, AP: 有效磷, C/N: 碳氮比, N/P: 氮磷比

24.75% 和 106.5%, CF 和 CFBC 处理分别显著降低 *nirS* 基因拷贝数 55.6% 和 36.9% [图 2(a)]; 4 个施肥处理显著增加 *nirK* 基因拷贝数 17.3% ~ 123.9%, 其中 M 和 CFBC 处理增幅均为最显著 [图 2(b)]; M 和 MBC 处理均显著增加 *nosZ* 基因拷贝数约 9.0%, 而 CF 和 CFBC 处理分别显著降低 *nosZ* 基因拷贝数 51.7% 和 42.0% [图 2(c)].

对 *nirS* 型反硝化菌而言, M、CFBC、MBC 处理

个单位; CF 处理降低土壤含水率约 6%, M、CFBC、MBC 增加含水率约 6%; M、CFBC 和 MBC 等处理增加 SOM 含量 25.4% ~ 59.2%; 4 个施肥处理分别增加 TN 含量 17.9% ~ 53.6%、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量 68.4% ~ 189.3%、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量 332.1% ~ 859.4% 和 AP 含量 363.7% ~ 927.6%, 显著降低 N/P 52.7% ~ 90.9%; CF 和 CFBC 处理显著降低 C/N, M 和 MBC 处理增加 C/N (表 3).

### 2.2 不同施肥处理对根际土壤反硝化菌基因丰度和多样性的影响

5 个处理的 *nirS* 基因拷贝数为  $3.14 \times 10^5 \sim 1.43 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ , *nirK* 基因拷贝数为  $3.01 \times 10^7 \sim 6.74 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ , *nosZ* 基因拷贝数为  $2.29 \times 10^8 \sim 5.24 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \mu\text{L}^{-1}$  (图 2). 与 CK 相比, M 和 MBC 处理分别显著增加 *nirS* 基因拷贝数

的多样性、丰富度和均匀度指数均显著高于 CK 处理, CF 处理的多样性和丰富度指数则显著低于 CK 处理. 对 *nirK* 型反硝化菌而言, 与 CK 相比, CF、M、CFBC、MBC 处理的多样性指数和均匀度指数均显著降低, M 和 CFBC 处理的丰富度指数显著增加. 对 *nosZ* 型反硝化菌而言, 与 CK 相比, CF、M、MBC 处理的多样性指数显著增加, M 和 MBC 处理的丰富度指数显著增加, 4 个施肥处理的均匀度指数均显著增加 (表 4).

表 4 不同施肥处理对根际反硝化菌群落  $\alpha$ -多样性的影响<sup>1)</sup>

Table 4 Effect of different fertilizer treatments on denitrifying bacteria community  $\alpha$ -diversity of rhizosphere

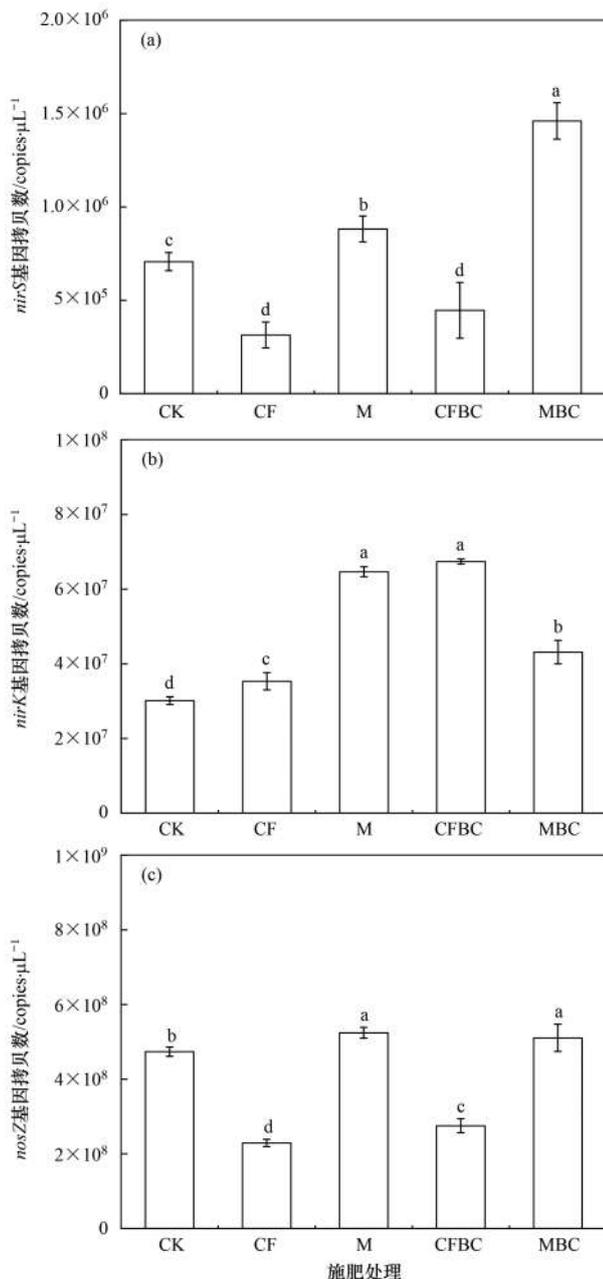
处理	<i>nirS</i>			<i>nirK</i>			<i>nosZ</i>		
	多样性	丰富度	均匀度	多样性	丰富度	均匀度	多样性	丰富度	均匀度
CK	1.13 ± 0.01d	1.38 ± 0.05c	0.42 ± 0.00c	2.14 ± 0.21a	0.82 ± 0.08c	1.13 ± 0.12a	1.39 ± 0.10c	1.48 ± 0.20c	0.53 ± 0.02c
CF	1.01 ± 0.04e	0.90 ± 0.11d	0.46 ± 0.01c	1.68 ± 0.14b	0.94 ± 0.08bc	0.79 ± 0.08bc	1.89 ± 0.02b	1.38 ± 0.10c	0.73 ± 0.02a
M	1.83 ± 0.10b	1.60 ± 0.02b	0.64 ± 0.04b	1.52 ± 0.19b	1.86 ± 0.24a	0.56 ± 0.10d	2.10 ± 0.29a	2.66 ± 0.26a	0.65 ± 0.07ab
CFBC	1.22 ± 0.04c	1.46 ± 0.05c	0.45 ± 0.02c	1.58 ± 0.06b	0.99 ± 0.07b	0.75 ± 0.02c	1.49 ± 0.07c	1.09 ± 0.24d	0.62 ± 0.02b
MBC	2.16 ± 0.05a	1.78 ± 0.16a	0.75 ± 0.01a	1.53 ± 0.30b	0.76 ± 0.08c	0.88 ± 0.05b	2.07 ± 0.05a	2.10 ± 0.09b	0.68 ± 0.03a

1) 数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误, 同列不同小写字母表示不同施肥处理间差异达 5% 显著水平

### 2.3 不同施肥处理对根际土壤反硝化菌群落结构的影响

由图 3(a) 可知, 各处理的根际土 *nirS* 型反硝化

菌群落中均有 81bp 这一优势 T-RFs 片段, 相对丰度为 37.7% ~ 73.8%. 79bp 的 T-RFs 片段在 4 个施肥处理中属于优势 T-RFs 片段, 相对丰度为 11.3% ~

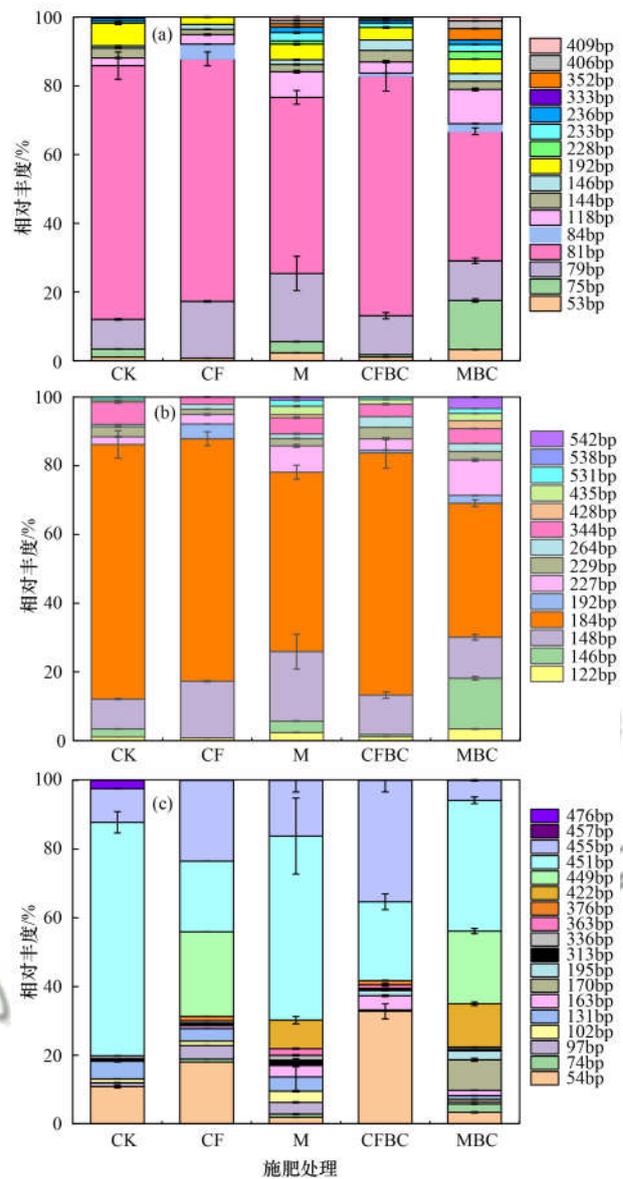


不同小写字母表示不同施肥处理间基因拷贝数的差异性 ( $P < 0.05$ )

图2 不同施肥处理对根际反硝化细菌丰度的影响

Fig. 2 Effect of different fertilizer treatments on the abundance of denitrification bacteria in rhizosphere

19.8%。由图3(b)可知,264、435和538bp为主要T-RFs片段,总相对丰度为57.4%~89.4%。264bp在各处理中均属于优势T-RFs片段,相对丰度为20.9%~57.0%。538bp在除CFBC处理外的其他处理中属于优势T-RFs片段,相对丰度为13.2%~23.0%。由图3(c)可知,451bp在各处理中均属于优势T-RFs片段,相对丰度分别为20.7%~68.2%。455bp在CF、M和MBC处理中属于优势T-RFs片段,相对丰度分别为16.3%~35.8%。54bp仅在CK、CF和CFBC处理中属于优势T-RFs片段,相对丰度分别为10.9%、18.0%和32.8%。



(a) *nirS*, (b) *nirK*, (c) *nosZ*

图3 不同施肥处理对根际土壤反硝化细菌群落结构的影响

Fig. 3 Effect of different fertilizer treatments on denitrifying bacteria community composition of rhizosphere

## 2.4 根际土壤反硝化细菌群落结构与土壤环境因子的关系

根际土壤环境因子共能解释 *nirS* 群落结构变化的86.4%,第1和第2排序轴的贡献率分别为56.2%和17.1% [图4(a)],其中pH、 $\text{NO}_3^-$ -N、SOM和AP等因子均有显著影响 ( $P < 0.05$ ),解释率分别为48.8%、12.8%、12.0%和5.4%。环境因子共能解释 *nirK* 群落结构变化的98.8%,第1和第2排序轴的贡献率分别为57.4%和24.3% [图4(b)],其中pH、C/N、AP、 $\text{NO}_3^-$ -N、TN和SMC等因子均有显著影响 ( $P < 0.05$ ),解释率依次为47.4%、27.3%、13.0%、8.9%、1.0%和0.8%。环境因子共能解释 *nosZ* 群落结构变化的87.1%,第1

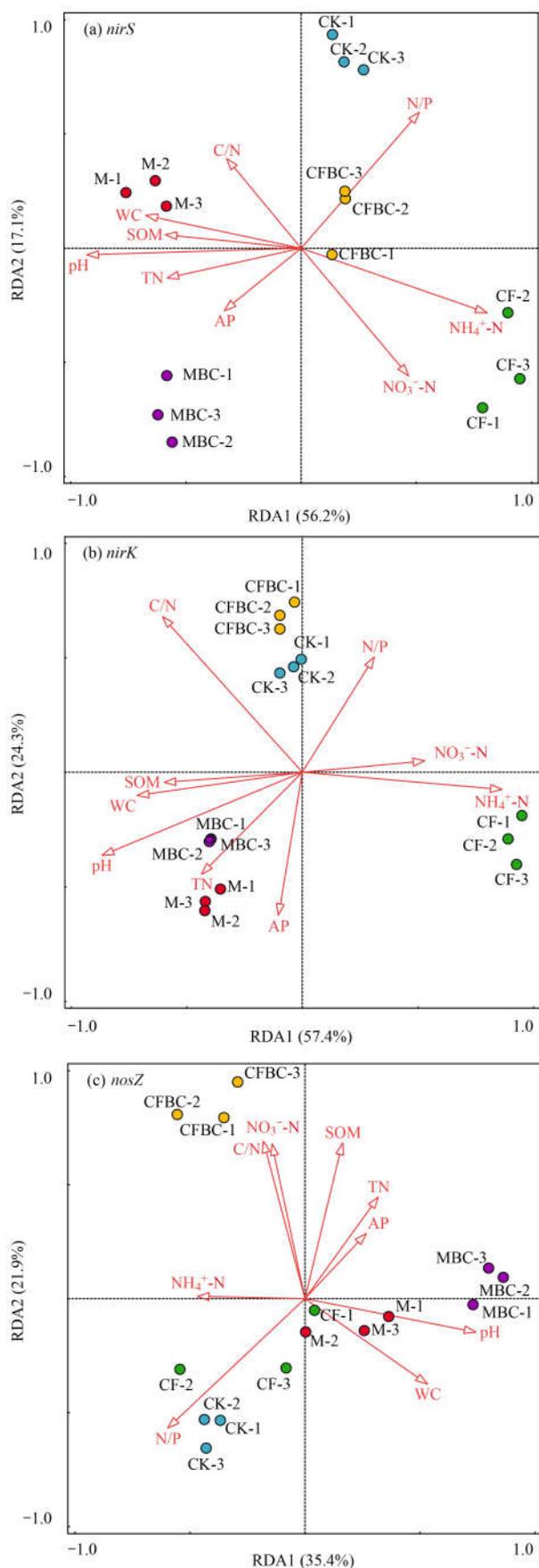


图4 根际土壤环境因子与反硝化菌群落结构的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of rhizosphere soil environmental factors and denitrifying bacteria community structure

和第2排序轴的贡献率分别为35.4%和21.9% [图4(c)], 其中pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SOM和AP等因子均有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 解释率分别为23.6%、21.2%、18.3%和11.9%.

## 2.5 根际土壤反硝化势与反硝化菌丰度和土壤环境因子的关系

根际土壤反硝化势与反硝化菌丰度和土壤环境因子的相关关系如图5所示. 反硝化势与 *nirS* 型、*nosZ* 型反硝化菌丰度和 pH 极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 TN 和 AP 显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 N/P 显著负相关 ( $P < 0.05$ ). *nirS* 型反硝化菌丰度与 *nosZ* 型反硝化菌丰度、pH 和 SMC 极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 显著负相关 ( $P < 0.05$ ). *nirK* 型反硝化菌丰度与 SOM 和 TN 极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 AP 和 C/N 显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与 N/P 显著负相关 ( $P < 0.05$ ). *nosZ* 型反硝化菌丰度与 pH 和 SMC 极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 显著负相关 ( $P < 0.05$ ).

逐步回归分析结果表明: *nirS* 型反硝化菌丰度的主要影响因子为 pH, *nirK* 型反硝化菌丰度的主要影响因子为 SOM 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, *nosZ* 型反硝化菌丰度的主要影响因子为 pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 N/P (表5). 偏

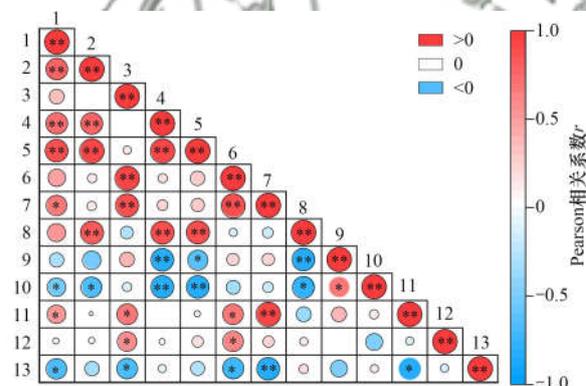


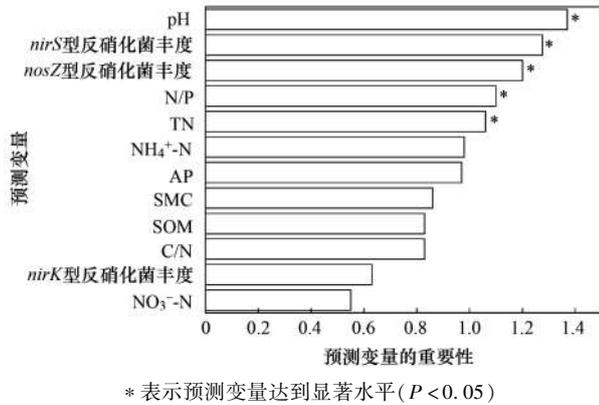
图5 根际土壤反硝化势与反硝化菌丰度和土壤环境因子的相关关系

Fig. 5 Correlation between rhizosphere soil denitrification potential and the abundance of denitrification bacteria and soil environmental factors

表5 土壤反硝化菌丰度与土壤环境因子的逐步回归分析

反硝化菌丰度	土壤环境因子	F 值	调整后 R <sup>2</sup>	P 值
<i>nirS</i> 型	pH	83.5	0.86	<0.01
<i>nirK</i> 型	SOM 和 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	82.9	0.92	<0.05
<i>nosZ</i> 型	pH、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 和 N/P	15.8	0.98	<0.01

最小二乘法分析结果表明 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌丰度是影响根际反硝化势的主要微生物因素, 而 pH、N/P 和 TN 是影响根际反硝化势的主要土壤因素(图 6).



\* 表示预测变量达到显著水平 ( $P < 0.05$ )  
图 6 偏最小二乘法分析根际土壤环境因子和反硝化菌丰度对反硝化势的平均预测重要性

Fig. 6 Average predictive importance of rhizosphere soil environmental factors and denitrifying bacteria abundance on denitrification potential by partial least squares analysis

### 3 讨论

#### 3.1 化肥和有机肥配施生物炭对根际反硝化菌丰度的影响

本研究表明与 CK 相比, CF 和 CFBC 显著降低根际 *nirS* 型反硝化菌丰度, 这与董成等<sup>[36]</sup> 研究的结果不一致, 他发现化肥和化肥配施生物炭会显著增加 *nirS* 型反硝化菌丰度. 这可能是因为在他们的研究中土壤 pH 为 8.3, 而本研究中酸性紫色土 pH 为 5.19. 土壤酸度不同导致化肥和化肥配施生物炭对 *nirS* 型反硝化菌丰度的影响具有差异. 本文研究发现 pH 与 *nirS* 型反硝化菌丰度极显著正相关(图 5), 且逐步回归分析表明 pH 是解释 *nirS* 型反硝化菌丰度变化最好的土壤因子(表 5). 这是因为 CF 处理使原始土壤 pH(5.19) 下降了 0.63 个单位(表 3), 这会抑制 *nirS* 型细菌的生长与活性, 从而降低其丰度. 而 M 和 MBC 处理显著增加根际 *nirS* 型反硝化菌丰度, 这与王军等<sup>[19]</sup> 研究的结果一致. 因为 M 和 MBC 处理使原始土壤 pH(5.19) 分别增加了 0.29 个单位和 0.54 个单位(表 3), 酸性土壤 pH 的改善有利于 *nirS* 型细菌的生长<sup>[37,38]</sup>. 因此, 化肥和有机肥配施生物炭主要通过调控根际土壤 pH 来影响 *nirS* 型反硝化菌丰度.

本研究发现, 化肥、有机肥、化肥和有机肥配施生物炭均能增加根际 *nirK* 型反硝化菌丰度, 这与曾希柏等<sup>[39]</sup> 研究的结果一致. 这是因为 *nirK* 型反硝化菌丰度与 SOM 显著正相关(图 5), 且 SOM 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 是影响其最主要的土壤因子(表 5). 化肥和

有机肥配施生物炭显著增加 SOM 含量(表 3), 这为 *nirK* 型反硝化菌提供丰富的碳源和营养物质<sup>[6,8]</sup>. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 作为硝化作用的反应底物, 能决定土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量, 从而间接影响反硝化菌的生长和活性<sup>[13,25]</sup>. 因此, 化肥和有机肥配施生物炭主要通过改变根际土壤 SOM 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 来影响 *nirK* 型反硝化菌丰度.

有机肥和有机肥配施生物炭能增加根际 *nosZ* 型反硝化菌丰度, 但化肥和化肥配施生物炭却相反, 这与 Yin 等<sup>[8]</sup> 和王培欣等<sup>[40]</sup> 研究的结果一致, 这可能与施肥改变了土壤性质有关. 相关性结果表明 *nosZ* 型反硝化菌丰度与 pH 呈正相关, 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 显著负相关(图 5); 逐步回归分析表明 pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 N/P 是影响其最主要的土壤因子(表 5). 施用化肥导致土壤酸化, pH 下降(表 3), 酸性土壤 pH 降低会强烈抑制 *nosZ* 型反硝化菌的生长和活性<sup>[3,8]</sup>. N/P 能影响 *nosZ* 型反硝化菌丰度可能是因为磷的有效性在构建土壤微生物群落中具有重要作用, 在微生物细胞的生长过程中, 需要富含磷的核糖体才能产生新的蛋白质<sup>[41]</sup>; 同时, 土壤 N/P 的改变会影响土壤碳氮循环从而影响反硝化菌对营养物质的吸收利用, 最终影响其生长<sup>[42]</sup>. 本研究中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与 *nosZ* 型反硝化菌丰度显著负相关, 表明 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 也是影响 *nosZ* 型反硝化菌丰度的因子之一, 这与 Yang 等<sup>[43]</sup> 研究的结果相符. 因此, 化肥和有机肥配施生物炭主要通过调控 pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 N/P 来影响 *nosZ* 型反硝化菌丰度.

#### 3.2 化肥和有机肥配施生物炭条件下根际反硝化细菌群落结构的驱动因子

化肥和有机肥配施生物炭显著改变 *nirS* 型、*nirK* 型和 *nosZ* 型反硝化菌群落结构, 反硝化菌群落结构受土壤各环境因子的协同影响. 冗余分析结果表明: 施肥通过改变 pH、SOM、C/N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SMC、TN 和 AP 等因子从而驱动 *nirS* 型、*nirK* 型和 *nosZ* 反硝化菌群落结构, 这与 Yin 等<sup>[8]</sup>、曾希柏等<sup>[39]</sup> 和王培欣等<sup>[40]</sup> 研究的结果一致. 土壤 pH 对反硝化菌具有选择效应, 其变化会影响反硝化菌的群落结构进而影响它们对土壤环境变化的响应<sup>[1,3]</sup>. 本研究中施用化肥显著降低土壤 pH, 酸性土壤 pH 降低会限制反硝化菌的生长, 同时还会导致反硝化菌可利用的有机碳和矿质氮的有效性下降<sup>[1,2]</sup>. 而有机肥配施生物炭处理能有效改善酸性土壤 pH, 有利于反硝化菌群落的生长活动和繁衍<sup>[13,15]</sup>. 同时有机肥配施生物炭显著增加 SOM 含量, 既能为反硝化过程提供电子, 又能作为反硝化菌生长和活动的有机底物<sup>[19,25]</sup>. 因为大部分反硝化菌是异养微生物,

因此 TN 和 C/N 在决定微生物群落结构方面具有重要的作用,当 C/N 升高或降低时会影响有机碳分解的速率以及矿质氮释放的含量,这就会在一定程度上影响反硝化菌的生存<sup>[4]</sup>.  $\text{NO}_3^-$ -N 作为反硝化过程的电子受体和反应起始底物,是控制反硝化菌进行反硝化作用的重要因素<sup>[2,29]</sup>. 土壤水分含量不仅会直接影响 *nirS* 型、*nirK* 型和 *nosZ* 型反硝化菌群落的生长发育,还会通过调节土壤中氧气含量和反硝化反应基质的扩散和运输,从而影响反硝化菌群落结构<sup>[5,7]</sup>. 本研究还表明, AP 会影响反硝化菌群落结构,这与 Huang 等<sup>[42]</sup> 研究的结果一致,这可能是因为磷不仅是微生物生长发育的必需元素,还会通过影响土壤碳氮循环及化学性质对反硝化菌群落结构产生间接影响<sup>[39,40]</sup>. 本研究 *nirS* 型、*nirK* 型和 *nosZ* 型反硝化菌群落结构测定采用的是 T-RFLP 法,在鉴别这些微生物群落的门属方面存在一定不足,因此未来可能需要采用高通量测序来进一步明确化肥和有机肥配施生物炭对紫色土中 *nirS* 型、*nirK* 型和 *nosZ* 型反硝化菌群落结构的影响.

### 3.3 根际土壤反硝化势与反硝化微生物群落和土壤环境因子的关系

偏最小二乘法分析的结果表明 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌对根际反硝化势具有显著影响,而 *nirK* 型反硝化菌对反硝化势无显著影响,这与王军等<sup>[19]</sup> 和周慧等<sup>[20]</sup> 研究的结果一致. 这可能是因为 *nirS* 型、*nirK* 型和 *nosZ* 型反硝化菌在土壤中占据不同生态位<sup>[4]</sup>,在化肥和有机肥配施生物炭条件下,根际 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌的活性可能相对更高. 这说明在酸性紫色土中,化肥和有机肥配施生物炭条件下 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌在柠檬根际的反硝化过程中发挥主要作用.

本研究发发现化肥会降低土壤反硝化势,这可能与施用化肥会通过降低土壤 pH、*nirS* 型反硝化菌丰度和 *nosZ* 型反硝化菌丰度有关. 而有机肥和有机肥配施生物炭会增加土壤反硝化势,这与王莹燕等<sup>[32]</sup> 和尹昌等<sup>[44]</sup> 研究的结果相似. 这一方面可能是因为施用有机肥会为土壤提供大量碳源,这会为反硝化菌提供丰富的电子受体<sup>[27]</sup>; 同时,有机肥有利于提高土壤微生物活性,从而加快氧气的消耗,这为反硝化作用提供良好的低氧微域环境<sup>[44]</sup>. 另一方面,施用有机肥会改善酸性土壤 pH,通过增加 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌丰度,从而增强土壤反硝化势. 偏最小二乘法分析结果还表明,土壤环境因子中 pH、N/P 和 TN 是影响根际反硝化势的主要因素,这与 Liang 等<sup>[4]</sup>、杨杰<sup>[25]</sup> 和王丽莎等<sup>[45]</sup> 研究的结果一致,这是因为化肥和有机肥配施生物炭显著改

变根际土壤 pH、N/P 和 TN,影响了土壤环境、氮源和反硝化过程的反应基质含量,从而影响反硝化菌群落的活性、丰度和组成,最终能够影响根际反硝化势.

## 4 结论

化肥会降低根际土壤反硝化势,有机肥和有机肥配施生物炭则会增加反硝化势. 同时,配施化肥会降低 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌丰度,而配施有机肥则会增加 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌丰度. pH 是影响 *nirS* 型反硝化菌丰度的主要因子,SOM 和  $\text{NH}_4^+$ -N 是影响 *nirK* 型反硝化菌丰度的主要因子,pH、TN 和 N/P 是影响 *nosZ* 型反硝化菌丰度的主要因子. 酸性紫色土中,化肥和有机肥配施生物炭条件下 *nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化菌在柠檬根际的反硝化过程中发挥主要作用; 同时,pH、N/P 和 TN 是影响根际反硝化势的主要土壤因子.

### 参考文献:

- [1] Pan B B, Xia L L, Lam S K, et al. A global synthesis of soil denitrification: driving factors and mitigation strategies [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, **327**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107850.
- [2] Tang Z M, Liu X R, Li G C, et al. Mechanism of biochar on nitrification and denitrification to  $\text{N}_2\text{O}$  emissions based on isotope characteristic values [J]. *Environmental Research*, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113219.
- [3] 车钊. 土壤酸化对硝化和反硝化微生物类群结构及功能的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.  
Che Z. Impacts of soil acidification on the structure and function of the nitrification and denitrification microbial community [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017.
- [4] Liang Y Q, Wu C F, Wei X M, et al. Characterization of *nirS*- and *nirK*-containing communities and potential denitrification activity in paddy soil from eastern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **319**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107561.
- [5] Xu X Y, Ran Y, Li Y, et al. Warmer and drier conditions alter the nitrifier and denitrifier communities and reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in fertilized vegetable soils [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **231**: 133-142.
- [6] Surey R, Lippold E, Heilek S, et al. Differences in labile soil organic matter explain potential denitrification and denitrifying communities in a long-term fertilization experiment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **153**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103630.
- [7] Azziz G, Monza J, Etchebehere C, et al. *nirS*- and *nirK*-type denitrifier communities are differentially affected by soil type, rice cultivar and water management [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, **78**: 20-28.
- [8] Yin C, Fan F L, Song A L, et al. Different denitrification potential of aquatic brown soil in Northeast China under inorganic and organic fertilization accompanied by distinct changes of *nirS*- and *nirK*-denitrifying bacterial community [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **65**: 47-56.
- [9] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the

- global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, **451**(7176): 293-296.
- [10] Wu W J, Lin Z, Zhu X P, *et al.* Improved tomato yield and quality by altering soil physicochemical properties and nitrification processes in the combined use of organic-inorganic fertilizers[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2022, **109**, doi: 10.1016/j.ejsobi.2022.103384.
- [11] Ibrahim M M, Tong C X, Hu K, *et al.* Biochar-fertilizer interaction modifies N-sorption, enzyme activities and microbial functional abundance regulating nitrogen retention in rhizosphere soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140065.
- [12] Shi Y L, Liu X R, Zhang Q W, *et al.* Contrasting effects of biochar-and organic fertilizer-amendment on community compositions of nitrifiers and denitrifiers in a wheat-maize rotation system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **171**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104320.
- [13] Duan P P, Zhang X, Zhang Q Q, *et al.* Field-aged biochar stimulated N<sub>2</sub>O production from greenhouse vegetable production soils by nitrification and denitrification[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 1303-1310.
- [14] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N<sub>2</sub>O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, **53**(2): 181-188.
- [15] Xu H J, Wang X H, Li H, *et al.* Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(16): 9391-9399.
- [16] Wang N Y, Awasthi M K, Pan J T, *et al.* Effects of biochar and biogas residue amendments on N<sub>2</sub>O emission, enzyme activities and functional genes related with nitrification and denitrification during rice straw composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, **357**, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127359.
- [17] Li X, Han S, Wan W J, *et al.* Manure fertilizes alter the nitrite oxidizer and comammox community composition and increase nitrification rates[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, **204**, doi: 10.1016/j.still.2020.104701.
- [18] Sun R B, Guo X S, Wang D Z, *et al.* Effects of long-term application of chemical and organic fertilizers on the abundance of microbial communities involved in the nitrogen cycle[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **95**: 171-178.
- [19] 王军, 申田田, 车钊, 等. 有机和无机肥配比对黄褐土硝化和反硝化微生物丰度及功能的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24**(3): 641-650.
- Wang J, Shen T T, Che Z, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilizers on abundances of nitrifiers and denitrifiers and their function in yellow-cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(3): 641-650.
- [20] 周慧, 史海滨, 张文聪, 等. 有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 5010-5020.
- Zhou H, Shi H B, Zhang W C, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic nitrogen on nitrification and denitrification in two salinized soils[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 5010-5020.
- [21] Xie J, Wang Z F, Wang Y, *et al.* Manure combined with biochar reduces rhizosphere nitrification potential and *amoA* gene abundance of ammonia-oxidizing microorganisms in acid purple soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, **181**, doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104660.
- [22] Rudisill M A, Turco R F, Hoagland L A. Fertility practices and rhizosphere effects alter ammonia oxidizer community structure and potential nitrification activity in pepper production soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, **99**: 70-77.
- [23] Ren J H, Liu X L, Yang W P, *et al.* Rhizosphere soil properties, microbial community, and enzyme activities: short-term responses to partial substitution of chemical fertilizer with organic manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **299**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113650.
- [24] Zhang Q, Liang G Q, Myrold D D, *et al.* Variable responses of ammonia oxidizers across soil particle-size fractions affect nitrification in a long-term fertilizer experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **105**: 25-36.
- [25] 杨杰. 亚热带红壤不同施肥处理对根际土壤微生物硝化及反硝化作用的影响研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019.
- Yang J. Effects of different fertilization treatments on microbial nitrification and denitrification in rhizosphere soils in subtropical red soils[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.
- [26] 赵光昕, 张晴雯, 刘杏认, 等. 农田土壤硝化反硝化作用及其对生物炭添加响应的研究进展[J]. *中国农业气象*, 2018, **39**(7): 442-452.
- Zhao G X, Zhang Q W, Liu X R, *et al.* Nitrification and denitrification and its response to biochar addition in agricultural soil: a review[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, **39**(7): 442-452.
- [27] 张晨阳, 滕齐辉, 曹滢, 等. 有机肥施加对红壤中反硝化细菌 *nirK* 基因多样性影响[J]. *土壤*, 2021, **53**(1): 72-79.
- Zhang C Y, Teng Q H, Cao Y, *et al.* Effect of organic manure application on diversity of *nirK* gene in denitrifying bacteria in red soil[J]. *Soils*, 2021, **53**(1): 72-79.
- [28] Wang X Y, Li Y J, Ciampitti I A, *et al.* Response of soil denitrification potential and community composition of denitrifying bacterial to different rates of straw return in north-central China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **170**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104312.
- [29] 王海翠, 刘兆东, 李丹丹, 等. 种植模式影响施肥导致的土壤反硝化势变化及其微生物机制[J]. *土壤学报*, 2022, **59**(1): 242-252.
- Wang H C, Liu Z D, Li D D, *et al.* Effect of planting system on fertilization-induced variation of soil denitrification potential and its microbial mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(1): 242-252.
- [30] Zhong L, Li G Y, Qing J W, *et al.* Biochar can reduce N<sub>2</sub>O production potential from rhizosphere of fertilized agricultural soils by suppressing bacterial denitrification[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2022, **109**, doi: 10.1016/j.ejsobi.2022.103391.
- [31] Zhang J, Zhang L J, Qiu S J. Biochar amendment benefits <sup>15</sup>N fertilizer retention and rhizosphere N enrichment in a maize-soil system[J]. *Geoderma*, 2022, **412**, doi: 10.1016/j.geoderma.2022.115713.
- [32] 王莹燕, 熊子怡, 罗东海, 等. 化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1768-1779.
- Wang Y Y, Xiong Z Y, Luo D H, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction substitute with organic fertilizer on soil functional microbes and Lemon yield and quality[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1768-1779.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [34] 王莹燕, 王富华, 罗东海, 等. 缙云山森林植被类型对土壤产 N<sub>2</sub>O 相关功能微生物的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**

- (5): 2445-2454.  
Wang Y Y, Wang F H, Luo D H, *et al.* Effects of different forest vegetation types on soil nitrogen-related microbial communities and functions in Jinyun Mountain [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2445-2454.
- [35] Throbäck I N, Enwall K, Jarvis Å, *et al.* Reassessing PCR primers targeting *nirS*, *nirK* and *nosZ* genes for community surveys of denitrifying bacteria with DGGE [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **49**(3): 401-417.
- [36] 董成, 陈智勇, 谢迎新, 等. 生物炭连续施用对农田土壤氮转化微生物及 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, **53**(19): 4024-4034.  
Dong C, Chen Z Y, Xie Y X, *et al.* Effects of successive biochar addition to soil on nitrogen functional microorganisms and nitrous oxide emission[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(19): 4024-4034.
- [37] 段春健, 宛颂, 叶桂萍, 等. 长期缺素施肥及石灰石膏施用对江西鹰潭红壤反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(6): 2209-2216.  
Duan C J, Wan S, Ye G P, *et al.* Long-term effects of imbalanced fertilization with lime and gypsum additions on denitrifying functional genes of an Ultisol at Yingtan, Jiangxi, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(6): 2209-2216.
- [38] 李玉倩, 马俊伟, 高超, 等. 青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 *nirS* 型反硝化细菌群落特征分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4959-4967.  
Li Y Q, Ma J W, Gao C, *et al.* Denitrification rates and *nirS*-type denitrifying bacteria community structure characteristics of bulk and rhizosphere soil in spring and summer in the alpine wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4959-4967.
- [39] 曾希柏, 王亚男, 王玉忠, 等. 施肥对设施菜地 *nirK* 型反硝化细菌群落结构和丰度的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(2): 505-514.  
Zeng X B, Wang Y N, Wang Y Z, *et al.* Effects of different fertilization regimes on abundance and community structure of the *nirK*-type denitrifying bacteria in greenhouse vegetable soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(2): 505-514.
- [40] 王培欣, 杨亚东, 王占海, 等. 施肥制度对水稻土壤 *nosZ* 型反硝化细菌群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(7): 2072-2079.  
Wang P X, Yang Y D, Wang Z H, *et al.* Responses of the *nosZ*-denitrifying bacterial communities to fertilization regimes in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(7): 2072-2079.
- [41] Wei X M, Hu Y J, Peng P Q, *et al.* Effect of P stoichiometry on the abundance of nitrogen-cycle genes in phosphorus-limited paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, **53**(7): 767-776.
- [42] Huang J S, Hu B, Qi K B, *et al.* Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in a subalpine spruce plantation [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, **72**: 35-41.
- [43] Yang Y D, Hu Y G, Wang Z M, *et al.* Variations of the *nirS*-, *nirK*-, and *nosZ*-denitrifying bacterial communities in a northern Chinese soil as affected by different long-term irrigation regimes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(14): 14057-14067.
- [44] 尹昌, 范分良, 李兆君, 等. 长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3967-3975.  
Yin C, Fan F L, Li Z J, *et al.* Influences of long-term application of organic and inorganic fertilizers on the composition and abundance of *nirS*-type denitrifiers in black soil [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3967-3975.
- [45] 王丽莎, 何志斌, 陈龙飞, 等. 荒漠绿洲过渡带自然沙地开垦为灌溉农田后土壤硝化、反硝化速率及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, **28**(4): 869-876.  
Wang L S, He Z B, Chen L F, *et al.* Differences in soil nitrification and denitrification capacities following reclamation years of native desert soils to irrigated croplands in Hexi Corridor Region of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, **28**(4): 869-876.

## CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Pollution in Tianjin from 2013 to 2020 .....	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020 .....	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O <sub>3</sub> Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing .....	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O <sub>3</sub> Pollution During 13 <sup>th</sup> Five-Year Period in Tianjin .....	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm .....	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China .....	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment .....	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020 .....	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River .....	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing .....	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City .....	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin .....	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems .....	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments .....	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter .....	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants .....	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters .....	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan .....	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District .....	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model .....	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area .....	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China .....	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure .....	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area .....	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth .....	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content .....	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil .....	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil .....	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils .....	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil .....	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil .....	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil .....	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland .....	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars .....	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil .....	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River .....	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation .....	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism .....	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China .....	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak .....	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost .....	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures .....	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China .....	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi .....	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China .....	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration .....	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland .....	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level .....	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants .....	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment .....	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions .....	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review .....	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology .....	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)