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.8
第41卷 第8期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第8期
2020年8月15日

目 次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 …… 钟嶷盛，周颖，程水源，王晓琦，邵玄逸(3449)
基于天津市在线数据评估ISORROPIA-Ⅱ模式结果及气溶胶pH的影响因素 …… 高洁，史旭荣，卫昱婷，宋少洁，史国良，冯银厂(3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征 …… 李源遽，吴爱华，童梦雪，栾胜基，李莺，胡敏(3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间$PM_{2.5}$中12种微量元素特征及来源解析 …… 陈展乐，田倩，毛瑶，刘威杰，石明明，程铖，胡天鹏，邢新丽，祁士华，胡金旭(3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析 …… 张喆，丁建丽，王瑾杰(3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及VOCs对SOA生成潜势 …… 徐虹，唐邈，肖致美，高璟赟，杨宁，李立伟，郑乃源，陈魁，邓小文(3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气VOCs特征及源解析 …… 李一丹，尹沙沙，张瑞芹，于世杰，杨健，张栋(3500)
长江三角洲2010~2018年生物质燃烧中等挥发性有机物(IVOCs)排放清单 …… 朱永慧，王倩，黄凌，殷司佳，李莉，王杨君(3511)
北方常见绿化树种BVOCs排放特征及其与光合作用参数的相关性 …… 许燕，李双江，袁相洋，冯兆忠(3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 …… 高平，庄立跃，王龙，陈瑜萍，闫慧，沈劲，范丽雅，叶代启(3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 …… 李凯，刘敏，梅如波(3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 …… 冯于耀，史建武，钟曜谦，韩新宇，封银川，任亮(3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 …… 樊馨瑶，卢新卫，刘慧敏，秦青(3556)
超低排放高湿废气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 …… 胡月琪，颜旭，孔川，张虎，邬晓东(3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 …… 王坚，黄厔，刘艳英，陈森阳，吴艳聪，何月云，杨心怡(3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 …… 潘玉瑾，李媛，陈军辉，石嘉诚，田红，张季，周敬，陈霞，刘政，钱骏(3581)
基于无人机多光谱影像和OPT-MPP算法的水质参数反演 …… 黄昕晰，应晗婷，夏凯，冯海林，杨垠晖，杜晓晨(3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响：以三峡水库和小湾水库为例 …… 刘静思，朱晓声，胡子龙，张思思，杨正健，纪道斌，刘德富(3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 …… 赵昕，陈浩，贾其隆，沈忱思，朱弈，李磊，聂云汉，叶建锋(3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 …… 许志，陈小华，沈根祥，朱英，钱晓雍，张心良，张卫，胡双庆，白玉杰(3621)
过氧化钙(CaO_2)联合生物炭对河道底泥的修复 …… 李雨平，姜莹莹，刘宝明，阮文权，缪恒锋(3629)
基于双同位素($\delta^{15}N-NO_3^-$-$\delta^{18}O-NO_3^-$)和IsoSource模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 …… 徐璐，蒋勇军，段世辉，何瑞亮(3637)
三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷 …… 严坤，王玉宽，刘勤，徐佩，闫洋洋(3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 …… 高斌，许有鹏，陆苗，林芷欣，徐兴(3657)
Fe@GOCS的制备及其对水中As(Ⅲ)的吸附 …… 赵超然，单慧媚，曾春芽，张进贤，彭三曦(3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 …… 薛向东，王星源，梅雨晨，庄海峰，宋亚丽，方程冉(3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响 …… 江宇勤，厉炯慧，方治国(3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性：MBBR和IFAS …… 李韧，于莉芳，张兴秀，戴子承，滑思思，彭党聪(3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 …… 方文烨，李祥，黄勇，郭超然，胡羽婷，陶仁杰(3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 …… 张玉君，李冬，李帅，张杰(3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 …… 张星星，王超超，王垚，徐乐中，吴鹏(3715)
基于AHP-PROMETHEE Ⅱ法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 …… 刘晓蕾，李安婕(3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 …… 刘吉宝，牛雨彤，郁达伟，谭颖锋，左壮，魏源送(3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 …… 戴金金，牛承鑫，潘阳，陆雪琴，甄广印，郑朝婷，张瑞良，何欣昱(3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 …… 袁其懿，CHEN Hong-jie，Laurence Haller，何义亮(3748)
四环素胁迫对*Shigella flexneri*细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 …… 高品，阮晓慧，邱文婕，薛罡，钱雅洁(3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 …… 乔昕，王博，郭媛媛，彭永臻(3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 …… 侯晓薇，牛永健，李维维，王光杰，孙洪伟(3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 …… 宁雪，梁金松，柏耀辉，廖恺玲俐，刘会娟，曲久辉(3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 …… 罗晴，甄毓，彭宗波，贺惠(3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 …… 方笑堃，罗小三，张丹，吴礼春，邱丹，陈志炜，赵朕(3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 …… 邵康，贡璐，何学敏，陈文静，张雪妮，朱海强(3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土N_2O排放的影响 …… 周慧，史海滨，郭珈玮，张文聪，王维刚(3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 …… 葛松，孟宪荣，许伟，施维林(3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 …… 黄建洪，伏江丽，严鑫睿，尹凤，田森林，宁平，李英杰(3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 …… 蔡九茂，刘杰云，邱虎森，吕谋超，周新国(3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 …… 刘师豆，韩耀光，朱新萍，吴相南(3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻Cd累积的影响 …… 魏宾纭，周航，刘佳炜，张竟颐，黄芳，霍洋，胡雨丹，辜娇峰，刘俊，廖柏寒(3855)
螯合剂GLDA对象草修复镉污染农田的影响 …… 覃建军，唐盛爽，蒋凯，黄敬，侯红波，龙坚，彭佩钦(3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测 …… 俞映倞，杨林章，李红娜，朱昌雄，杨桓，薛利红(3870)
《环境科学》征订启事(3636) 《环境科学》征稿简则(3764) 信息(3538，3628，3724)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第8期 2020年8月
Vol.41,No.8 Aug.,2020

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响

蔡九茂[1,2], 刘杰云[1,2], 邱虎森[1,3*], 吕谋超[1,2], 周新国[1,3]

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002; 2. 农业农村部节水灌溉工程重点实验室, 新乡 453002; 3. 中国农业科学院商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 商丘 476000)

摘要: 滴灌和生物质炭添加均可影响土壤氮的形态及转化. 深入了解滴灌方式和生物质炭对土壤矿质态氮和参与矿质态氮转化关键功能基因及微生物种群的综合影响,对改善设施农业生产管理方式,提高水分和氮源利用效率,降低硝酸盐积累及其淋失引起的地下水污染具有重要指导意义. 在日光温室设置地表滴灌(D)、插入式滴灌(ID,插入深度 15 cm)、地表滴灌 +10 $t\cdot hm^{-2}$生物质炭(DB)和插入式滴灌 +10 $t\cdot hm^{-2}$生物质炭(IDB,插深 15 cm)这 4 个处理,以收获期辣椒根际和非根际土壤为研究对象. 结果发现,非根际和根际土壤铵态氮含量不受滴灌方式和生物质炭的影响. 与地表滴灌相比,插入式滴灌显著降低了非根际土壤硝态氮的含量($P<0.05$),但生物质炭削弱了这种差异. 同种滴灌方式下,生物质炭添加降低了根际土壤硝态氮的含量. 生物质炭添加降低了地表滴灌辣椒非根际土壤 AOA、AOB 和 *nirK* 基因拷贝数以及根际土壤 AOA 基因拷贝数($P<0.05$),提高了两种滴灌方式根际土壤 AOB 和 *nirK* 基因拷贝数($P<0.05$). 结构方程模型分析结果显示,在非根际和根际土壤中,pH 和电导率分别是对铵态氮和硝态氮含量影响最大的环境因子,AOB 基因拷贝数是对硝态氮影响最大的生物因子. 基于 PICRUSt 功能预测,γ-变形菌纲菌属对氨单加氧酶基因(K10945)表达的贡献高于其它菌属; α-变形菌纲,尤其是根瘤菌成员对参与含铜离子的亚硝酸还原酶基因(K00368)表达的贡献高于其他菌属. 生物质炭对非根际土壤 K10945 和根际土壤 K00368 同源基因细菌群落结构的影响显著($P<0.05$). 综上所述,相对于滴灌方式,生物质炭的添加对设施农业土壤硝态氮氮含量及其转化的关键微生物影响更大.

关键词: 滴灌方式; 生物质炭; 设施农业; 矿质态氮; 细菌

中图分类号: X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)08-3836-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201912156

Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse

CAI Jiu-mao[1,2], LIU Jie-yun[1,2], QIU Hu-sen[1,3*], LÜ Mou-chao[1,2], ZHOU Xin-guo[1,3]

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. Key Laboratory of Efficient Irrigation Engineering Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China; 3. National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Drip irrigation and biochar amendment could affect the nitrogen form and transformation. Creating a deep understanding of the interacting effects of drip irrigation patterns and biochar on soil mineral nitrogen, as well as the key functional genes and microbial community involved in nitrogen transformation is helpful for improving facility agricultural management, increasing water and nitrogen use efficiency, and reducing the nitrate accumulation and groundwater pollution caused by nitrogen leaching. Four treatments [surface drip irrigation (D), insert drip irrigation (ID, insert depth 15 cm), surface drip irrigation +10 $t\cdot hm^{-2}$ of biochar (DB), and insert drip irrigation +10 $t\cdot hm^{-2}$ of biochar (IDB)] were conducted in a solar greenhouse, and non-rhizospheric and rhizospheric soils of pepper plants were studied. There was no effect of drip irrigation patterns and biochar on ammonium-nitrogen in the non-rhizospheric and rhizospheric soils. Compared with surface drip irrigation, insert drip irrigation decreased the nitrate-nitrogen concentration in the non-rhizosphere soil ($P<0.05$), but biochar addition weakened the difference. Biochar addition decreased the nitrate-nitrogen concentration in the rhizosphere soil under the same drip irrigation patterns. In the D treatment, biochar significantly decreased the number of copies of AOA, AOB, and *nirK* genes in the non-rhizospheric soil, and AOA gene copies in the rhizospheric soil ($P<0.05$); however, there was an increase in the number of copies of AOB and *nirK* genes in the rhizospheric soil of the D and ID treatments ($P<0.05$). Based on the structural equation model (SEM), in the non-rhizospheric and rhizospheric soils, pH and electrical conductivity were the environmental factors with the greatest influence on the ammonium-nitrogen and nitrate concentrations, respectively, and the gene copy number of AOB was the biotic factor with the greatest influence on the nitrate-nitrogen concentration. Based on PICRUSt, the γ-Proteobacteria contributed mostly to ammonia monooxygenase gene (K10945) expression, whereas the α-Proteobacteria, especially the rhizobia members, contributed mostly to nitrite reductase gene (K00368) expression. Biochar addition

收稿日期: 2019-12-20; **修订日期**: 2020-02-16

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(192102110087); 中国农业科学院基本科研业务费专项(FIRI2019-02-01, FIRI2017-27); 中国农业科学院农业科技国际合作研究项目(Y2019GH19)

作者简介: 蔡九茂(1984~),男,硕士,助理研究员,主要研究方向为农业节水灌溉技术与应用,E-mail: caijiumao@163.com

* 通信作者,E-mail: qiuhusen2008@163.com

regulated the bacterial community structure that participated in K10945 gene expression in the non-rhizospheric soil and K00368 gene expression in the rhizospheric soil ($P < 0.05$). Overall, biochar addition contributed more to nitrate-nitrogen and microbial mineral nitrogen-transformation processes in the agricultural soil than did the drip irrigation patterns.

Key words: drip irrigation; biochar; facility agriculture; mineral nitrogen; bacteria

土壤中的矿质态氮,尤其是铵态氮和硝态氮是影响作物生长的重要氮素形态,其在土壤中的累积与转化受农业生产管理活动的影响. 不合理的管理模式,如:氮肥的大量施入会导致土壤硝酸盐的积累; 不合理的灌溉方式不仅会造成水资源浪费,同时会引起氮淋失和地下水污染[1,2]. 因此,如何实现资源节约和减少环境污染一直是农业生产管理探寻的问题.

最大程度地提高灌溉水利用效率,节约水资源是设施农业生产中重要目的. 这不仅有利于缓解土壤板结,减少深层渗漏,降低养分流失和病虫害,还对增产增效有一定的作用[3,4]. 尤其是在缺水地区,滴灌因其水分利用效率高,用水量少和节省劳力等优点而备受农业生产者的青睐. 但有研究发现,滴灌方式的差异会导致土壤湿润体体积和土体垂直及水平方向上的水分分布均匀度的不同[5,6],最终影响作物根系的分布范围和作物产量. 与地表滴灌相比,地下滴灌能促进茄科类根系向土层更深处生长及根系干物质和产量的增加[7,8]. 土壤水分含量的改变势必影响土壤微生物群落、功能菌群及其作用、土壤养分形态及迁移规律的差异. 譬如,充足的水分条件可以提高微生物的丰富度和均匀度[9]; 氨氧化古菌较氨氧化细菌更能适应缺水环境[10]. 在一定条件下,土壤水分含量的降低会促进微生物硝化过程,在降低土壤铵态氮含量同时会增加硝态氮的迁移与淋失风险[11,12]. 生物质炭作为一种在完全或部分缺氧条件下的芳香化热解产物,因其发达的孔隙结构、比表面积,使其成为农业生产中的一种改善土壤环境的资源再利用物质[13]. 生物质炭的添加可以提高土壤持水能力[14,15],提高水分利用效率和低肥力产田作物产量[16],并改善果实内部品质[17]. 生物质炭较强的吸附能力可以吸附土壤中的无机氮,从而降低了土壤中的氨和硝酸盐的损失,同时潜在地控制被吸附养分缓慢释放到植物根部,提高氮利用率[14,18,19]. 而生物质炭的多孔性能够改善土壤通气状况,其本身含有的营养物质可以为参与固氮和硝化过程的好氧微生物提供良好的生长环境,同时抑制土壤反硝化作用,进而影响土壤不同形态无机氮含量. 也有研究认为无论是短期还是长时间内,生物质炭对土壤氮含量都没有影响[20]. 因此,人们需要结合环境因素综合分析生物质炭在无机氮形态及其转化的作用.

氨氧化过程作为硝化过程的限速步骤,影响铵态氮向硝态氮的转化速率,主要受氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)的调控. 含有 *nirK* 基因的微生物控制反硝化过程的速度,影响亚硝酸盐的含量. 亚硝酸盐作为硝酸盐的前物质不仅受氨氧化作用的调控,同时也受反硝化过程中亚硝酸盐还原作用的影响[21~23]. 根际土壤作为植物与土壤物质能量交换活跃区域,其土壤微环境有别于非根际土壤[24]. 滴灌方式的不同对作物根际与非根际土壤无机氮形态以及参与矿质态氮转化的关键功能微生物调控机制的影响有何差异? 生物质炭的添加是否会通过改变土壤湿润体体积及水分分布均匀度影响矿质态氮的转化值得深入研究. 基于此,本研究以滴灌方式(地表滴灌和插入式滴灌)和生物质炭添加与否作为处理因子,结合 MiSeq 测序技术以及 COG (clusters of orthologous groups) 数据库比对,重点解析不同滴灌方式和生物质炭添加条件下,辣椒根际与非根际土壤矿质态氮与土壤理化性质及参与矿质态氮转化的关键功能基因的关系,以期为深入理解设施农作物根际与非根际土壤微生物群落参与氮转化生理生态过程提供一定的理论依据,也为提高设施农业土壤水分和氮素利用效率,缓解设施土壤硝酸盐累积和因氮素流失导致的地下水污染提供可靠的技术参考.

1　材料与方法

1.1　试验设计

本试验在中国农业科学院新乡综合试验基地日光温室内开展,土壤质地为壤土. 本试验设置 4 个处理,分别为:地表滴灌(D)、插入式滴灌(ID,插入深度 15 cm)、地表滴灌 + 10 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭(DB)和插入式滴灌 + 10 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭(IDB,插深 15 cm),每个处理设置 3 个重复. 在种植辣椒前,将生物质炭均匀施入耕层土壤. 生物质炭产自河南商丘三利新能源有限责任公司,为花生壳在 500℃ 左右条件下制成. 供试土壤与生物质炭基本理化性质如表 1 所示. 供试青椒品种为新查理皇,于 2019 年 3 月 29 日移栽,行距 60 cm,株距 40 cm,每小区 6 行,每行 20 株. 移栽前施入基肥 750 $kg\cdot hm^{-2}$ 复合肥料(氮、磷、钾比例为 19、19、19),有机肥 15 $t\cdot hm^{-2}$ (有机质含量 46%),追肥(复合肥料,氮、磷、钾比例为 19、19、19)在开花期(移栽后 30 d)和结果期

(移栽后 59 d 和 79 d)分 3 次施入,每次施入量为 375 $kg\cdot hm^{-2}$. 地表滴灌和插入式滴灌总灌水量和滴头流量保持一致,每行辣椒一条滴灌带,每株作物配一个滴箭. 移栽后第一次灌足水,在移栽后每 10 d 灌一次水,灌水量 35 mm,总灌水量 455 mm. 其他田间管理手段保持一致.

表 1 供试土壤(0~20 cm)及生物质炭基本理化性质1)

Table 1 Basic properties of soil samples and biochar for the experiment

项目	有机碳 /$g\cdot kg^{-1}$	全氮 /$g\cdot kg^{-1}$	全磷 /$g\cdot kg^{-1}$	全钾 /$g\cdot kg^{-1}$	容重 /$g\cdot cm^{-3}$	pH	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
土壤	9.16	1.02	0.86	21.20	1.32	7.58	23.5	69.7	6.8
生物质炭	427.05	11.70	7.50	27.60	0.18	10.08	—	—	—

1)"—"表示没有数据

1.2 样品采集与测定

1.2.1 样品采集

在辣椒植株收获前,选择长势均一的代表性植株,轻轻拔出整棵植株,然后将与根系紧密结合的土样刷下作为根际土;取两行辣椒中间区域土样作为非根际土. 每个小区均按照多点取样法,分别将非根际和根际土混合均匀,去除土壤中可见动植物残体,然后按照四分法取一部分经过液氮速冻处理后,保存在 -80℃冰箱,用于功能基因定量 PCR 和细菌群落多样性分析. 一部分新鲜土样用于测定土壤水分、铵态氮和硝态氮含量,剩余土样风干测定相关理化指标.

1.2.2 样品测定

采用 Fast DNA® SPIN 试剂盒(Qbiogene Inc., USA)提取土壤总 DNA, DNA 浓度和纯度利用 NanoDrop2000 进行检测,利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 提取质量. 在设计测序引物时,在序列中添加 bar-code 序列以区分各个样品测序数据. 用 338F(5′-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3′)和 806R(5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′)引物对 V3-V4 可变区进行 PCR 扩增,扩增程序为:95℃预变性 3 min, 27 个循环(95℃变性 30 s, 55℃退火 30 s, 72℃延伸 30 s),最后 72℃延伸 10 min(PCR 仪:ABI GeneAmp® 9700 型). 扩增体系为 20 μL, 4 μL 5 × FastPfu 缓冲液, 2 μL 2.5 $mmol\cdot L^{-1}$ dNTPs, 0.8 μL 引物(5 $\mu mol\cdot L^{-1}$), 0.4 μL FastPfu 聚合酶; 10 ng DNA 模板. 使用 2% 琼脂糖凝胶回收 PCR 产物,利用 AxyPrep DNA Gel Extraction Kit (Axygen Biosciences, Union City, CA, USA)进行纯化, Tris-HCl 洗脱, 2% 琼脂糖电泳检测. 利用 QuantiFluor™-ST(Promega, USA)进行检测定量. 根据定量结果和测序量要求,取 PCR 产物构建测序文库. 构建好的文库在 Illumina MiSeq PE300 测序平台测序. AOA 基因实时定量 PCR 扩增引物为 Arch-amoAF(5′-STAATGGTCTGGCTTAGACG-3′)和 Arch-amoAR(5′-GCGGCCATCCATCTGTATGT-3′)[25]; AOB 基因实时定量 PCR 扩增引物为 amoA-1F(5′-GGGGTTTCTACTGGTGGT-3′)和 amoA-2R(5′-CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC-3′)[25]; *nirK* 基因实时定量 PCR 扩增引物为 FlaCu(5′-ATCATGGTSCTGCCGCG-3′)和 R3Cu(5′-GCCTCGATCAGRTTGTGGTT-3′)[25]. 扩增条件为:95℃预变性 3 min, 95℃ 5 s, 55℃ 30 s, 72℃ 1 min, 40 个循环.

基于土壤农化分析方法[26],称取新鲜土样,按照水土比 5∶1,采用 2 $mol\cdot L^{-1}$ KCl 浸提,连续流动分析仪(Tecator FIA Star 5000 Analyzer, Foss Tecator, Sweden)测定铵态氮和硝态氮含量. 土壤水分含量采用 105℃烘干称重法测定. 土壤 pH 按照水土比 2.5∶1混匀静置 30 min 后 Metro-pH320 计测定上清液. 土壤电导率按照水土比 5∶1振荡 3 min,静置澄清后取上清液,用雷磁 DDSJ-308A 型电导仪测定.

1.3 数据分析

数据统计在 Excel 2007 中完成、香浓多样性的计算在 QIME1.80 中完成;细菌群落功能基因预测基于 PICRUSt 分析实现[27],通过 PICRUSt; PICRUSt 软件存储了 greengene ID 对应的 KEGG Ortholog (KO)信息,对 OTU 丰度表进行标准化,并去除 16S marker gene 在物种基因组中的 copy 数目的影响;然后通过每个 OTU 对应的 greengene ID,获得 OTU 对应的(KO)信息;并计算各功能基因对应的 KO 丰度,该分析在 http://huttenhower.sph.harvard.edu/galaxy/中在线实现. 基于 https://www.kegg.jp/分析同源基因物种丰度. 基于 SPSS16.0 配对 *T* 检验研究处理间或同一处理根际与非根际间土壤理化性质、功能基因拷贝数、丰度及功能微生物丰度的差异;基于双因素方差分析研究滴灌方式和生物质炭对土壤理化性质、功能基因拷贝数和功能菌群的影响. 结构方程模型的构建基于 SEM Amos 21.0 软件完成(Small Waters Corp., Chicago, IL, USA),用于评估模型拟合度的主要指标包括 *P* 值、卡方值 χ^2、拟合优度指数(GFI)和渐进残差均方和平方根(RMSEA)[28]. 基于 R3.4.3 中的 pheatmap 包作热

图,基于 Origin 8.5 作柱形图.

2　结果与分析

2.1　根际与非根际土壤矿质态氮和其它理化指标的差异

如表 2 所示,同一处理根际土壤硝态氮含量显著低于非根际土壤($P<0.05$). DB 处理非根际土壤水分含量显著高于根际土壤($P<0.05$), ID 和 DB 处理非根际土壤水分含量显著高于 D 处理($P<0.05$). ID 和 DB 处理根际土壤 pH 显著高于非根际土壤($P<0.05$). 除 IDB 处理,其余处理根际土壤电导率均显著高于非根际土壤; 生物质炭显著提高 ID 处理中非根际土壤电导率,但显著降低根际土壤电导率($P<0.05$). 双因素方差分析的结果(表 3)表明,滴灌方式、生物质炭及滴灌方式与生物质炭互作均显著影响非根际土壤硝态氮($P<0.01$); 在根际土壤中仅有生物质炭对硝态氮的影响显著($P<0.05$).

表 2　土壤矿质态氮和其它理化指标的差异1)

Table 2　Difference of soil mineral nitrogen and other physiochemical properties

指标	D		ID		DB		IDB	
	非根际	根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际	根际
铵态氮/mg·kg^{-1}	10.78±2.13	8.00±1.03	9.10±0.77	8.77±0.96	9.64±0.80	9.45±1.31	9.42±2.20	9.30±0.72
硝态氮/mg·kg^{-1}	270.76±6.20aA	5.38±1.26b	211.51±5.02aB	5.44±0.73bA	276.01±2.05a	3.95±0.84b	276.46±3.06aA	3.88±0.12bB
水分含量/%	12.02±0.55B	11.82±0.10	14.98±0.79A	12.76±1.19	15.26±0.81Aa	13.37±1.32b	15.00±0.34	13.79±0.70
pH	7.58±0.25	7.98±0.02	7.49±0.03b	7.98±0.05a	7.47±0.02b	8.01±0.01a	7.56±0.30	8.02±0.04
电导率/μS·cm^{-1}	82.90±2.31b	119.23±9.74a	72.30±7.41bB	116.67±6.99aA	85.32±4.76b	109.43±2.14a	99.21±8.17A	106.03±5.17B

1) 小写字母代表同一处理根际与非根际土壤指标差异,大写字母代表根际或非根际土壤不同滴灌方式或同种滴灌方式生物质炭添加处理之间指标差异

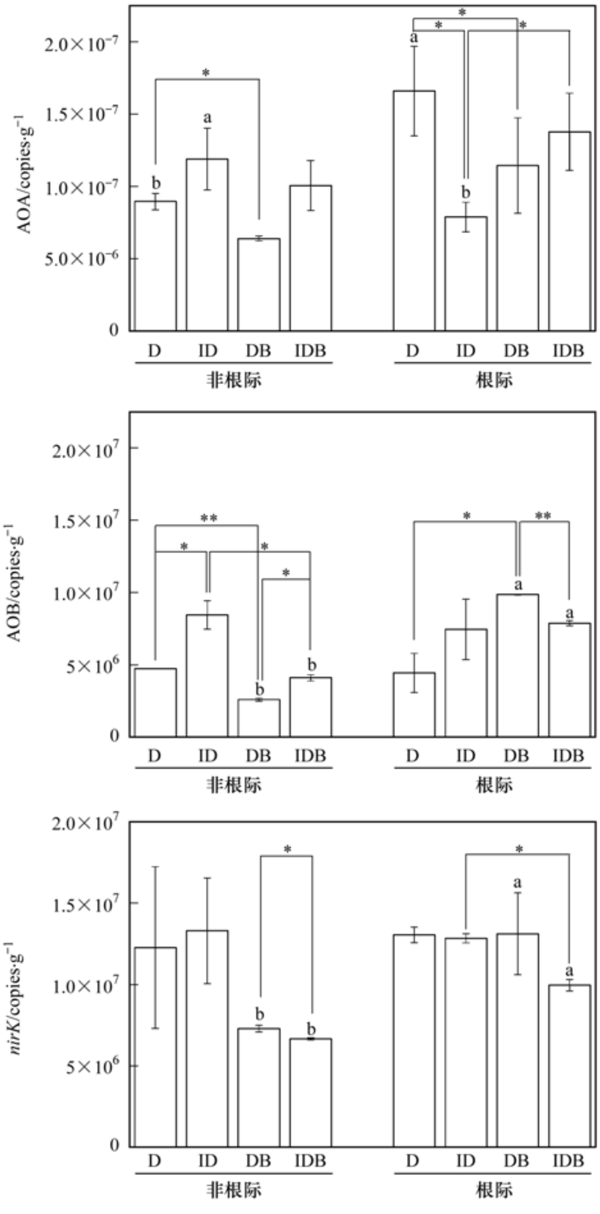
表 3　滴灌方式和生物质炭对辣椒根际与非根际土壤矿质态氮及其转化关键基因拷贝数的影响

Table 3　Effect of drip irrigation and biochar addition on soil mineral nitrogen and the copies of functional genes participating in the transformation of soil mineral nitrogen cycling

处理	因素	非根际		根际	
		F	Sig.	*F*	Sig.
滴灌方式	铵态氮	1.03	0.341	0.27	0.615
	硝态氮	134.28	0.000	0.00	0.988
	AOA 基因拷贝数	16.54	0.004	4.29	0.072
	AOB 基因拷贝数	81.46	0.000	0.51	0.495
	nirK 基因拷贝数	0.01	0.915	5.14	0.053
生物质炭	铵态氮	0.19	0.675	2.77	0.135
	硝态氮	191.38	0.000	9.41	0.015
	AOA 基因拷贝数	7.37	0.026	0.06	0.815
	AOB 基因拷贝数	125.76	0.000	14.48	0.004
	nirK 基因拷贝数	11.42	0.010	3.64	0.093
滴管方式×生物质炭	铵态氮	0.60	0.460	0.60	0.461
	硝态氮	137.41	0.000	0.02	0.902
	AOA 基因拷贝数	0.20	0.670	12.57	0.008
	AOB 基因拷贝数	14.50	0.005	11.99	0.009
	nirK 基因拷贝数	0.23	0.646	3.81	0.086

2.2　根际与非根际土壤矿质态氮转化关键功能基因变化特征

本研究表明(图 1),生物质炭显著降低滴灌处理根际与非根际土壤 AOA 基因拷贝数,却显著提高插入式滴灌处理根际土壤 AOA 基因拷贝数($P<0.05$),同时削弱了两种滴灌方式下根际与非根际土壤 AOA 基因拷贝数差异. 在 DB 和 IDB 两个处理中,辣椒根际土壤 AOB 基因拷贝数显著高于非根际土壤($P<0.05$). 生物质炭显著提高了 D 和 ID 两个处理中根际土壤 AOB 基因拷贝数($P<0.01$),显著降低了非根际土壤 AOB 基因拷贝数($P<0.05$). 与非根际土壤相比,生物质炭显著提高根际土壤 *nirK* 基因拷贝数($P<0.05$). 在非根际土壤中,IDB 处理显著低于DB处理中*nirK*基因拷贝数($P<0.05$).



* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$

图1 土壤 AOA、AOB 和 *nirK* 基因拷贝数差异

Fig. 1 Difference of gene copies of AOA, AOB, and *nirK* in soil

在根际土壤中,生物质炭显著提高 ID 处理 *nirK* 基因拷贝数($P<0.05$). 双因素方差分析结果(表 3)表明,非根际土壤 AOA 基因拷贝数受滴灌方式和生物质炭的影响,在根际土壤中受二者交互影响($P<0.01$). 滴灌方式、生物质炭及滴灌方式与生物质炭交互作用均对非根际土壤 AOB 基因拷贝数的影响显著($P<0.01$); 仅有生物质炭对 *nirK* 基因拷贝数影响显著($P<0.01$). 在根际土壤中,*nirK* 基因拷贝数受生物质炭以及滴灌方式与生物质炭交互影响($P<0.01$).

2.3 细菌对参与矿质态氮转化关键功能基因的潜在贡献

基于 PICRUSt 功能预测和同源基因物种丰度的结果(图 2),变形菌门、放线菌门和硝化螺旋菌门为参与氨单加氧酶基因(K10945)表达的三大门类,其中变形菌门中的亚硝化螺菌属对该基因表达的贡献高于其它菌属. 参与含铜离子的亚硝酸还原酶基因(K00368)表达的细菌门类有 9 种,其中变形菌门、放线菌门和拟杆菌门丰度相对较高,如变形菌门中的中慢生根瘤菌属、慢生根瘤菌属、微枝形杆菌属、粘着箭菌属; 放线菌门中的微杆菌属、芽球菌属以及拟杆菌门的 *Pontibacter* 属等. 双因素方差分析的结果发现,生物质炭对非根际土壤 K10945 和根际土壤 K00368 同源基因物种群落结构的影响显著(表 4,$P<0.05$).

2.4 环境因子与生物因子对根际与非根际土壤矿质态氮的影响

基于结构方程模型的结果(图 3),在非根际土壤中环境因子和生物因子对铵态氮的解释率为 70%,对硝态氮的解释率为 99%. 铵态氮与水分含量及 pH 呈显著负相关; AOB 基因拷贝数与电导率呈显著负相关. 硝态氮与电导率及*nirK*基因拷贝数呈显著正相关,与水分含量及 AOB 基因拷贝数呈显著负相关. 基于表 5 中的 λ 值,pH 对铵态氮的直接负作用最大,其次是水分含量; AOB 基因拷贝数在所有因子中对硝态氮直接负作用最大,电导率对硝态氮的直接与间接正作用均最大. 在根际土壤中环境因子和生物因子对铵态氮和硝态氮的解释率分别为 70% 和

表 4 滴灌方式和生物质炭对辣椒根际与非根际土壤矿质态氮转化功能微生物群落结构的影响

Table 4 Effect of drip irrigation and biochar addition on functional microbial communities participating in the transformation of soil mineral nitrogen

处理	基因	非根际		根际	
		F	Sig.	*F*	Sig.
滴灌方式	K10945	0.901	0.494	1.128	0.352
	K00368	0.478	0.943	1.145	0.283
生物质炭	K10945	2.819	0.032	0.211	0.957
	K00368	0.772	0.625	2.133	0.027
滴管方式×生物质炭	K10945	2.850	0.042	0.637	0.657
	K00368	1.163	0.310	0.882	0.558

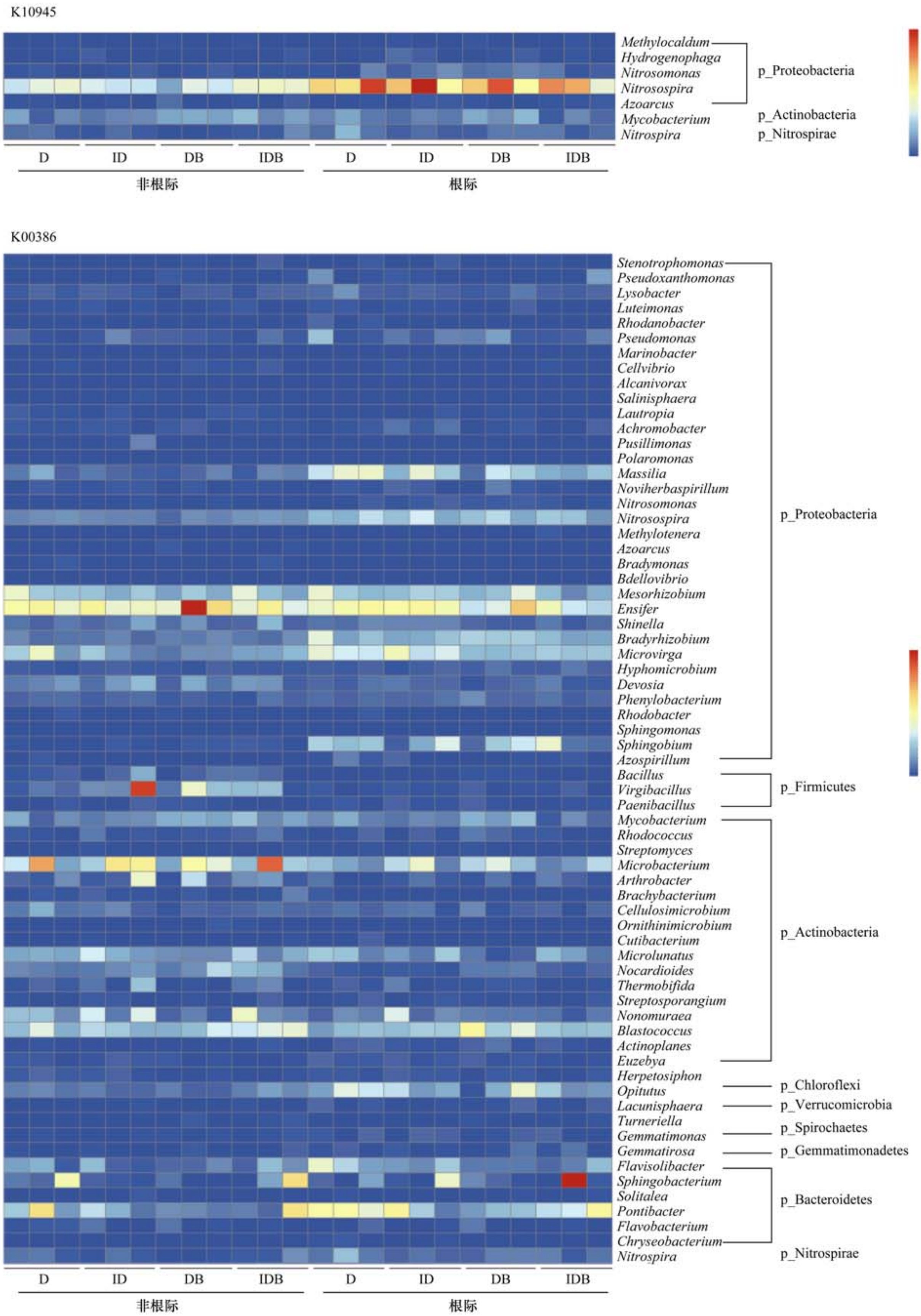


图 2　微生物对矿质态氮转化关键功能基因的潜在贡献

Fig. 2　Potential contribution of microbe to functional genes expression participating in the transformation of soil mineral nitrogen

74%. 硝态氮与 AOB 基因拷贝数呈显著负相关, pH 对铵态氮的直接正作用最大, 电导率的直接负作用最大. AOB 基因拷贝数在所有因子中对硝态氮直接负作用最大; 电导率对硝态氮的直接正作用最大.

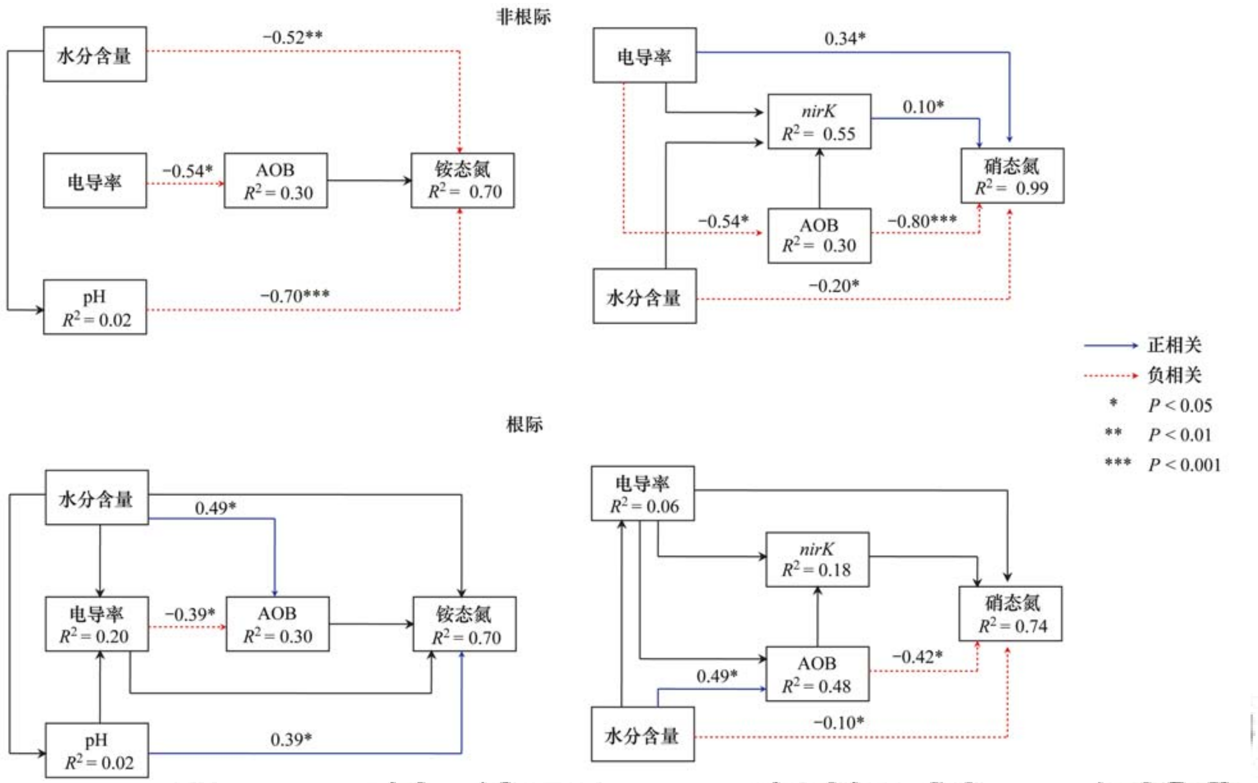


图3 基于结构方程模型的环境及生物因子对根际和非根际矿质态氮的影响

Fig. 3 Structural equation model of the hypothesized causal relationships between abiotic and biotic factors and soil mineral nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of pepper plants

表5 环境及生物因子对辣椒根际与非根际土壤矿质态氮的直接和间接影响[1)]

Table 5 Direct, indirect, and total effects of abiotic and biotic factors on soil mineral nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of pepper plants

土壤	矿质态氮	影响	λ 值				
			水分含量	电导率	pH	AOB 基因拷贝数	*nirK* 基因拷贝数
非根际	铵态氮	直接影响	-0.523	0.000	-0.701	-0.225	—
		间接影响	0.109	0.122	0.000	0.000	—
		总影响	-0.414	0.122	-0.701	-0.225	—
	硝态氮	直接影响	-0.199	0.342	—	-0.799	0.097
		间接影响	-0.032	0.376	—	0.031	0.000
		总影响	-0.231	0.718	—	-0.768	0.097
根际	氨态氮	直接影响	0.118	-0.304	0.390	0.204	—
		间接影响	0.251	-0.079	0.145	0.000	—
		总影响	0.369	-0.383	0.535	0.204	—
	硝态氮	直接影响	-0.096	0.372	—	-0.425	0.283
		间接影响	-0.344	0.285	—	-0.045	0.000
		总影响	-0.441	0.656	—	-0.380	0.283

1)"—"表示没有数据

3 讨论

3.1 根际与非根际土壤矿质态氮对滴灌方式与生物质炭的响应

生物质炭由于其多孔性及较大的表面积增加了生物质炭颗粒与水分之间的吸附力；同时，生物质炭的添加可以增加土壤毛细孔隙，从而提高土壤水分含量[15]. 因此，生物质炭添加削弱了滴灌方式对非根际土壤水分含量的影响. 土壤中辣椒根系对水分的吸收及其在土壤中的分布和对土壤物理性状的改变可能会削弱生物质炭对水分含量的影响，从而导致不同滴灌方式下，生物质炭添加与否对土壤水分含量的影响并不显著. 滴灌方式和生物质炭添加与否对辣椒根际或非根际土壤铵态氮含量均无显著影响. 但不同处理方式可以通过改变土壤其它理化性质直接或间接影响矿质态氮的含量. 研究发现在

非根际土壤中,铵态氮与水分含量及 pH 呈显著负相关.水分含量的升高可能会削弱土壤氮的矿化作用,减少铵态氮的积累[25].有研究认为,并不是水分含量升高就会削弱土壤的硝化过程,当土壤水分含量低于某一个临界点时,与反硝化作用相比,硝化作用依然占主导地位.本研究中土壤水分含量可能对硝化作用有一定的激发作用,促进铵态氮向硝态氮的转化,从而导致土壤铵态氮含量的降低[11].土壤 pH 值的升高促进土壤水溶液 NH_3 的形成和挥发,导致土壤铵态氮的减少；另一个可能原因是土壤 pH 的升高会削弱矿化作用,同时增强硝化作用,从而使土壤中矿化产生的铵态氮减少,更多的铵态氮转化成硝态氮[23,29].但是,在根际土壤中铵态氮与水分含量和 pH 的关系并不明显,这可能与根际和非根际土壤微环境(如:根际土壤中辣椒根系分布、根系对养分的吸收及根系分泌物等)的差异有关[30].

生物质炭添加对非根际和根际土壤硝态氮含量均有显著影响,但生物质炭的添加显著提高同一滴灌方式下非根际土壤硝态氮含量,却降低了根际土壤硝态氮含量.非根际土壤硝态氮含量的增加可能与生物质炭本身吸附作用以及滴灌方式带来的水分差异有关[6,15],而根际硝态氮含量的降低可能与根系对氮素的吸收有关[24,31].有研究发现,非根际与根际土壤硝态氮含量均与水分含量呈显著负相关关系.在本研究中水分含量的增加导致硝态氮淋失的风险增大,同时生物质炭对硝态氮的吸附固定可能会降低其在土壤溶液中的含量[12,14,18].生物质炭的添加促进同一种滴灌方式下非根际土壤电导率的增加和硝态氮含量的积累,这可能是由于生物质炭本身带有大量的阳离子,如 K^+ 和 Ca^{2+} 等,阳离子的释放促进土壤溶液电导率的提升以及土壤溶液中阳离子吸附位点,从而有利于对 NO_3^- 的吸附,促进土壤硝态氮含量的增加[11,30].总体来讲,滴灌方式和生物质炭可以通过自身的吸附作用或者调控土壤水分含量、电导率等指标影响辣椒根际与非根际土壤硝态氮含量.

3.2　滴灌方式与生物质炭对根际与非根际土壤矿质态氮转化微生物调控的影响

氨氧化细菌和古菌参与亚硝化过程,为硝化过程提供必要的亚硝酸盐,是硝化过程的主要驱动者,同时也受环境因子的调控[25].在本研究中,与不添加生物质炭处理相比,生物质炭显著降低了地表滴灌处理根际或非根际土壤 AOA 基因拷贝数,却显著提高了插入式滴灌处理根际土壤 AOA 基因拷贝数($P<0.05$),这可能与滴灌方式带来的土壤微环境的差异(如:氧环境)以及作物根系分泌物(如:酸类物质的量等)的差异有关,有待深入研究[32].生物质炭的添加显著降低同种滴灌方式下非根际土壤 AOB 基因拷贝数,显著提高了根际土壤 AOB 基因拷贝数,因此,生物质炭提高了非根际与根际土壤 AOB 基因拷贝数的差异.综合以上结果,生物质炭的添加可能会削弱非根际土壤氨氧化作用,有利于铵态氮在土壤中的存留.辣椒作为喜硝态氮的植物,根际土壤 AOA 和 AOB 基因拷贝数的增加有利于土壤铵态氮向硝态氮转化,有利于提高辣椒根际对氮源的利用率.普遍认为铵态氮是氨氧化细菌在进行硝化作用过程中所必需的营养物质,它直接影响硝化细菌的生长[33],但是在本研究中铵态氮在各处理中的变化不显著,同时也不是模型构建的关键因子,可能在一定程度上说明本研究中供试土壤铵态氮的含量充裕,并未成为影响 AOA 和 AOB 基因拷贝数的限制性因子.有研究发现在 pH 为中性和碱性环境中,AOB 是硝化作用的主要驱动者,而 AOA 主要在如低氮、强酸性和高温等较苛刻的环境中发挥功能活性[21,22],说明在土壤矿质态氮转化过程中,氨氧化微生物功能的发挥对环境具有一定的选择性.基于结构方程模型的结果,生物质炭的添加可以通过改变根际与非根际土壤中电导率,影响 AOB 基因拷贝数.有研究发现土壤盐分的升高会削弱硝化作用强度,这可能是由于盐分升高会在一定程度上破坏微生物的细胞膜和菌体内的酶,抑制微生物的生长,从而导致氨氧化细菌基因拷贝数的降低[34].同时,本研究发现生物质炭添加提高了两种滴灌方式下根际土壤水分含量,进而增加 AOB 基因拷贝数.可能是由于生物质炭添加在一定水平上提高了土壤铵态氮的含量,为硝化作用提供了更多可利用氮源,从而有效提高 AOB 基因拷贝数[23,25].

nirK 基因作为反硝化过程中参与亚硝酸盐还原的关键基因,在调控硝酸盐含量中也起着重要作用[21].总体来讲,生物质炭添加显著降低了同种滴灌方式下辣椒非根际土壤 *nirK* 基因拷贝数.这可能与生物质炭具有大量的孔隙结构,可以提高土壤通气性有关.因为土壤通气性的增加会削弱参与反硝化作用功能微生物活性及数量[23].土壤电导率的升高可能会削弱氨氧化细菌参与的硝化过程,减少亚硝酸盐的形成,作为 *nirK* 基因的反应底物,亚硝酸盐的减少可能会影响到参与该过程功能微生物的数量.另外,生物质炭特殊的物理化学特性刺激了辣椒根系分泌物的分泌、根际微环境的改变,进而影响到根际与非根际土壤 *nirK* 基因拷贝数[35].

基于 PICRUSt 功能预测和同源基因物种丰度,

参与硝化作用中氨氧化过程的菌群主要属于 γ-变形菌纲,其中亚硝化螺菌属对该基因(K10945)表达的贡献高于其它菌属;而丰度较高,且参与含铜离子的亚硝酸还原酶基因(K00368)表达的菌属主要属于 α-变形菌纲,其中根瘤菌成员的丰度相对较高.双因素方差分析表明,滴灌方式不影响辣椒根际与非根际土壤参与矿质态氮转化的关键功能菌群的稳定性,但生物质炭添加却因为其对土壤理化形状的改变影响着非根际土壤氨氧化菌群和根际土壤参与亚硝化还原菌群的稳定性.

4 结论

(1)生物质炭削弱了地表滴灌与插入式滴灌非根际土壤硝态氮的差异,促进了同种滴灌方式下非根际土壤硝态氮的积累,降低了根际土壤硝态氮的含量.

(2)生物质炭可以通过改变根际与非根际土壤水分含量和电导率影响 AOB 基因拷贝数和矿质态氮含量,有利于降低同种滴灌方式非根际土壤的亚硝酸盐还原作用.

(3)辣椒根际与非根际土壤参与矿质态氮转化关键功能菌群的稳定性不受滴灌方式的影响,却受生物质炭的调控.

参考文献:

[1] Chen Y M, Zhang J Y, Xu X, *et al*. Effects of different irrigation and fertilization practices on nitrogen leaching in facility vegetable production in northeastern China [J]. Agricultural Water Management, 2018, **210**: 165-170.

[2] 石宁, 李彦, 井永苹, 等. 长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2434-2442.
Shi N, Li Y, Jing Y P, *et al*. Effect of long-term fertilization on spatio-temporal changes and risk of nitrogen and phosphorus loss in intensive vegetable production system soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(11): 2434-2442.

[3] 张振振. 节水灌溉技术在设施农业中的应用[J]. 农业科技与装备, 2018, (6): 68-69.
Zhang Z Z. Application of water-saving irrigation technique in facility agriculture[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2018, (6): 68-69.

[4] 魏永霞, 马瑛瑛, 刘慧, 等. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(3): 252-260.
Wei Y X, Ma Y Y, Liu H, *et al*. Effects of soil water, plant, water saving and yield increasing of maize under regulated deficit drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, **49**(3): 252-260.

[5] 王海宇, 张月珍, 董平国. 土壤密实度对单点源入渗土壤水分再分布影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**(2): 146-151.
Wang H Y, Zhang Y Z, Dong P G. Investigation on effects of soil compactness on soil water redistribution unde point source infiltration condition [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(2): 146-151.

[6] 张松, 李和平, 郑和祥, 等. 地埋滴灌点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. 节水灌溉, 2017, (1): 25-27, 32.
Zhang S, Li H P, Zheng H X, *et al*. A study on soil water movement law of point source infiltration under buried drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017, (1): 25-27, 32.

[7] 孔清华, 李光永, 王永红, 等. 地下滴灌施氮及灌水周期对青椒根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(S2): 38-42.
Kong Q H, Li G Y, Wang Y H, *et al*. Effects of nitrogen application and irrigation cycle on bell pepper root distribution and yield under subsurface drip irrigation [J]. Transactions of CASE, 2009, **25**(S 2): 38-42.

[8] 胡兰, 翟国亮, 邓忠, 等. 灌溉方式和灌水下限对温室青茄生长、耗水特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, **38**(2): 16-21.
Hu L, Zhai G L, Deng Z, *et al*. Effects of critical soil moistures for different drip irrigations on growth, water consumption and yield of greenhouse green eggplant[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, **38**(2): 16-21.

[9] 张传更, 高阳, 张立明, 等. 水分管理措施对施用有机肥麦田土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, **37**(2): 38-44.
Zhang C G, Gao Y, Zhang L M, *et al*. Effects of water management on soil enzyme activities and microbial community structure in wheat fields with organic fertilizer application [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, **37**(2): 38-44.

[10] Yang Y D, Wang Z M, Hu Y G, *et al*. Irrigation frequency alters the abundance and community structure of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in a northern Chinese upland soil [J]. European Journal of Soil Biology, 2017, **83**: 34-42.

[11] Gul S, Whalen J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **103**: 1-15.

[12] Ju X T, Zhang C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China: A review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, **16**(12): 2848-2862.

[13] Laghari M, Naidu R, Xiao B, *et al*. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, **96**(15): 4840-4849.

[14] Haider G, Steffens D, Moser G, *et al*. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, **237**: 80-94.

[15] Mao J F, Zhang K, Chen B L. Linking hydrophobicity of biochar to the water repellency and water holding capacity of biochar-amended soil [J]. Environmental Pollution, 2019, **253**: 779-789.

[16] El-Naggar A, Lee S S, Rinklebe J, *et al*. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects [J]. Geoderma, 2019, **337**: 536-554.

[17] 邵光成, 吴世清, 房凯, 等. 生物炭添加提高渍水条件下番茄产量改善品质[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(19): 160-167.
Shao G C, Wu S Q, Fang K, *et al*. Biochar application improving yield and quality of tomato suffering from waterlogging stress[J]. Transactions of the CSAE, 2019, **35**(19): 160-167.

[18] 王冰, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物质炭对黑土吸附-解吸硝态氮性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 115-121.

Wang B, Zhao S S, Qin Z J, *et al*. Effect of biochar on adsorption-desorption characteristics of nitrate nitrogen in black soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(1): 115-121.

[19] 俞映倞, 杨林章, Odindo A O, 等. 碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3851-3859.
Yu Y L, Yang L Z, Odindo A O, *et al*. Influence of calcium carbonate and biochar addition on soil nitrogen retention in acidified vegetable Soil[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3851-3859.

[20] Güereña D, Lehmann J, Hanley K, *et al*. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system[J]. Plant and Soil, 2013, **365**(1-2): 239-254.

[21] Silvia P, Bohannan B J M. Ecology of nitrogen fixing, nitrifying, and denitrifying microorganisms in tropical forest soils[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, **7**: 1045.

[22] Shan J, Yang P P, Shang X X, *et al*. Anaerobic ammonium oxidation and denitrification in a paddy soil as affected by temperature, pH, organic carbon, and substrates[J]. Biology and Fertility of Soils, 2018, **54**(3): 341-348.

[23] 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.

[24] Kuzyakov Y, Razavi B S. Rhizosphere size and shape: Temporal dynamics and spatial stationarity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **135**: 343-360.

[25] Levy-Booth D J, Prescott C E, Grayston S J. Microbial functional genes involved in nitrogen fixation, nitrification and denitrification in forest ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **75**: 11-25.

[26] 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 (3rd ed.)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[27] Ren M, Zhang Z F, Wang X L, *et al*. Diversity and contributions to nitrogen cycling and carbon fixation of soil salinity shaped microbial communities in Tarim Basin[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, **9**: 431.

[28] Qiu H S, Ge T D, Liu J Y, *et al*. Effects of biotic and abiotic factors on soil organic matter mineralization: Experiments and structural modeling analysis[J]. European Journal of Soil Biology, 2018, **84**: 27-34.

[29] Wang Z H, Meng Y, Barker X Z, *et al*. Responses of nitrification and ammonia oxidizers to a range of background and adjusted pH in purple soils[J]. Geoderma, 2019, **334**: 9-14.

[30] 陈梅, 王芳, 张德俐, 等. 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5411-5429.
Chen M, Wang F, Zhang D D, *et al*. Effect of biochar structure on adsorption characteristics of ammonia nitrogen[J]. Environment Science, 2019, **40**(12): 5411-5429.

[31] Man J, Tang B, Xing W, *et al*. Root litter diversity and functional identity regulate soil carbon and nitrogen cycling in a typical steppe[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, **141**: 107688.

[32] Trivedi C, Reich P B, Maestre F T, *et al*. Plant-driven niche differentiation of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in global drylands[J]. The ISME Journal, 2019, **13**(11): 2727-2736.

[33] Ying J Y, Li X X, Wang N N, *et al*. Contrasting effects of nitrogen forms and soil pH on ammonia oxidizing microorganisms and their responses to long-term nitrogen fertilization in a typical steppe ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **107**: 10-18.

[34] 王晓胡, 寇涌苹, 赵文强, 等. 贡嘎山森林土壤氨氧化微生物数量在海拔梯度的空间分异特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(2): 275-280.
Wang X H, Dou Y P, Zhao W Q, *et al*. Spatial heterogeneity of ammonia-oxidizing microorganisms along the elevation gradient in the forest soil of Mount Gongga[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25**(2): 275-280.

[35] Zhou H M, Wang P, Chen D, *et al*. Short-term biochar manipulation of microbial nitrogen transformation in wheat rhizosphere of a metal contaminated Inceptisol from North China plain[J]. Science of the Total Environment, 2018, **640-641**: 1287-1296.

HUANJING KEXUE

Vol. 41 No. 8

Environmental Science (monthly)

Aug. 15, 2020

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital …… ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, *et al.* (3449)

Evaluation of Different ISORROPIA-Ⅱ Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data …… GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, *et al.* (3458)

Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking …… LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, *et al.* (3467)

Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in $PM_{2.5}$ During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China …… CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, *et al.* (3475)

Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region …… ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie (3484)

Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin …… XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, *et al.* (3492)

Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou …… LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, *et al.* (3500)

Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds(IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018 …… ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, *et al.* (3511)

Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters …… XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, *et al.* (3518)

Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou …… GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, *et al.* (3527)

Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City …… LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo (3539)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks …… FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, *et al.* (3547)

Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses …… FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, *et al.* (3556)

Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant …… HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, *et al.* (3563)

Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area …… WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, *et al.* (3572)

Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data …… PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, *et al.* (3581)

Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm …… HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, *et al.* (3591)

Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir …… LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, *et al.* (3601)

Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers …… ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, *et al.* (3612)

Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels …… XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, *et al.* (3621)

Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide(CaO_2) Combined with Biochar …… LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, *et al.* (3629)

Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ and $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$ and the IsoSource Model …… XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, *et al.* (3637)

Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area …… YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, *et al.* (3646)

Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region …… GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, *et al.* (3657)

Adsorption of As(Ⅲ) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan …… ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, *et al.* (3665)

Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution …… XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, *et al.* (3675)

Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth …… JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo (3684)

Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS …… LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, *et al.* (3691)

Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification … FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, *et al.* (3699)

Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration …… ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, *et al.* (3707)

Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources …… ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, *et al.* (3715)

Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE Ⅱ Method …… LIU Xiao-lei, LI An-jie (3725)

Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron …… LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, *et al.* (3731)

Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste …… DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, *et al.* (3740)

Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations …… YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, *et al.* (3748)

Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in *Shigella flexneri* …… GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, *et al.* (3758)

Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria …… QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, *et al.* (3765)

Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing …… HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, *et al.* (3773)

Universality and Potential Application of Mn(Ⅱ) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions …… NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, *et al.* (3781)

Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River …… LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, *et al.* (3787)

Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice …… FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, *et al.* (3797)

Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of *Picea schrenkiana* Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang …… SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, *et al.* (3804)

Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N_2O Emissions from Saline Soil …… ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, *et al.* (3811)

Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by *in-situ* Electrical Resistance Heating …… GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, *et al.* (3822)

Acid Mine Wasteland Reclamation by *Juncus ochraceus* Buchen as a Potential Pioneer Plant …… HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, *et al.* (3829)

Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse …… CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, *et al.* (3836)

Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution …… LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, *et al.* (3846)

Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice …… WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, *et al.* (3855)

Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by *Pennisetum purpureum* Schum …… QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, *et al.* (3862)

Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution …… YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, *et al.* (3870)