

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.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制

刘躲^{1,2}, 王磊^{1,2*}, 曹湛波³, 段灏⁴

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092; 3. 华东理工大学生物工程学院, 上海 200237; 4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 为探究接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化-反硝化作用的影响, 以湿生植物旱伞草和石菖蒲为材料, 接种筛选自本地植物根系及根际土壤的菌根真菌混合菌种 MF-MD 为试验组, 并设置未接种植物作为对照组. 在水体氮素富营养化条件下种植 3 个月, 然后测定植物根际土壤硝化反硝化活性. 结果表明, 接种 MF-MD 能促进两种植物根际土壤硝化反应, 同时接种 MF-MD 促进了旱伞草根际土壤反硝化作用但是抑制了石菖蒲根际土壤反硝化作用. 从接种后植物根际土壤微生物量, 硝化细菌与反硝化细菌群落结构变化等角度分析了引起土壤硝化-反硝化反应发生变化的原因. 发现接种处理的试验组湿生植物根际土壤微生物量(soil microbial biomass, SMB)高于对照组但差异不显著, 且与对照组相比, 试验组与土壤硝化反硝化作用相关的微生物群落结构发生变化. 此试验对于研究菌根真菌结合湿生植物去除富营养化水体中的 N 元素具有积极意义.

关键词: 菌根真菌(MF); 湿生植物; 土壤硝化-反硝化作用; 硝化细菌; 反硝化细菌

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0932-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906119

Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism

LIU Duo^{1,2}, WANG Lei^{1,2*}, CAO Zhan-bo³, DUAN Hao⁴

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China; 3. School of Biotechnology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute(Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the effect of mycorrhizal fungi inoculation on nitrification-denitrification in the rhizospheric soil of aquatic plants, *Cyperus alternifolius* and *Acorus tatarinowii* were inoculated with the strain MF-MD obtained from local soil. Uninoculated plants served as the control group. The plants were cultivated for 3 months under nitrogen eutrophication in water, and then the nitrification and denitrification activities in the rhizospheric soil were determined. The results showed that inoculation with MF-MD promoted nitrification in the rhizospheric soil of both plants. However, MF-MD inoculation promoted denitrification in the rhizospheric soil of *Cyperus alternifolius* but inhibited denitrification in the rhizospheric soil of *Acorus tatarinowii*. The mechanism of soil nitrification-denitrification activity was analyzed by measuring the changes in the community structure of nitrifying bacteria and denitrifying bacteria in the microbial biomass of the rhizospheric soil. It was found that the rhizospheric soil microbial biomass (SMB) of the experimental group was higher than that of the control group and that the changes in the microbial community structure related to soil nitrification and denitrification differed between groups. This study contributes to an understanding of how mycorrhizal fungi combined with aquatic plants can remove N content in eutrophic water.

Key words: mycorrhizal fungi (MF); aquatic plant; soil nitrification-denitrification; nitrifying bacteria; denitrifying bacteria

菌根真菌(mycorrhizal fungi, MF)在土壤中能与高等植物根系形成共生系统^[1]. 接种菌根真菌可以促进植物生长^[2], 提高作物产量^[3,4]. 同时有研究发现接种 MF 会影响植物根际土壤中微生物数量^[5].

在 N 元素缺乏的陆地生态系统中, 植物和微生物在利用土壤氮元素上通常形成竞争关系^[6]. 植物可以利用土壤中各种形式的氮^[6] (包括 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 以及有机氮), 土壤中大多数微生物利用 NH₄⁺-N^[7]. 学术界对接种 MF 是否影响植物根际土壤硝化-反硝化作用存在争议. Lin 等^[8]发现在 MF

共生森林中无机氮含量, 净氮矿化速率和硝化速率比 ECM(外生菌根)共生森林中更高. Morrison 等^[9]的研究表明接种菌根刺激了原核生物生长和微生物的硝化作用, 并增加了 AOB 的基因丰度. 另一方面, 与前述结论相反的是, Chen 等^[10]的研究发现 MF 间接降低了氨氧化菌的丰度和土壤中 NO₃⁻-N 的含量.

收稿日期: 2019-06-17; 修订日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(21876127); 国家重点研发计划项目(2017YFC0506004)

作者简介: 刘躲(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地水体生态恢复, E-mail: muge@tongji.edu.cn

* 通信作者, E-mail: celwang@tongji.edu.cn

Bukovska 等^[11]认为 MF 和土壤中的微生物会对土壤中的氮氮形成竞争关系,但不认为氨氧化细菌是土壤氮循环中的一个不可或缺的组成部分。

在农业系统中,农民通常希望通过接种 MF 提高作物产量^[3,4]。在 N 充分供给,不成为植物和微生物竞争的限制因子的时候,MF 虽然引起了 AOB 群落的改变,但是并没有 MF 能改变潜在硝化反应的证据^[12]。在 MF 存在的条件下,使用磷肥能有效减轻大气氮沉降增加导致的植物 P 缺乏,降低了 MF 的侵染率,表明 P 输入在植物与 MF 共生中起到了很重要的作用^[13]。

目前对 MF 的共生促进作用的研究主要集中在增加农作物产量方面,较少有研究涉及菌根真菌与湿生植物的相互作用^[14]。N 和 P 元素含量超出正常水平是水体富营养化的一个重要特征^[15]。降低水体 N 和 P 营养元素的水平是解决富营养化水体中有害藻类繁殖的关键^[16]。水生植物可以有效降低水体氮、磷浓度,修复水体^[17]。有研究发现共生 MF 植物比非共生 MF 植物具有更高的 N^[18]和 P^[19]利用效率。段灏等^[14]的研究发现菌根真菌接种在湿生植物上能促进植物吸收利用水体环境中的 N 和 P 营养元素。

硝化-反硝化作用是水体脱氮的主要途径,但目前关于 MF 与湿生植物共生对根际土壤硝化-反硝化作用影响的研究较少。阐明 MF 与湿生植物共生对湿生植物根际土壤硝化-反硝化作用的影响及其可能的机制,将进一步丰富 MF-湿生植物共生系统对 N 去除机制的认识。

本文开展了湿生植物接种 MF 试验,研究接种 MF 对湿生植物根际土壤硝化-反硝化作用的影响及其微生物机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 菌剂

菌种由本实验室自上海青草沙水库护坡植物根系及根际土壤中分离得到,菌种使用前以玉米、高粱为宿主植物进行扩繁,获得待用的混合菌剂(MF-MD)。植物根系及根际土壤中真菌孢子的分离提取参考湿筛倾析-蔗糖离心法^[20]。

第一步,分散样品。植物根系和根际土壤样品来自青草沙水库护坡。将采集的样品 20~50 g 放入食品搅拌机杯中,加入 600 mL 水,高速搅拌 3~5 s。将植物根系破碎释放出孢子,并将土壤中黏附在根上菌丝团中的孢子分离出来。

第二步,湿筛。将破碎的混合物立即倒出,依次

通过 3 个土壤标准筛(孔径依次为 0.800、0.250 和 0.055 mm)。然后用流水冲洗每层筛子,直到流出的水变清澈。

第三步,蔗糖离心。上层筛出物一般不做离心处理,直接洗涤转移到培养皿中,在体式显微镜下观察。将下层筛残余物转移至 50 mL 质量分数为 20%/60% 蔗糖梯度的离心管中,并以 3 000 r·min⁻¹ 离心 2~3 min。土壤和其他颗粒沉淀下去,而孢子和小碎屑悬浮在蔗糖溶液中。转移离心管上清液于小筛子中,用水冲洗后转移至玻璃培养皿,在体式显微镜下观察。

第四步,镜检和保存。在体式显微镜下,用解剖针和毛细吸管将孢子和有机碎屑分离,放入表面皿中备用。分离得到的菌根真菌含有大量的混合真菌孢子,其中大量存在如图 1 所示的两种形态的孢子。

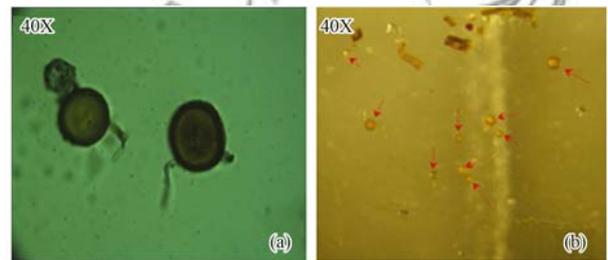


图 1 两种主要真菌孢子的显微照片

Fig. 1 Micrograph of two major fungal spores

第五步,扩繁^[21]并获得待用的混合菌剂(MF-MD)。

1.1.2 供试湿生植物

供试湿生植物为天南星科石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)和莎草科旱伞草(*Cyperus alternifolius*)。两种湿地植物幼苗购买自上海市泽龙生物工程有限公司。种植前将幼苗洗净,选取大小一致幼苗进行移植。

1.1.3 土壤

供试的基质土壤来自上海市崇明东滩湿地公园。土壤经过自然风干后,过 2 mm 土壤筛,经 121℃ 高温高压灭菌 2 h,放置一星期备用。由于土壤是围垦的贫瘠土壤,肥力较差,加入经灭菌的发酵有机肥。土壤理化性质为总氮 500 mg·kg⁻¹,速效磷 154.5 mg·kg⁻¹,有机质 0.822%~1.22%,pH 为 6.21,含盐量为 1.488 g·kg⁻¹。

1.2 试验过程

本研究在同济大学环境学院生态楼后水泥平地上开展盆栽试验。采用 21cm×16 cm 的塑料花盆作为培养容器,并用体积分数 75% 酒精对花盆进行消毒处理。设置不接种对照组和接种试验组共两种处理,每个处理设置 3 个重复,共计 12 盆植物。每个塑

料盆装入灭菌土壤 3 kg, 然后向试验组盆中均匀混合 50 g 土壤-菌剂混合物 (10 g 混合菌剂与 40 g 灭菌土壤均匀搅拌), 向对照组加入 10 g 灭菌混合菌剂与 40 g 灭菌土壤. 选择长势一致的旱伞草和石菖蒲, 每盆移栽 1 株 (对照组石菖蒲和旱伞草分别表示为 SCP-CK 和 HSC-CK, 试验组石菖蒲和旱伞草分别表示为 SCP-MD 和 HSC-MD). 为给湿生植物一个自然的生长环境, 植物种植期间, 采用自然光照, 温度为 28℃ 左右 (白天)/20℃ 左右 (晚上), 相对湿度 55% (白天) 左右. 种植期间根据需要补充水分, 保持植物根部 5 cm 淹水深度. 植物种植结束后, 用铁铲去除植物表层约 5 cm 土壤, 取适量植物根系周围土样 (去除其中明显植物根系), 一部分保存于 4℃ 冰箱, 一部分保存于 -60℃ 冰箱待用.

1.3 分析方法

1.3.1 植物根系侵染率的检测

$$\text{侵染率}(\%) = \frac{\sum (0 \times \text{根段数} + 10 \times \text{根段数} + 20 \times \text{根段数} + \dots + 100 \times \text{根段数})}{\text{观察总根段数}}$$

1.3.2 植物根际土壤硝化强度测定

称取 150 g 风干后过 2 mm 筛的湿地植物根系土壤, 置于 250 mL 三角瓶中, 加入 20 mL 质量浓度为 1 mg·mL⁻¹ 的 (NH₄)₂SO₄ 溶液, 敞口放置在 28℃ 恒温培养箱中, 每天记录三角瓶重量, 并根据需要补充蒸馏水, 保持相同的土壤湿度. 分别在第 1、8、15、22 和 29 d 取样, 测定土壤中 NO₃⁻-N 含量, 以 NO₃⁻-N 净增加量除以培养时间表征硝化作用强度^[22,23]. 由于硝化反应 NO₃⁻-N 的产生是非线性的, 试验中测定了 4 个不同时间段的土壤硝化反应强度, 以便对不同样品相同时段的硝化反应强度的比较.

1.3.3 植物根际土壤反硝化强度测定

参考厌氧淹水培养法^[24,25]. 分别称取 25 g 风干后过 2 mm 筛的湿地植物根系土壤, 置于 100 mL 血清瓶中, 加入 5 mL 质量浓度为 1 mg·mL⁻¹ 的 KNO₃ 溶液, 用橡胶塞封口. 利用氩气将瓶中空气置换, 并用封口膜密封瓶口. 将血清瓶放置在 28℃ 隔水恒温培养箱中, 分别在第 1、8、15、22 和 29 d 取样, 测定瓶中土壤的 NO₃⁻-N 含量, 以 NO₃⁻-N 净减少量除以培养时间表征反硝化作用强度. 由于反硝化反应 NO₃⁻-N 的消耗是非线性的, 试验中测定了 4 个不同时间段的土壤反硝化反应强度, 以便对不同样品相同时段的反硝化反应强度的比较.

1.3.4 理化指标测定

土壤含盐量: 采用 Stevens Data Reader 仪器现场测量.

土壤总氮 (TN): 采用碱性过硫酸钾氧化法, 样品处理后直接用紫外分光光度法 (220 nm 和 275

nm) 测定 N 含量.

土壤速效磷 (AP): 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃-钼锑抗比色法, 样品处理后直接用紫外分光光度法 (700 nm) 测定磷含量.

土壤总有机碳 (TOC) 测定: 采用日本岛津总有机碳测定仪 TOC-V-CPN 测定.

土壤硝氮: 用 CaSO₄ 溶液溶解后, 过滤加盐酸用分光光度法 (220 nm 和 275 nm) 测定 N 含量.

土壤氨氮: 采用氯化钾-分光光度法测定 N 含量.

观察总根段数

测定 N 含量.

土壤速效磷 (AP): 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃-钼锑抗比色法, 样品处理后直接用紫外分光光度法 (700 nm) 测定磷含量.

土壤总有机碳 (TOC) 测定: 采用日本岛津总有机碳测定仪 TOC-V-CPN 测定.

土壤硝氮: 用 CaSO₄ 溶液溶解后, 过滤加盐酸用分光光度法 (220 nm 和 275 nm) 测定 N 含量.

土壤氨氮: 采用氯化钾-分光光度法测定 N 含量.

1.3.5 土壤微生物量的测定

采用 ATP 法^[26]. 本试验采用 BAB 提取剂结合 Profile-1 生物发光仪提取土壤样品中的 ATP. 苯扎溴铵 (BAB), 主要成分为溴化二甲基苄基烃铵, 可贮存较长时间而效果不减, 性状稳定. 将新鲜土样按质量比 1:10 放入灭菌水中, 加入适量玻璃珠, 置于摇床振荡 1 h. 振荡后, 吸取 2 mL 土样分散液, 并快速加入 8 mL 质量分数 0.05% BAB 溶液, 振荡 45 s. 经定量滤纸过滤后, 吸取滤液 100 μL 放入已加入 100 μL 荧光素酶的比色杯中, 并将杯中溶液吸、排 2~3 次使溶液混匀, 进行 ATP 测定.

1.3.6 土壤微生物群落结构多样性的测定

称取 0.5 g 土壤样品到一个 Power Bead Tubes 中. 根据 DNA 抽提试剂盒 (UltraClean[®] DNA Isolation Kit, MO BIO Laboratories) 提供的操作步骤, 抽提细菌总 DNA. 并通过质量分数 0.8% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 提取质量, 同时采用紫外分光光度计对 DNA 进行定量. 对 16S rDNA 的双 V 区 (V4 ~

V5) PCR 扩增, 所用的引物信息为: 515F (5-GTGCCAGCMGCCGCGG-3) 和 907R (5-CCGTCAATT CMTTTRAGTTT-3). 本试验采用 Illumina 公司的 MiSeq 测序平台, 基于 Solexa 技术. 高通量测序分析的建库过程中 PCR 扩增会产生嵌合体序列, 首先对原始数据进行质量过滤和双端序列的连接, 并对有效序列进行过滤和去除嵌合体, 保证分析结果的准确性. 根据指定相似度 (97%), 然后对得到的优质序列进行 OTU 的聚类 and 注释. 基于 OTU 聚类和注释的分析结果, 绘制稀释曲线, 进行多样性指数分析, 并在各分类水平上进行群落结构的统计分析和物种丰度差异分析.

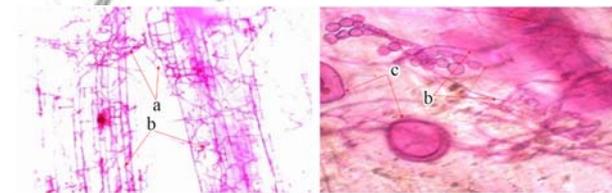
1.4 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行处理. 用 Origin 8.0 作图. 并通过 SPSS 软件的 Duncan 分析进行显著性检验, 其中 $P < 0.05$ 表示差异显著.

2 结果与分析

2.1 菌根侵染

MF 与植物共生后, 能够在植物根系中形成独特的菌根结构. 盆栽试验结束后接种处理植物根部菌丝和泡囊结构如图 2 所示. 表 1 为植物根系侵染率的检测结果, 两种未接种处理的植物根系中均未发现侵染痕迹. 接种菌根真菌处理的旱伞草侵染率为 42.0%, 石菖蒲侵染率为 23.5%. 高于一般湿地土壤中芦苇根系侵染率^[27].



a. 根外菌丝; b. 根内菌丝; c. 泡囊

图 2 植物根系菌丝和泡囊结构

Fig. 2 Plant root hyphae and vesicle structure

表 1 不同湿生植物的菌根侵染率¹⁾

Table 1 Mycorrhizal infection rate on different wet plants

项目	旱伞草侵染率	石菖蒲侵染率
MD	0.420 ± 0.040 a	0.235 ± 0.015 a
CK	0.000 ± 0.000 b	0.000 ± 0.000 b

1) 相同小写字母表示没有显著性差异, 不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上存在显著性差异; MD 为接种混合菌种

2.2 接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化作用的影响

在土壤脱氮过程中, 尽管植物吸收氮, 但微生物的硝化-反硝化作用仍然是 N 去除的主要机制. 为研究菌根真菌对土壤 N 转化的影响, 本试验测定了湿

生植物根际土壤硝化-反硝化作用强度.

如图 3(a) 所示, 在培养过程中试验组和对照组旱伞草根际土壤中 NO_3^- -N 含量呈增加趋势. 在培养第一天试验组比对照组高 113.1%, 在培养末期, 试验组根际土壤 NO_3^- -N 含量 (以干土计, 下同) 为 $8.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照组 ($5.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高 47%. 由图 3(c) 可以观察到在整个培养过程中, 试验组硝化反应强度基本都高于对照组.

图 3(b) 显示了培养过程中试验组和对照组石菖蒲根际土壤 NO_3^- -N 含量变化过程. 在整个培养过程中, 试验组 NO_3^- -N 含量高于对照组. 在试验初期, 试验组 NO_3^- -N 含量为 $1.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于对照组 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 但在试验后期, 试验组 NO_3^- -N 含量增长到 $12.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照组 ($9.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高 42.4%. 由图 3(d) 可以知道, 在整个培养过程中, 试验组石菖蒲与对照组根际土壤硝化反应强度有着相同的变化趋势, 与旱伞草的试验结果相似. 试验组和对照组在第二周的时候硝化反应强度都达到最高 [SCP-MD 为 $0.83 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, SCP-CK 为 $0.85 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$].

在整个试验过程中, 试验组旱伞草累积硝化量与对照组相比增加了 33.5%, 石菖蒲增加了 59.5%. 总体来说, 两种接种处理湿生植物根际土壤的 NO_3^- -N 含量高于未接种湿生植物 NO_3^- -N 含量, 并且试验组硝化强度也高于对照组. 这表明接种 MF-MD 可以促进湿生植物根际土壤的硝化作用.

2.3 接种菌根真菌对湿生植物根际土壤反硝化作用的影响

在缺氧或厌氧条件下, 反硝化细菌开始进行反硝化作用, 将 NO_3^- -N 还原. 湿地植物根际土壤常呈厌氧状态, 探究接种菌根真菌后能否促进湿地植物根际土壤反硝化作用, 对于富营养化水体 N 素的去除具有积极意义. 在反硝化过程中 NO_3^- -N 含量会持续下降, 测定土壤中 NO_3^- -N 含量可以表征植物根际土壤反硝化作用强弱.

图 4(a) 是不同处理旱伞草根际土壤培养过程中 NO_3^- -N 变化. 在试验过程中, 试验组旱伞草根际土壤 NO_3^- -N 含量一直低于对照组旱伞草. 在试验初期试验组 NO_3^- -N 含量为 $25.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于对照组 NO_3^- -N 浓度 $27.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在试验后期, 试验组 NO_3^- -N 含量为 $13.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照组 ($16.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 低 18%. 图 4(c) 显示了不同处理旱伞草根际土壤反硝化强度的变化过程, 在整个试验过程中, 试验组和对照组数据波动较大, 不能得出接种 MF-MD 能否促进旱伞草根际土壤反硝化作用的结

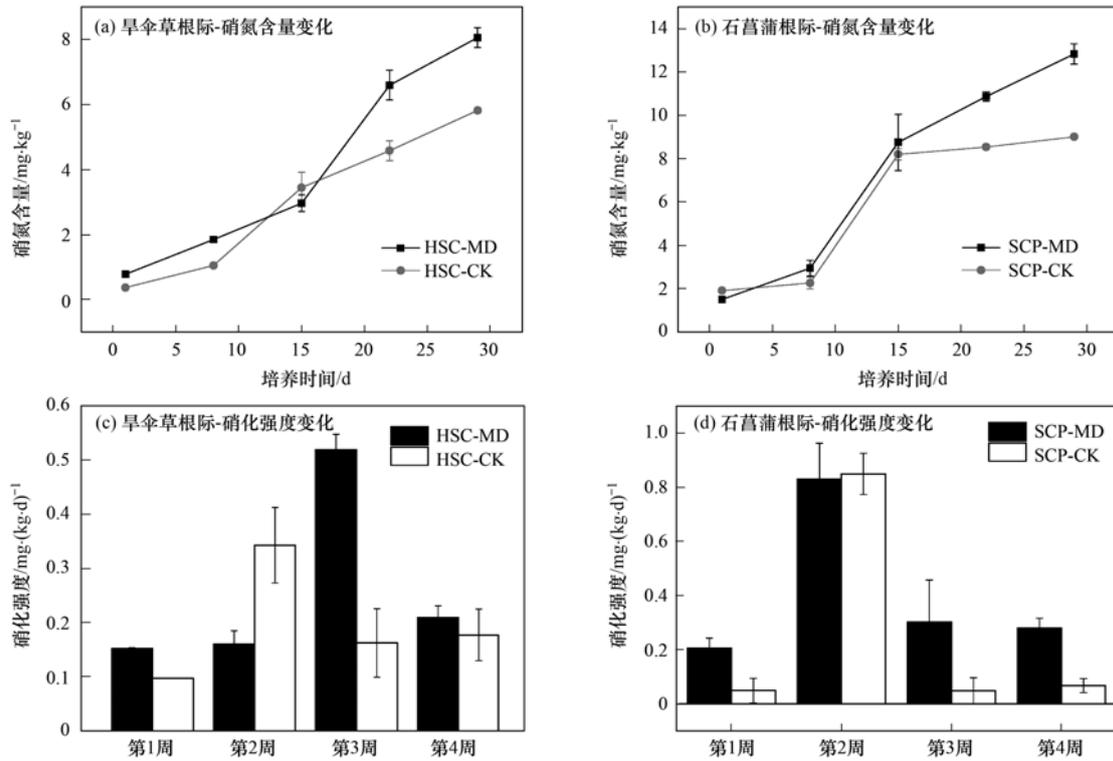


图 3 接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化作用的影响

Fig. 3 Effect of inoculating mycorrhizal fungi on nitrification of rhizospheric soil of wet plants

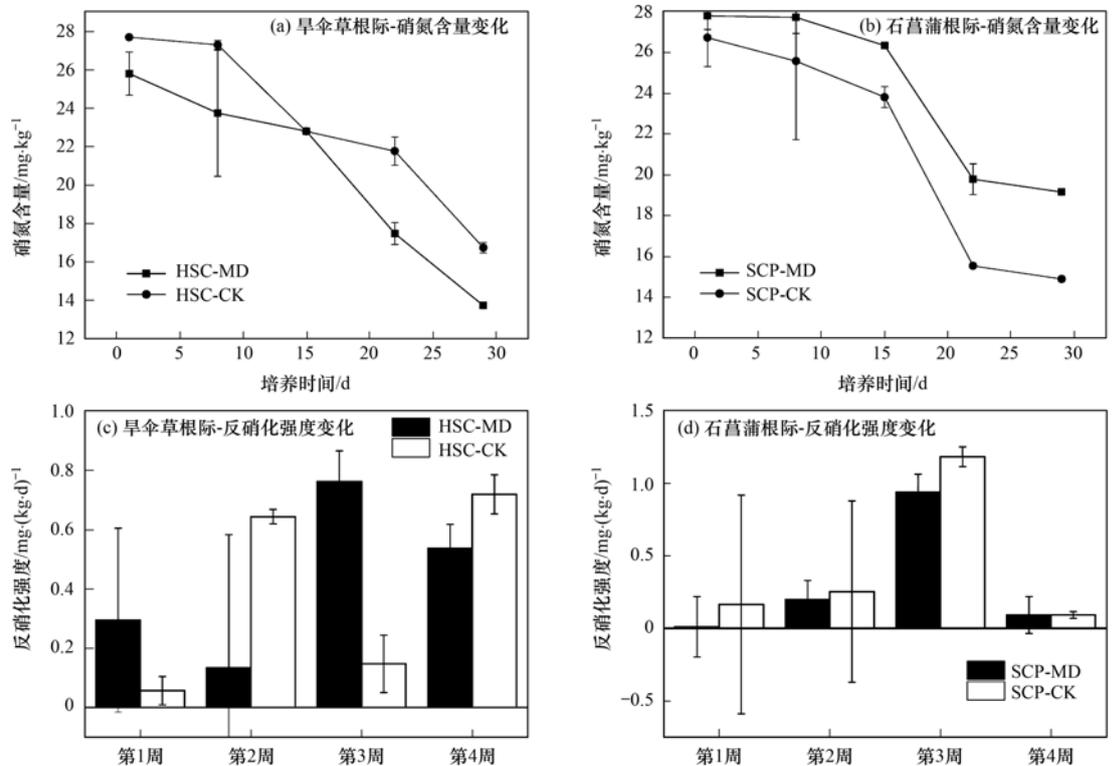


图 4 接种菌根真菌对湿生植物根际土壤反硝化作用的影响

Fig. 4 Effect of inoculation of mycorrhizal fungi on denitrification of rhizospheric soil of wet plants

论。但是由图 4(a)可知,随着培养时间的增长,试验组旱伞草根际土壤累积反硝化率为 46.81% 比对照组旱伞草 (39.57%) 高 18.32%, 表明接种 MF-MD 理可能促进旱伞草根际土壤反硝化作用。

图 4(b) 是不同处理石菖蒲根际土壤培养过程中 NO₃⁻-N 含量变化。可以发现在整个试验过程中, 试验组和对照组 NO₃⁻-N 含量都在降低, 并且试验组石菖蒲根际土壤 NO₃⁻-N 含量明显高于对照组。在试验

初期, 试验组 NO_3^- -N 含量为 $27.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比对照组 ($26.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高 4.0%; 在试验后期, 试验组 NO_3^- -N 含量降低至 $19.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对照组 NO_3^- -N 含量降低至 $14.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 试验组 NO_3^- -N 含量比对照组高 28.6%。同时根据图 4(d) 可以知道, 在培养过程中, 试验组石菖蒲根际土壤反硝化强度低于对照组。另一方面, 在整个试验过程中, 试验组石菖蒲根际土壤累积反硝化率为 31.1%, 对照组为 44.3%。试验组累积反硝化率比对照组低 42.4%。这些数据表明接种野外筛选的混合菌种 (MF-MD) 可能会抑制石菖蒲根际土壤反硝化作用。

2.4 接种菌根真菌对湿生植物根际土壤微生物量 (SMB) 的影响

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分。微生物的硝化-反硝化作用在 N 的去除过程中发挥重要作用。

本研究测定了两种不同处理的旱伞草和石菖蒲在水体氮素富营养条件下培养 3 个月后根际土壤中的微生物量, 结果如表 2 所示。接种处理的试验组旱伞草和石菖蒲 SMB 都高于对照组。其中试验组旱伞草根际土壤 SMB 为 $1.97\text{E}-10 \text{ mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 比对照组 ($1.48\text{E}-10 \text{ mol}\cdot\text{g}^{-1}$) 高 33.6%; 试验组石菖蒲根际土壤 SMB 为 $9.68\text{E}-11 \text{ mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 高于对照组 ($5.52\text{E}-11 \text{ mol}\cdot\text{g}^{-1}$) 75.2%。接种 MF-MD 与未接种 MF-MD 植物根际土壤微生物的生物量表现出一定的差异但并不显著。接种处理后微生物量的差异可能是造成试验组与对照组硝化强度与反硝化强度差异的原因。

根据已有研究^[28,29], 对植物接种 MF 通常会降低植物根际土壤的反硝化作用强度。在本试验中, 接种处理的石菖蒲与对照组相比根际土壤反硝化作用受到抑制, 但是接种处理的旱伞草根际土壤反硝化作用强度却高于对照组。为了进一步探究接种 MF-MD 对旱伞草根际土壤硝化-反硝化作用影响的微生物机制, 本研究分析了试验组与对照组旱伞草根际土壤细菌群落结构。

表 2 接种菌根真菌后湿生植物根际土壤 SMB/ $\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Aquatic plant rhizospheric soil SMB after inoculation of mycorrhizal fungi/ $\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	MD	CK
旱伞草	$19.739\text{E}-11 \pm 3.33\text{E}-11$	$14.770\text{E}-11 \pm 0.319\text{E}-11$
石菖蒲	$9.677\text{E}-11 \pm 0.210\text{E}-11$	$5.524\text{E}-11 \pm 0.520\text{E}-11$

2.5 接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化细菌群落结构的影响

Chao 指数和 ACE 指数被用来估计群落中 OTU 数目的指数, 是生态学中估计物种总数的常用指数

之一。Chao 或 ACE 指数与微生物群落丰富度呈正比。而群落多样性代表物种分布的均匀程度, Shannon 指数是用来估算样品中微生物多样性的指数之一。Shannon 值与群落多样性呈显著的正相关。由表 3 可知, 在 Chao 指数、ACE 指数和 Shannon 指数指标上 HSC-MD 都高于 HSC-CK, 说明接种 MF-MD 可提高旱伞草根际微生物群落丰富度和多样性, 但作用不显著。

表 3 生物多样性指数

Table 3 Biodiversity fares

项目	Chao 指数	ACE 指数	Shannon 指数
HSC-MD	3 464. 888	3 582. 868	8. 865
HSC-CK	3 260. 760	3 170. 020	8. 192

表 4 是样品在各分类水平上 (门、纲、目、科和属) 的物种数量情况。可以看到 HSC-MD 样品物种数在门、纲和目水平上要高于 HSC-CK 而在科和属水平上要低于对照组。说明接种 MF-MD 增加了旱伞草根际土壤在门、纲和目水平上的物种数量。

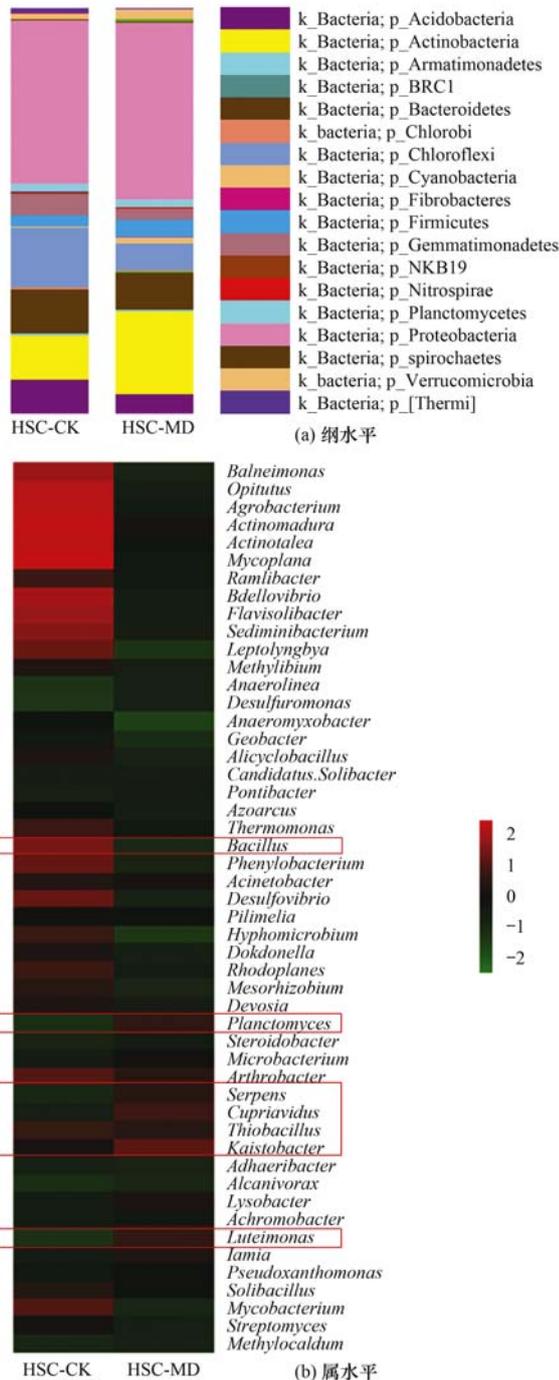
表 4 样品中各分类级别的物种数

Table 4 Number of species in the sample at each classification level

项目	门	纲	目	科	属
HSC-MD	42	106	167	178	187
HSC-CK	41	97	154	183	212

图 5(a) 是 HSC-MD 和 HSC-CK 在纲水平上的物种分类信息。变形菌门中差异比较大的是 α -变形菌 (9.4%、10.7%)、 β -变形菌 (12.2%、9.5%) 和 γ -变形菌 (12.7%、16.0%)。绿弯菌门中差异比较大的是厌氧绳菌纲 (11.9%、3.5%)。拟杆菌门中差异比较大的是纤维黏网菌 (6.9%、3.9%)。放线菌门中差异比较大的是放线菌纲 (7.8%、18.0%) 和酸微菌纲 (2.6%、1.6%)。硝化细菌主要包括亚硝酸菌和亚硝酸氧化菌, 其中亚硝酸菌分为氨氧化细菌 (AOB) 和氨氧化古菌 (AOA)。 α -变形菌纲和 β -变形菌纲与硝化作用相关。由图 5(a) 可知, HSC-MD 根际土壤中 β -变形菌纲明显高于 HSC-CK, 表现为接种处理植物根际土壤硝化作用强于对照组。

图 5(b) 是试验组旱伞草与对照组旱伞草根际土壤细菌在属水平上的分布热图, 其用颜色变化来反映数据信息, 直观地将数据值的大小以定义的颜色深浅表示出来, 反映多个样品在属水平上群落结构的相似性。由图 5(b) 可知, 旱伞草接种处理后根际土壤细菌属水平丰度增加比较明显的是浮霉菌属 (*Planctomyces*)、蛇形菌属 (*Serpens*)、贪铜菌属 (*Cupriavidus*)、*Kaistobacter* 和单孢菌 (*Luteimonas*) 等, 其中 *Planctomyces* 属于浮霉菌门, 其他属于 β -变



红框内为试验组和对照组与硝化反硝化
相关细菌丰度差异较大的属

图 5 对照组和试验组旱伞草根际土壤细菌群落结构

Fig. 5 Bacterial community structure of *Cyperus alternifolius* rhizospheric soil of control and experimental group

形菌和 γ -变形菌. 厌氧氨氧化细菌能增强系统反硝化作用, 已发现的厌氧氨氧化菌都属于浮霉菌. 在厌氧氨氧化启动过程中, 随着厌氧氨氧化菌富集程度的增加, 浮霉菌门数量出现显著上升^[30]. 这表明旱伞草接种处理, 可能促进了土壤中起反硝化作用的细菌的生长, 从而改变了旱伞草根际土壤细菌群落结构, 增强了湿生植物根际土壤反硝化作用. 但同时

(*Bacillus*) 丰度明显高于 HSC-MD, 据报道芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 是参与 NO_3^- -N 去除的主要反硝化细菌^[31, 32]. 这表明旱伞草接种 MF-MD 处理, 可能抑制了土壤中起反硝化作用的细菌的生长, 从而改变了旱伞草根际土壤细菌群落结构.

3 讨论

本研究以两种常见的湿地植物为宿主植物, 以接种野外筛选得到的混合菌剂 (MF-MD) 作为试验组, 并以未接种湿地植物作为对照组进行试验. 发现接种处理的试验组植物根际土壤硝化作用强度高于对照组. 接种 MF 会促进植物根系的生长, 植物根系的泌氧能力与根系发达程度呈显著正相关^[33, 34]. 罗鹏程等^[35]的研究发现, 接种 MF 显著提高了湿生植物根系的泌氧速率, 为硝化反应创造了好氧环境, 从而促进了湿生植物根际土壤硝化反应. 此外 Amora-Lazcano 等^[28]的研究表明, 接种 MF 的植物根际土壤中自养氨氧化菌的出现时间早于对照组, 并且比对照组更活跃. 而且通过细菌群落结构分析, 可以发现接种处理后的旱伞草根际土壤影响硝化作用的细菌群落结构发生了变化, 这也可能是接种 MF 促进土壤硝化反应的原因之一.

另一方面, 通过试验数据可以观察到接种 MF 促进了旱伞草根际土壤反硝化作用强度, 但在一定程度上抑制了石菖蒲反硝化作用. 目前, 关于接种 MF 影响土壤反硝化作用的研究和报道较少, Amora-Lazcano 等^[28]的盆栽试验表明, 接种 MF 的盆栽培养物中的氨化和反硝化细菌群体显著降低, 表明反硝化作用受到抑制. 同时 Zhang 等^[29]的野外试验表明接种 MF 有可能减轻稻田的 N_2O 排放, 从而间接证明了接种 MF 可能弱化土壤的反硝化作用.

影响土壤反硝化作用的因素是多方面的. 在土壤中可溶性有机碳的含量影响土壤反硝化过程^[36]. 可溶性碳氮源对土壤呼吸及硝化-反硝化强度有一定的激发效应^[37]. 接种 MF 可以将光合同化物快速地转移到菌丝体^[38], 并进一步分泌到土壤中, 增加土壤有机碳浓度, 为土壤微生物量增加及反硝化作用提供碳源. 徐鹏等^[39]的研究表明, 土壤中可利用碳源的含量是促进氮素矿化和反硝化的关键因素. 接种 MF 提高植物根际土壤氧气浓度会破坏土壤缺氧环境, 不利于反硝化作用. 底物浓度是反硝化反应需要考虑的另一个因素. Zhang 等^[29]的试验中 NO_3^- -N 含量为 $2.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Amora-Lazcano 等^[28]的试验土壤 NO_3^- -N 含量为 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, NO_3^- -N 含量可能成为限制反硝化作用的主要原因. 另外据王佩等^[40]的调查, 太湖湖滨底泥中 TN 含量高达 458

~5 211 mg·kg⁻¹. 在富营养化水体的底泥中, 存在较高含量的NO₃⁻-N. 因此在土壤底物含量较高的条件下, 接种 MF 增强土壤反硝化作用强度存在合理性.

导致接种处理的旱伞草和石菖蒲根际土壤反硝化作用出现差异的原因是多方面的. 筛选获得的混合菌剂对不同的植物侵染率不同, 其中旱伞草侵染率为 42.0% 比石菖蒲侵染率(23.5%) 高 78.7%. 更高的菌根侵染程度诱导植物根系的发育, 发达的植物根系一方面会增强植物的根系泌氧速率^[33, 34], 另一方面也有利于有机物分泌转移到土壤中. 植物根系泌氧不利于反硝化作用, 有机物的分泌转移有利于反硝化作用. 当有机物分泌对土壤反硝化作用的促进效应超过了泌氧的抑制效应时, 表现出接种处理会促进植物根际土壤反硝化作用. 此外不同植物生长发育可能需要不同的土壤环境, 相同的土壤环境也可能是造成不同植物根际土壤反硝化作用出现差异的原因.

4 结论

(1) 接种本地筛选的菌根真菌能够促进旱伞草和石菖蒲根际土壤硝化作用.

(2) 接种本地筛选的菌根真菌能够促进旱伞草和石菖蒲根际土壤微生物量.

(3) 在NO₃⁻-N浓度不成为反硝化作用的限制因子的时候, 接种菌根真菌可能能够促进旱伞草根际土壤反硝化作用, 但同时也可能抑制石菖蒲根际土壤反硝化作用.

(4) 接种菌根真菌影响旱伞草和石菖蒲根际土壤反硝化作用的机制在于改变根系细菌群落结构还是改变根际土壤环境, 最终影响反硝化作用强度还需要进一步探究.

参考文献:

- [1] Schwarzott D, Walker C, Schüßler A. *Glomus*, the largest genus of the arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales), is nonmonophyletic [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2001, **21**(2): 190-197.
- [2] Hack C M, Porta M, Schaefe R, *et al.* Arbuscular mycorrhiza mediated effects on growth, mineral nutrition and biological nitrogen fixation of *Melilotus alba* med. in a subtropical grassland soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **134**: 38-44.
- [3] De Oliveira J S F, Xavier L P, Lins A, *et al.* Effects of inoculation by arbuscular mycorrhizal fungi on the composition of the essential oil, plant growth, and lipoxygenase activity of *Piper aduncum* L. [J]. *AMB Express*, 2019, **9**(1): 29.
- [4] Zhang F G, Liu M H, Li Y, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa* [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 1150-1158.
- [5] Secilia J, Bagyaraj D J. Bacteria and actinomycetes associated with pot cultures of vesicular-arbuscular mycorrhizas [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1987, **33**(12): 1069-1073.
- [6] Harrison K A, Bol R, Bardgett R D. Preferences for different nitrogen forms by coexisting plant species and soil microbes [J]. *Ecology*, 2007, **88**(4): 989-999.
- [7] Kaye J P, Hart S C. Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1997, **12**(4): 139-143.
- [8] Lin G G, McCormack M L, Ma C E, *et al.* Similar below-ground carbon cycling dynamics but contrasting modes of nitrogen cycling between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal forests [J]. *New Phytologist*, 2017, **213**(3): 1440-1451.
- [9] Morrison E, Lagos L, Al-Agely A, *et al.* Mycorrhizal inoculation increases genes associated with nitrification and improved nutrient retention in soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, **53**(3): 275-279.
- [10] Chen Y L, Chen B D, Hu Y J, *et al.* Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizal fungi on abundance and community structure of ammonia oxidizing bacteria and archaea in soil microcosms [J]. *Pedobiologia*, 2013, **56**(4-6): 205-212.
- [11] Bukovska P, Bonkowski M, Konvalinková T, *et al.* Utilization of organic nitrogen by arbuscular mycorrhizal fungi-is there a specific role for protists and ammonia oxidizers? [J]. *Mycorrhiza*, 2018, **28**(5-6): 465-465.
- [12] Veresoglou S D, Verbruggen E, Makarova O, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi alter the community structure of ammonia oxidizers at high fertility via competition for soil NH₄⁺ [J]. *Microbial Ecology*, 2018, **78**(1): 147-158.
- [13] Corbin J D, Avis P G, Wilbur R B. The role of phosphorus availability in the response of soil nitrogen cycling, understory vegetation and arbuscular mycorrhizal inoculum potential to elevated nitrogen inputs [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, **147**(1-4): 141-162.
- [14] 段灏, 王磊, 曹湛波. 接种丛植菌根真菌对湿生植物氮磷吸收能力的影响 [J]. *工业微生物*, 2016, **46**(6): 1-6.
- [14] Duan H, Wang L, Cao Z B. Effects of Arbuscular mycorrhizal fungi on absorption of nitrogen and phosphorous in aquatic plants [J]. *Industrial Microbiology*, 2016, **46**(6): 1-6.
- [15] Nazari-Sharabian M, Ahmad S, Karakouzian M. Climate change and eutrophication: a short review [J]. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 2018, **8**(6): 3668-3672.
- [16] Paerl H W, Scott J T, McCarthy M J, *et al.* It takes two to tango: When and where dual nutrient (N & P) reductions are needed to protect lakes and downstream ecosystems [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, **50**(20): 10805-10813.
- [17] 郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 等. 组合型生态浮床对水体修复及植物氮磷吸收能力研究 [J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(6): 2153-2159.
- [17] Zheng L G, Yang R B, Wang H P, *et al.* Study on water remediation and uptake ability of nitrogen and phosphorus by plants using combined ecological floating bed [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(6): 2153-2159.
- [18] Liu H, Song F B, Liu S Q, *et al.* Arbuscular mycorrhiza improves nitrogen use efficiency in soybean grown under partial root-zone drying irrigation [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, **65**(2): 269-279.
- [19] Mei L L, Yang X, Cao H B, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi alter plant and soil C: N: P stoichiometries under warming and nitrogen input in a semiarid meadow of China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**

- (3): E397.
- [20] Gerdemann J W, Nicolson T H. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting [J]. Transactions of the British Mycological Society, 1963, **46**(2): 235-244.
- [21] 龙良鲲, 姚青, 羊宋贞, 等. 扩繁条件对两种 AMF 菌剂接种势的影响[J]. 微生物学通报, 2007, **34**(2): 204-207.
Long L K, Yao Q, Yang S Z, *et al.* Effect on the inoculum potential of two kinds of arbuscular mycorrhizal fungi inoculum by the propagation conditions [J]. Microbiology China, 2007, **34**(2): 204-207.
- [22] 李昉, 刘尔宁, 董京铭, 等. 夜间增温对免耕农田土壤氮矿化与硝化速率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 54-58, 69.
Li Y, Liu E N, Dong J M, *et al.* Effect of no-tillage and nighttime warming condition on N mineralization and nitrification rates in cropland soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (4): 54-58, 69.
- [23] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 不同施氮量对两种茶园土壤硝化作用和 pH 值的影响[J]. 茶叶科学, 2015, **35**(1): 82-90.
Wang F, Chen Y Z, You Z M, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on nitrification and pH of two tea garden soil [J]. Journal of Tea Science, 2015, **35**(1): 82-90.
- [24] Reddy K R, Patrick W H Jr, Phillips R E. Evaluation of selected processes controlling nitrogen loss in a flooded soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(6): 1241-1246.
- [25] 汪旭明, 李亚兰, 林啸, 等. 湿地土壤反硝化作用及测定方法[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, **12**(3): 50-60.
Wang X M, Li Y L, Lin X, *et al.* Denitrification in wetland soils and its measurement methods [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2017, **12**(3): 50-60.
- [26] 席雪飞, 彭晓佳, 王磊, 等. 一种利用 Profile-1 生物发光仪快速测定土壤中微生物量的改良方法[J]. 工业微生物, 2010, **40**(6): 23-27.
Xi X F, Peng X J, Wang L, *et al.* An improved method based on profile-1 bioluminometer for detecting microbial biomass in soil [J]. Industrial Microbiology, 2010, **40**(6): 23-27.
- [27] 郭江源, 郭伟, 娜娜, 等. 丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1481-1488.
Guo J Y, Guo W, Bi N, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of reeds in wetland soils with different salt content [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1481-1488.
- [28] Amora-Lazcano E, Vázquez M M, Azcón R. Response of nitrogen-transforming microorganisms to arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, **27**(1): 65-70.
- [29] Zhang X, Wang L, Ma F, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on N₂O emissions from rice paddies [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, **226**: 222.
- [30] 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 等. 厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5184-5191.
Wang Y Q, Zhang M, Jiang Y, *et al.* Start-up and characteristics of the microbial community structure of ANAMMOX [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5184-5191.
- [31] O'Donnell S T, Rittmann B E, Kavazanjian E Jr. Factors controlling microbially induced desaturation and precipitation (MIDP) via denitrification during continuous flow [J]. Geomicrobiology Journal, 2019, **36**(6): 543-558.
- [32] Zhou B B, Duan J J, Xue L H, *et al.* Effect of plant-based carbon source supplements on denitrification of synthetic wastewater: Focus on the microbiology [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, **26**(24): 24683-24694.
- [33] 邓泓, 叶志鸿, 黄铭洪. 湿地植物根系泌氧的特征[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2007, (6): 69-76.
Deng H, Ye Z H, Huang M H. Characteristics of radial oxygen loss from root of wetland plants [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2007, (6): 69-76.
- [34] 刘依依. 水稻根系泌氧能力与根系特征及甲烷排放的相关性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015. 24-33.
Liu Y Y. Study on the relationship between rice root radial oxygen loss and root characteristics, methane emission [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. 24-33.
- [35] 罗鹏程, 李航, 王曙光. 湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐 Cd 胁迫的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 750-755.
Luo P C, Li H, Wang S G. Effect of arbuscular mycorrhiza (AM) on tolerance of cattail to Cd stress in aquatic environment [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 750-755.
- [36] 张志君, 秦树平, 袁海静, 等. 土壤氮气排放研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(2): 182-189.
Zhang Z J, Qin S P, Yuan H J, *et al.* Advance in soil dinitrogen emission [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(2): 182-189.
- [37] 田亚男, 张水清, 林杉, 等. 外加碳氮对不同有机碳土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(12): 2410-2417.
Tian Y N, Zhang S Q, Lin S, *et al.* Influence of soluble carbon and nitrogen additions on N₂O and CO₂ emissions from two soils with different organic carbon content [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(12): 2410-2417.
- [38] Johnson D, Leake J R, Read D J. Transfer of recent photosynthate into mycorrhizal mycelium of an upland grassland: Short-term respiratory losses and accumulation of ¹⁴C [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, **34**(10): 1521-1524.
- [39] 徐鹏, 邹磊, 胡金丽, 等. 添加葡萄糖、乙酸、草酸对红壤旱地土壤氮素矿化及反硝化的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(12): 4740-4746.
Xu P, Wu L, Hu J L, *et al.* Effects of glucose, acetic acid and oxalic acid additions on nitrogen mineralization and denitrification in red upland soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(12): 4740-4746.
- [40] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 703-709.
Wang P, Lu S Y, Wang D W, *et al.* Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(4): 703-709.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)