

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 李幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应

李越^{1,2}, 王子芳^{1,2}, 贾丽娟³, 谢军^{1,2}, 熊子怡^{1,2}, 高明^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400715; 3. 重庆市规划与自然资源局九龙坡区分局, 重庆 400051)

摘要: 研究有机肥和化肥配施生物炭对紫色土硝化势和氨氧化微生物变化特征的影响, 探明施肥措施和土壤环境因子对硝化势和氨氧化微生物的影响. 以紫色土为研究对象, 设置不施肥(CK)、单施化肥(F)、单施有机肥(P)、化肥配施生物炭(FP)和有机肥配施生物炭(PP)共5个处理. 采取PCR和T-RFLP方法研究土壤AOA和AOB群落特征, 同时测定土壤硝化势及环境因子, 明确有机肥配施生物炭对紫色土硝化潜势的影响. 结果表明: ①与CK处理相比, FP和PP处理显著增加土壤硝化势($P < 0.05$). ②与CK处理相比, F、P、FP和PP处理显著增加土壤AOA *amoA* 基因拷贝数78.17%~162.22% ($P < 0.05$), F、FP和PP处理显著增加AOB *amoA* 基因拷贝数21.56%~78.32% ($P < 0.05$). ③与CK处理相比, PP处理显著提高土壤AOA群落的Shannon指数、丰富度指数和均匀度指数($P < 0.05$), 而配施生物炭(FP和PP处理)能改变土壤AOB的群落结构. ④化肥和有机肥通过改变pH、TP、AP、C/N、SOM、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N等土壤性质, 从而影响AOA和AOB群落结构. ⑤逐步回归分析进一步表明AOB *amoA* 基因丰度是影响土壤硝化势的主要因素. 因此, 化肥和有机肥配施生物炭的条件下, AOB群落是酸性紫色土中氨氧化过程的主要驱动者, 施肥通过调控紫色土C/N和 NO_3^- -N影响氨氧化过程.

关键词: 生物炭; 有机肥; 紫色土; 硝化势; 氨氧化微生物

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6377-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211241

Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure

LI Yue^{1,2}, WANG Zi-fang^{1,2}, JIA Li-juan³, XIE Jun^{1,2}, XIONG Zi-yi^{1,2}, GAO Ming^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control Engineering in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400715, China; 3. Branch of Chongqing Municipal Bureau of Planning and Natural Resources, Jiulongpo District, Chongqing City, Chongqing 400051, China)

Abstract: The effects of manure and chemical fertilizer combined with biochar on nitrification potential and ammonia oxidation microbial change characteristics of purple soils were studied to explore the effects of fertilization measures and soil environmental factors on nitrification potential and ammonia oxidation microbial change characteristics. In this study, purple soil was taken as the research object, and five treatments were set up: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (F), manure (P), chemical fertilizer plus biochar (FP), and manure plus biochar (PP). PCR and T-RFLP methods were used to study the characteristics of soil AOA and AOB communities, and soil nitrification potential and environmental factors were measured at the same time to determine the effect of manure combined with biochar on the nitrification potential of purple soil. The results showed that: ① compared with that in the CK treatment, the FP and PP treatments significantly increased soil nitrification potential ($P < 0.05$). ② Compared with that in the CK treatment, the F, P, FP, and PP treatments significantly increased the number of copies of the AOA *amoA* gene in the soil by 78.17%-162.22% ($P < 0.05$), and the F, FP, and PP treatments significantly increased the number of copies of the AOB *amoA* gene by 21.56%-78.32% ($P < 0.05$). ③ Compared with that in the CK treatment, the PP treatment significantly improved the Shannon, richness, and evenness indices of the soil AOA community ($P < 0.05$), and the combination of biochar (FP and PP treatments) could change the community structure of the soil AOB. ④ The chemical fertilizer and manure affected the AOA and AOB community structure by changing soil properties such as pH, TP, AP, C/N, SOM, NO_3^- -N, and NH_4^+ -N. ⑤ Stepwise regression analysis further showed that AOB *amoA* gene abundance was the main factor affecting soil nitrification potential. Therefore, under the condition that chemical fertilizer and manure were applied together with biochar, the AOB community was the main driver of the ammonia oxidation process in acidic purple soil, and fertilization affected the ammonia oxidation process by regulating C/N and NO_3^- -N.

Key words: biochar; manure; purple soil; nitrification potential; ammonia oxidizing microorganism

作为农业生态系统氮循环的关键环节之一, 硝化作用能减少土壤氨的挥发, 有利于土壤有效态氮向植物根区移动, 促进植物对土壤氮素的吸收利用, 同时土壤中剩余的大量硝态氮(NO_3^- -N)容易通过地表径流和淋溶等方式进入地表水和地下水, 也容易通过反硝化作用等转化为 N_2O 等气态氮, 使氮肥利用率降低, 对生态环境产生消极影响, 造成环境污

染问题^[1~3]. 而氨氧化反应是硝化作用的关键限速步骤, 氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)作为氨氧化反应的主要驱动者, 其群落结构、生态位分

收稿日期: 2022-11-22; 修订日期: 2023-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177019)

作者简介: 李越(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与微生物生态, E-mail: ly417375272@163.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

异和丰度受土壤环境因子影响,施肥措施则通过改变土壤环境因子从而影响土壤氨氧化过程^[4~6].因此,研究土壤氨氧化过程和机制对实现农业的可持续发展具有重要意义.

生物炭作为一种新兴土壤改良剂,不仅能提升土壤质量,还能影响土壤氨氧化微生物,从而影响土壤硝化作用.大量研究表明,生物炭能通过改变土壤的生物化学环境,从而影响土壤的氨氧化微生物丰度、多样性和群落结构特征^[7~9].陈晨等^[10]的研究发现,生物炭配施氮肥能显著提高菜地土壤 AOA 和 AOB 丰度,同时改变 AOB 的群落结构. Ball 等^[11]的研究发现生物炭能显著增加森林土壤的硝化速率与氨氧化细菌(AOB)的丰度.但是, Ducey 等^[12]的研究结果表明,添加生物炭对土壤 AOA 和 AOB 丰度无显著影响.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^[13]. Dai 等^[14]研究表明施用有机肥条件下, AOA 群落活性比 AOB 更为敏感.但杨亚东等^[15]研究表明施用有机肥通过改变土壤硝态氮(NO_3^-)、全氮(TN)和有机碳含量影响 AOB 群落结构,最终影响土壤硝化势(NP),且在施用有机肥条件下更适合 AOB 的生长.目前关于生物炭或者有机肥对于 AOA 和 AOB 的群落特征影响尚无定论,有机肥配施生物炭对氨氧化微生物变化特征和硝化势的影响研究鲜见报道.

因此,本文以紫色土为研究对象,通过设置不施肥(CK)处理、单施化肥(F)处理、施用有机肥(M)处理、化肥配施生物炭(FP)处理和有机肥配施生物炭(PP)处理,采用 qPCR 技术测定了土壤氨氧化微生物丰度,同时测定土壤理化性质和硝化势,探明有机肥和化肥配施生物炭对紫色土硝化势的影响和氨氧化微生物的变化特征,旨在为有机肥和生物炭调控土壤硝化作用以及氮素转化机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自重庆市潼南区太安镇国家农业科技园区柠檬种植基地(0~30 cm),是紫色土区琼江河台地冲积物(Q4)经早耕熟化而成的一种紫色潮土.将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 cm 筛,作为盆栽试验的备用土壤.将部分过 2 cm 筛的土壤进一步研磨,分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定土壤理化性质.初始土壤的基本理化性质:容重 $1.48 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、pH 5.19、 $\omega(\text{SOM})$ $8.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{TN})$ $0.679 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{TP})$ 0.221

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{AN})$ $57.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $3.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ $4.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega(\text{AP})$ $9.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\omega(\text{AK})$ $244.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

供试柠檬品种为尤力克(Eureka),苗龄为嫁接 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,由四川省久晟农业有限责任公司提供,烧制方法是将稻壳在 500°C 高温厌氧条件下热解 2 h.供试有机肥为腐熟猪粪(120 d),取自潼南温氏养猪场.猪粪 AN、AP 和 AK 的缓释效率分别为 35.3%、34.8% 和 41.5%,供试生物炭和有机肥的基本性质见表 1.

表 1 供试生物质炭和有机肥基本性质¹⁾

供试材料	pH	$\omega/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$			
		C	N	P	K
生物质炭	9.50	238.52	0.81	1.75	6.83
腐熟猪粪	8.89	—	22.91	51.5	8.80

1) “—”表示没有测定该元素

1.2 试验设计

本试验设置 5 个处理(表 2),每个处理 4 次重复:①不施肥(CK)、②常规施化肥(F)、③单施有机肥(P)、④化肥+生物炭(FP)、⑤有机肥+生物炭(PP),试验采用随机区组设计.化肥使用的氮、磷和钾肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)和氯化钾(K_2O 60%).微量元素肥料是来自北美农大集团生产的硼锌锰铁镁钙硅复合微量元素水溶肥料(B、Zn、Mg、Si、Ca、Mn、Fe $\geq 12\%$),pH 为 6.0.

盆栽试验于 2019 年 5 月 1 日至 2020 年 6 月 25 日在“紫色土地”进行,其中,2019 年 5~12 月将盆栽置于室外培养,2020 年 1~6 月在温室大棚内培养.称取过 2 cm 筛的备用土壤 15 kg,按照等氮施肥原则将化肥、有机肥或生物炭混匀后分别装入盆钵.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,之后适时浇水,每次浇水保持各处理表层土壤的湿度一致.生物炭作为基肥一次性施入,有机肥和无机肥部分作为基肥施入三分之二,剩余三分之一用于追肥.之后每 2~3 个月进行一次追肥,共 4 次追肥,具体施肥量见表 2^[16].

1.3 测定方法

2020 年 6 月 25 日进行破坏性取样.将采集的新鲜土壤迅速带回实验室,一部分用于测定土壤硝化势、硝态氮和铵态氮;一部分用 Fast DNA Spin

Kit for Soil(MP Biomedicals 公司) 试剂盒提取土壤总 DNA,并将总 DNA 置于 -20℃ 的冰箱中保存,用于分析测定土壤硝化微生物丰度和群落结构;最后

一部分土壤置于室外自然风干,然后去除杂质,研磨后分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定除土壤硝态氮和铵态氮之外的土壤理化性质.

表 2 各处理施肥总量 ¹⁾ /g						
Table 2 Total fertilization amount for each treatment/g						
施肥处理	化肥			有机肥	稻壳生物炭	微量元素
	尿素	过磷酸钙	氯化钾			
CK	—	—	—	—	—	—
F	13.32	51.05	7.12	—	—	5.04
P	—	—	—	757.38	—	—
FP	13.07	46.50	3.57	—	133.35	5.04
PP	—	—	—	744.11	133.35	—

1) “—”表示没有该项肥料

1.3.1 土壤基本理化性质的测定

土壤 pH 采用 DMP-2mV 酸度计测定,土水比为 1:2.5; SOM 采用重铬酸钾容量法 (K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 法); TN 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,蒸馏滴定法测定; AN 采用碱解扩散法; NO₃⁻-N 采用 KCl 溶液浸提,紫外分光光度法测定; NO₃⁻-N 采用 KCl 溶液浸提,靛酚蓝比色法测定; TP 采用 NaOH 熔融法前处理,钼蓝比色法测定; AP 采用 Olsen 法; TK 采用 NaOH 熔融法前处理,火焰光度法测定; AK 采用 NH₄Ac 溶液浸提,火焰光度法测定^[17].

1.3.2 土壤硝化势的测定

采用悬浮液培养法^[16],称取 15.0 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤 2 份,分别放置于 250 mL 的三角瓶中,每瓶加入 100 mL 的液体培养基 [0.2 mol·L⁻¹ KH₂PO₄: 0.2 mol·L⁻¹ K₂HPO₄: 0.050 mol·L⁻¹ (NH₄)₂SO₄ = 3: 7: 30],并用带孔的橡皮塞封口,放置于振荡机上以 180 r·min⁻¹ 振荡 24 h. 于第 2、4、22 和 24 h 进行取样,每次吸取 10 mL 土壤悬浮液,

离心后用紫外分光光度法测定上清液中硝态氮和亚硝态氮的含量,每次取样后用同一培养基及时补足.同时要测定原始土样中的硝态氮和亚硝态氮含量.

1.3.3 硝化微生物丰度和群落结构的分析

采用荧光定量 PCR (qPCR) 技术来表征硝化微生物丰度^[18]. 首先用 Fast DNA Spin Kit for Soil (MP Biomedicals 公司) 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. 然后通过设计特定的引物,对目的基因片段进行 PCR 扩增,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,测出阳性重组质粒,将阳性克隆质粒收集为标准品. 最后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). 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. 硝化功能基因的 qPCR 引物、体系和程序见表 3.

表 3 硝化功能基因的 qPCR 引物、体系和程序					
Table 3 Quantitative PCR primers, systems, and procedures for nitrification function gene					
功能基因	引物名称	序列(5'-3')	体系	程序	
AOA <i>amoA</i>	<i>amo_F</i> <i>amoRa</i>	ATGGTCTGGCTAAGACGMTGTA GCGGCCATCCATCTGTATGT	25 μL 体系,PCR Mix 12.5 μL,引物 1.0 μL,DNA 1.0 μL(10 ng·μL ⁻¹), ddH ₂ O 9.5 μL	预变性 95℃ 10 min,变性 94℃ 45 s,退火 55℃ 45 s,延伸 72℃ 45 s,35 个循环	
AOB <i>amoA</i>	<i>amoA-1F</i> <i>amoA-1R</i>	GGGGTTTCTACTGCTGCT CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC	25 μL 体系,PCR Mix 12.5 μL,引物 1.0 μL, DNA1.0 μL(10 ng·μL ⁻¹), ddH ₂ O 9.5 μL	预变性 95℃ 10 min,变性 94℃ 45 s,退火 55℃ 45 s,延伸 72℃ 45 s,35 个循环	

采用 T-RFLP 末端限制性片段长度多态性 (T-RFLP) 分析对微生物群落的功能基因进行定性和定量的分析测定,将 *amoA* 基因的 PCR 扩增产物用 MspI 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,然后送至生工生物工程股份有限公司 (上海) 进行 T-RFLP 分析,用 ABI Prism 3100 基因分析仪. 硝化功能基因 T-RFLP 的 PCR 引物见表 3,PCR 扩增体系和程序见表 4.

1.4 数据分析

本试验数据用 Excel 2019 进行整理,所有数据结果均用 3 次重复的平均值表示. 用 IBM SPSS Statistics 26 进行统计分析和 Origin 2022b 软件进行图表绘制,用邓肯 (Duncan) 法进行不同处理平均数之间的多重比较 ($P < 0.05$). 用 CANOCO 软件进行土壤环境参数和微生物群落结构基于距离尺度的冗余分析 (RDA).

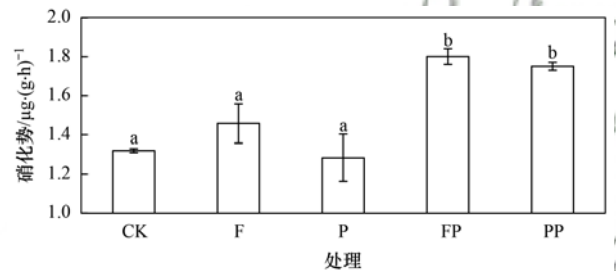
表 4 硝化功能基因 T-RFLP 的 PCR 引物、体系和程序

Table 4 Quantitative PCR primers, system, and procedures for T-RFLP analysis of nitrification functional gene				
功能基因	引物名称	序列(5'-3')	体系	程序
AOA <i>amoA</i>	Arch-amoAF	STAATGGTCTGGCTTAGACG	25 μL 体系, PCR Mix 12.5 μL , 引物 0.5 μL , DNA 3.0 μL (10 $\text{ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$), ddH ₂ O 8.5 μL	预变性 94 $^{\circ}\text{C}$ 5 min, 变性 94 $^{\circ}\text{C}$ 1 min, 退火 53 $^{\circ}\text{C}$ 1 min, 延伸 72 $^{\circ}\text{C}$ 1 min, 34 个循环, 最终延伸 72 $^{\circ}\text{C}$ 10 min
	Arch-amoAR	GCGGCCATCCATCTGTATGT		
AOB <i>amoA</i>	amoA-1F	GGGGTTTCTACTGGTGGT	25 μL 体系, PCR Mix 12.5 μL , 引物 0.5 μL , DNA 3.0 μL (10 $\text{ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$), ddH ₂ O 8.5 μL	预变性 94 $^{\circ}\text{C}$ 5 min, 变性 94 $^{\circ}\text{C}$ 1 min, 退火 53 $^{\circ}\text{C}$ 1 min, 延伸 72 $^{\circ}\text{C}$ 1 min, 34 个循环, 最终延伸 72 $^{\circ}\text{C}$ 10 min
	amoA-1R	CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC		

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤硝化势和土壤养分的影响

与 CK 处理相比,FP 和 PP 处理显著提高了土壤硝化势 36.36% 和 32.68% ($P < 0.05$),其中 FP 处理的土壤硝化势最大(图 1),为 $1.80\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. 而 CK、F 和 P 处理的土壤硝化势之间并无显著性差异($P > 0.05$). 说明配施生物炭可以提高土壤硝化势,单施化肥或有机肥并不能显著影响土壤硝化势.



不同小写字母表示不同施肥处理之间硝化势差异显著($P < 0.05$); CK:不施肥,F:常规施化肥,P:有机肥,FP:化肥+生物炭,PP:有机肥+生物炭,下同

图 1 不同施肥处理对土壤硝化势的影响

Fig. 1 Effect of different fertilization treatments on the nitrification potential of soil

与 CK 处理相比,F 和 FP 处理分别显著降低 pH 0.23~0.64 个单位,P 和 PP 处理显著增加 pH 0.15~0.32 个单位;P、FP 和 PP 处理显著增加 SOM 含量 9.46%~24.31%;FP 和 PP 处理显著增加 TK 含量 9.84%~14.10%;PP 处理显著降低 NH_4^+-N 含量 71.60%,F 处理显著增加 NO_3^--N 含量 127.94%;F 处理显著增加 AN 含量 28.29%,FP 和 PP 处理显著降低 AN 含量 13.44%~16.08%;4 个施肥处理分别显著增加 TN 含量 1.61%~22.58%、 NO_3^--N 含量 76.20%~144.85%、AP 含量 189.15%~679.96%、AK 含量 17.05%~157.01%;F 处理显著降低 C/N (表 5).

2.2 不同施肥处理对 AOA 和 AOB *amoA* 基因丰度的影响

与 CK 处理相比,F、FP 和 PP 处理分别显著增加土壤 AOA *amoA* 基因拷贝数 162.22%、111.30% 和 161.01%. 其中 F 处理的土壤 AOA *amoA* 基因拷贝数最高,为 $2.06 \times 10^7\text{ copies}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ [图 2(a)];与 CK 处理相比,F、FP 和 PP 处理分别显著增加土壤 AOB *amoA* 基因拷贝数 21.56%、52.12% 和 78.31%. 其中 PP 处理的土壤 AOB *amoA* 基因拷贝数最高,为 $2.95 \times 10^8\text{ copies}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ [图 2(b)]. 总体上,

表 5 不同施肥处理对土壤养分的影响¹⁾

Table 5 Effects of different fertilization treatments on soil nutrients										
处理	pH	$\omega(\text{SOM})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TN})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TK})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AP})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AN})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AK})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	C/N
CK	5.21 ± 0.01c	7.61 ± 0.04a	0.62 ± 0.03a	15.86 ± 0.52a	4.37 ± 0.23a	10.81 ± 3.43b	9.03 ± 0.11a	58.57 ± 3.56b	74.43 ± 0.24a	7.48 ± 0.09bc
F	4.57 ± 0.00a	7.75 ± 0.10a	0.76 ± 0.01c	16.67 ± 0.03ab	10.70 ± 1.02d	24.64 ± 4.91c	70.43 ± 4.24d	75.14 ± 0.08c	191.29 ± 0.65e	5.91 ± 0.08a
P	5.36 ± 0.00d	9.46 ± 0.04c	0.75 ± 0.00c	16.69 ± 0.15ab	8.84 ± 0.89c	6.70 ± 1.14ab	59.17 ± 0.48c	57.08 ± 0.64b	99.94 ± 1.16c	7.31 ± 0.03b
FP	4.98 ± 0.02b	8.35 ± 0.03b	0.64 ± 0.00b	17.42 ± 0.70bc	9.26 ± 1.02c	9.67 ± 2.94b	28.87 ± 0.04b	50.70 ± 2.13a	87.12 ± 0.64b	7.56 ± 0.03c
PP	5.53 ± 0.01e	8.33 ± 0.00b	0.63 ± 0.02b	18.08 ± 0.87cd	7.70 ± 0.28b	3.07 ± 0.49a	30.93 ± 1.48b	49.15 ± 0.01a	123.2 ± 4.14d	7.67 ± 0.24c

1) 数据为 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准误; 组间不同小写字母表示不同处理下土壤养分差异显著($P < 0.05$), 下同

各处理土壤的 AOB *amoA* 基因丰度高于 AOA *amoA* 基因丰度.

2.3 不同施肥处理对 AOA 和 AOB 群落结构的影响

在土壤 AOA 群落中,F 处理的 Shannon 指数最低,为 1.09. PP 处理的 Shannon 显著高于其他处理($P < 0.05$),为 1.39. AOA 群落丰富度指数在 1.28

~3.53 之间,与 CK 处理相比,施用有机肥的 P 和 PP 处理的丰富度指数显著提高了 85.01% 和 152.14%,说明施用有机肥能显著提高 AOA 丰富度指数,以配施生物炭的 PP 处理效果最佳. CK 和 FP 处理的 AOA 群落均匀度指数显著高于其他处理,说明这 2 个处理的 AOA 群落分布更加均匀(表 6).

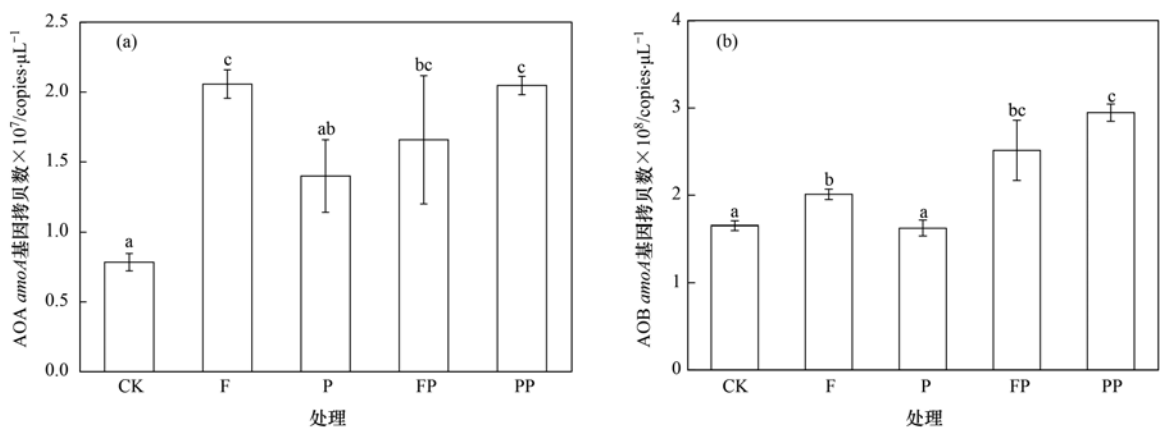


图2 不同施肥处理对土壤 AOA *amoA* 和 AOB *amoA* 基因拷贝数的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on the copy numbers of AOA *amoA* and AOB *amoA* genes in soil

表6 不同施肥处理下土壤 AOA 和 AOB 群落的 Shannon 指数(*H*)、丰富度指数(*S*)和均匀度指数(*EH*)

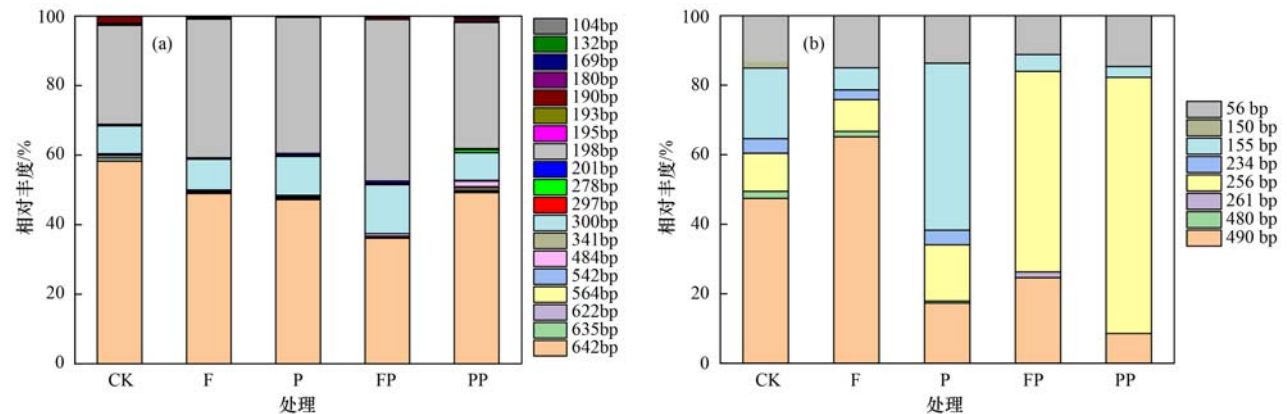
处理	Shannon 指数		丰富度指数		均匀度指数	
	AOA	AOB	AOA	AOB	AOA	AOB
CK	1.27 ± 0.21b	1.52 ± 0.07c	1.40 ± 0.12a	0.82 ± 0.13c	0.46 ± 0.08b	0.73 ± 0.01b
F	1.09 ± 0.14a	1.26 ± 0.06b	1.55 ± 0.14a	0.86 ± 0.11c	0.38 ± 0.06a	0.57 ± 0.01a
P	1.28 ± 0.13b	1.42 ± 0.06c	2.59 ± 1.45b	0.65 ± 0.21b	0.39 ± 0.02a	0.75 ± 0.09b
FP	1.28 ± 0.13b	1.15 ± 0.08b	1.28 ± 0.24a	0.53 ± 0.18b	0.48 ± 0.02b	0.71 ± 0.07b
PP	1.39 ± 0.03c	0.83 ± 0.11a	3.53 ± 0.71c	0.38 ± 0.12a	0.38 ± 0.01a	0.62 ± 0.05a

在土壤 AOB 群落中,与 CK 处理相比,F、FP 和 PP 处理显著降低 Shannon 指数 17.11%、24.34% 和 45.39%,其中 PP 处理降幅最显著;P、FP 和 PP 处理显著降低丰富度指数 20.73%、35.37% 和 53.66%,其中 PP 处理降幅最显著;F 和 PP 处理显著降低均匀度指数 21.92% 和 15.07%,其中 F 处理降幅最显著.总的来说,施肥处理会降低 AOB 的 Shannon 指数、丰富度指数和均匀度指数,以有机肥配施生物炭(PP 处理)效果最明显(表 6).

所有施肥处理的土壤 AOA 群落中均有 2 个相同的优势 T-RFs 片段,即 198 bp (相对丰度为

28.07%~46.44%) 和 642 bp (相对丰度为 36.11%~63.32%),这 2 个 T-RFs 片段在各施肥处理的土壤 AOA 群落中的总相对丰度达到了 82.55%~91.38%.除了上述的 2 个优势 T-RFs 片段,P 和 FP 处理的土壤 AOA 群落均还有 1 个优势 T-RFs 片段,即 100 bp 的 T-RFs 片段,相对丰度分别为 11.19% 和 14.07% [图 3(a)].

所有施肥处理的土壤中 AOB 群落都存在的优势 T-RFs 片段是 56 bp,在 5 个处理中的相对丰度为 11.16%~15.00%.各施肥处理的土壤 AOB 群落中均有 256 bp 的 T-RFs 片段,该片段在配施生物炭



(a) AOA *amoA*, (b) AOB *amoA*

图3 不同施肥处理对土壤 AOA *amoA* 和 AOB *amoA* 基因限制性酶切片段的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of AOA *amoA* and AOB *amoA* gene restriction fragments in soil under different fertilization treatments

(FP 和 PP) 处理中的相对丰度为 57.70% 和 73.71%, 在 CK 和 P 处理的相对丰度为 11.00% 和 16.18%, 在 F 处理中不属于优势 T-RFs 片段, 相对丰度仅为 9.13%. 155 bp 是 CK 和 P 处理的优势 T-RFs 片段, 相对丰度分别为 20.29% 和 48.06%; 490 bp 是 CK、F、P 和 FP 处理的优势 T-RFs 片段, 相对丰度为 17.34%~65.16%. 配施生物炭的 FP 和 PP 处理的土壤中, AOB 群落均以 256 bp 为主要的优势片段, 说明配施生物炭能改变土壤 AOB 的群落结构[图 3(b)].

2.4 AOA、AOB 群落结构与环境因子的 RDA 分析

RDA 分析图的两轴共解释了 AOA 群落结构变化的 74.79%, 其中, 第 1 排序轴解释了群落结构变化的 48.12%, 第 2 排序轴解释了群落结构变化的 26.67%. pH、SOM、TK、C/N 与排序轴 1 和排序轴 2 均是正相关关系, WC 和排序轴 1 是正相关, 和排序轴 2 是负相关, NO_3^- -N、TN、TP、AP 和排序轴 1 是负相关, 和排序轴 2 是正相关, NH_4^+ -N、AN、AK 和排序轴 1、排序轴 2 均是负相关关系[图 4(a)].

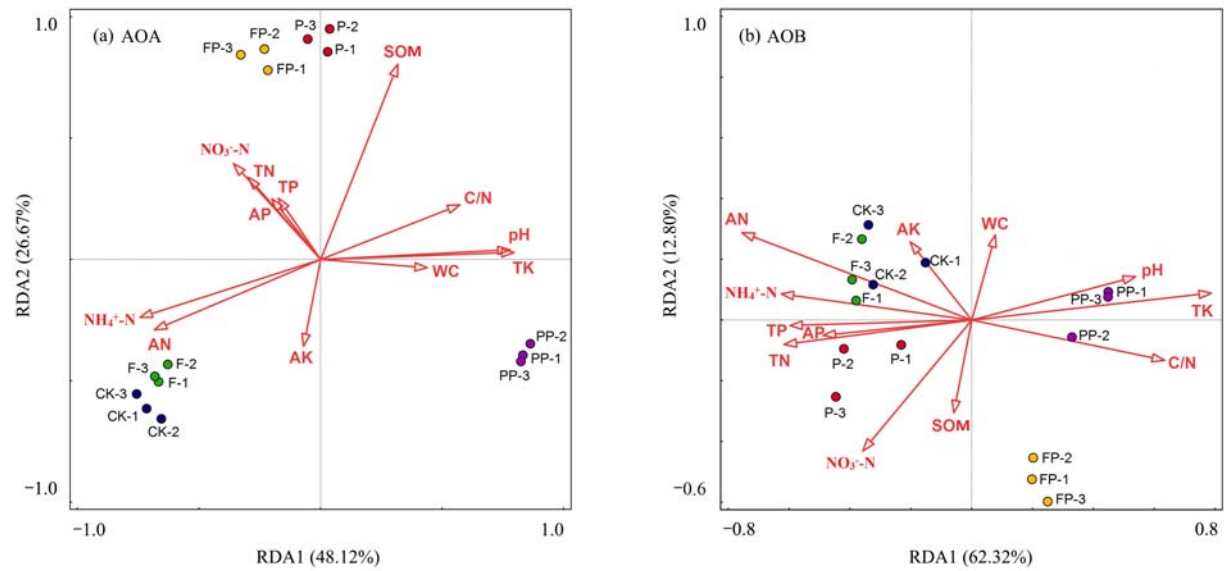
土壤 AOB 群落结构与环境因子的 RDA 分析图中的第 1 排序轴解释了群落结构变化的 62.32%, 第 2 排序轴解释了群落结构变化的 12.80%, 其中 TK、

AN、WC、SOM、TP 和 AK 等因子均有显著影响, 分别解释了 39.9%、16.5%、8.0%、7.3%、5.7% 和 5.1% 的土壤 AOB 群落变化. 其中, TK、AN、WC 和土壤 AOB 群落结构是极显著相关 ($P < 0.01$), SOM、AK、TP 和土壤 AOB 群落结构是显著相关 ($P < 0.05$)[图 4(b)].

2.5 土壤硝化势、amoA 基因丰度和土壤理化性质的相关性

通过皮尔逊相关性分析得到土壤硝化势、氨氧化微生物(AOA 和 AOB) amoA 基因丰度和土壤理化性质之间的相关性, 结果如图 5 所示. NP 与土壤 AOB amoA 基因丰度、TK 和 C/N 之间是显著正相关关系 ($P < 0.05$), 与 AN 和 NH_4^+ -N 是显著负相关关系 ($P < 0.05$). 土壤 AOA amoA 基因丰度与 NO_3^- -N、TK 和 AK 之间是显著的正相关关系 ($P < 0.05$). 土壤 AOB amoA 基因丰度与 TK 之间是显著的正相关关系 ($P < 0.05$), 与 C/N 之间是极显著正相关关系 ($P < 0.01$).

逐步回归分析进一步表明(表 7), NO_3^- -N 是解释 AOA amoA 基因丰度最好的土壤变量, C/N 是解释 AOB amoA 基因丰度最好的土壤变量, AOB amoA 基因丰度是解释 NP 最好的土壤变量.



SOM:有机质, TN:全氮, TP:全磷, TK:全钾, AN:碱解氮, NO_3^- -N:硝态氮, NH_4^+ -N:铵态氮, AP:速效磷, AK:速效钾, C/N:碳氮比, WC:含水率,下同

图4 土壤 AOA、AOB 群落结构与环境因子的 RDA 分析

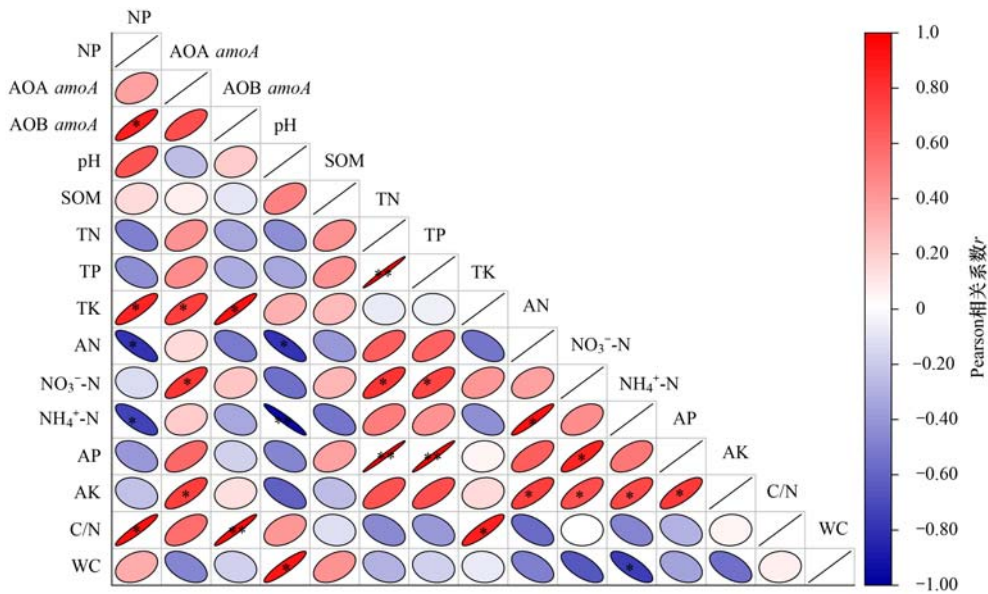
Fig. 4 RDA analysis of soil AOA and AOB community structure and environmental factors

表7 土壤硝化势和 amoA 基因丰度变化的主要预测因子逐步线性回归分析

Table 7 Main predictors responsible for the changes in soil nitrification potential and the amoA

gene abundance based on stepwise linear regression analysis

项目	土壤环境因子	F 值	调整后的 R^2	P 值
AOA amoA 基因丰度	NO_3^- -N	28.99	0.64	<0.001
AOB amoA 基因丰度	C/N	34.82	0.89	<0.01
NP	AOB amoA 基因丰度	23.01	0.85	<0.05



* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

图5 土壤硝化势、*amoA* 基因丰度和土壤理化性质之间的相关性

Fig. 5 Correlation between soil nitrification potential, *amoA* gene abundance, and soil physical and chemical properties

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤硝化势和氨氧化微生物基因丰度的影响

在本研究中,配施生物炭(FP和PP)处理较不施肥(CK)处理能显著提高土壤的硝化势,He等^[19]在酸性土壤中施加生物炭,发现较CK处理能显著提高土壤硝化势,这与本研究的结果一致.这是因为生物炭疏松多孔,具有良好的透气性,养分含量高,能吸附土壤中大量抑制硝化作用的物质,并抑制土壤中影响氨氧化微生物群落结构多样性的因子^[20,21].添加生物炭后, NH_4^+ -N含量下降和 NO_3^- -N含量的累积也会增加AOB的基因丰度,这主要是因为生物炭的孔隙结构有利于硝态氮在土壤中停留,提高土壤AOB活性,进而提高土壤硝化势^[22,23].

本研究结果发现单施化肥、化肥配施生物炭和有机肥配施生物炭显著增加AOA基因丰度,同时单施化肥显著改变AOB基因丰度,这与吕玉等^[24]研究的结果一致,该研究发现在不同施氮水平下均能显著提高土壤硝化势.这是因为施氮增加了土壤中的无机氮含量,从而导致氮循环相关微生物种群也随之增加^[25].本研究还发现化肥配施生物炭和有机肥配施生物炭显著改变AOB基因丰度,表明在酸性紫色土中,生物炭的添加会增加土壤AOA和AOB基因丰度,刘远等^[26]在采煤塌陷区土中施入生物炭,发现土壤AOA和AOB基因丰度均得到一定程度的增加,这与本研究的结果一致.这是因为随着生物炭的添加,刺激土壤氨氧化关键酶活性,改变了

AOB群落结构.在本试验中,AOA和AOB基因丰度都有一定的增加,但AOB *amoA* 基因丰度显著高于AOA,且土壤硝化势与AOB *amoA* 基因丰度之间呈现显著的正相关关系,说明氨氧化细菌(AOB)在酸性紫色土的氨氧化过程中占据主导地位,这与Hayatsu等^[27]研究的结果一致.

本研究表明AOA *amoA* 基因丰度与 NO_3^- -N、TK和AK呈正相关,这与熊艺等^[28]研究的结果相同.逐步回归分析进一步表明 NO_3^- -N是解释AOA *amoA* 基因丰度最好的土壤变量.这可能是因为 NO_3^- -N作为氨氧化过程的反应基质,能够有效地为AOA群落的生长提供能量来源,同时有研究证明土壤微生物共存网络的一些属性与土壤可溶性氮(如 NO_3^- -N)含量显著相关,而氨氧化古菌*Nitrososphaeria*是微生物共存网络的关键节点,作为一种富营养型古菌,*Nitrososphaeria*在施用化肥和有机肥的土壤中丰度较高^[29,30].AOB *amoA* 基因丰度与TK呈正相关,与C/N呈极显著正相关,这与王先芳等^[31]研究的结果一致.逐步回归分析进一步表明C/N是解释AOB *amoA* 基因丰度最好的土壤变量.这可能是因为随着生物炭的添加,增加了土壤总碳.尽管生物炭中的惰性碳占有较大比例,但这一过程中微生物量碳也有增加,从而对土壤C/N达到增强效应^[32].生物炭含少量易分解有机物,输入土壤也可为微生物活动提供碳源和氮源,同时生物炭可以改善土壤孔隙结构,这为菌根和细菌等微生物提供了生存和繁殖场所,促进特殊类群微生物栖息生长,提高了AOB基因丰度^[33].

3.2 有机肥配施生物炭影响土壤氨氧化微生物群落结构的驱动因子

冗余分析结果表明,化肥和有机肥配施生物炭通过改变 pH、TP、AP、C/N、SOM、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 等土壤环境因子从而驱动 AOA 群落结构,同时通过改变 TK、AN、WC、SOM、TP 和 AK 等土壤环境因子从而驱动 AOB 群落结构,这与 Deng 等^[34]研究的结果相似. pH 是影响 AOA 和 AOB 群落生态位的重要驱动力,一方面土壤 pH 与氨氧化微生物的活性有直接关系,另一方面化肥、有机肥以及生物炭通过改变土壤 pH 以及有机质的矿化速率,影响 AOA 和 AOB 群落利用碳源和氮源,间接影响其群落结构^[35,36]. C/N 作为碳源, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 作为氨氧化过程反应基质,能为 AOA 和 AOB 群落生长提供能量来源^[37,38]. 土壤含水率不仅会直接影响 AOA 和 AOB 群落的生长发育,还间接影响土壤氧气含量和氨氧化反应基质的运移及其有效性,从而与其群落结构密切相关^[39]. 本研究还表明,全磷和有效磷含量会影响氨氧化微生物群落结构,这与 Huang 等^[40]研究的结果一致,其研究发现在添加外源磷的条件下,微生物丰度会有所增加. 这可能是因为磷会通过影响土壤碳氮循环及化学性质对氨氧化微生物群落结构产生间接影响. 因此,化肥和有机肥配施生物炭会通过改变土壤环境因子来影响 AOA 和 AOB 的群落结构.

3.3 土壤硝化势与土壤环境因子和氨氧化微生物群落的关系

本研究结果表明,土壤硝化势与土壤 AOA *amoA* 并没有显著相关性,与 AOB *amoA* 呈显著正相关关系,这与贺纪正等^[41]研究的结果不同,该研究发现 AOA 和 AOB 在土壤中可能存在生态位分异,对于土壤氨氧化过程,AOA 主要在酸性和低氮的寡营养环境中起主导作用,而 AOB 更倾向于在中碱性环境中起主导作用,这是因为随着生物炭的添加,其孔隙结构有利于 NO_3^- -N 在土壤中停留,土壤和作物根系对 NO_3^- -N 的吸收促进了土壤有机氮的矿化,丰度了氨氧化微生物作用的底物 NH_4^+ -N 的增加,进而提升了 AOB 丰度,形成了良性循环^[42,43]. 同时在 Sun 等^[44]研究中发现 AOB 对土壤酸化的耐受性比 AOA 强,AOB 的生存范围和生态生理多样性比 AOA 更广,He 等^[19]研究发现在酸性土壤中施加生物炭,土壤硝化势与 AOB 呈显著正相关,与 AOA 不相关. 因此,在酸性土壤中施加生物炭的条件下,AOB 对氨氧化的潜在贡献不容忽视. 逐步回归分析进一步表明,土壤环境因子中 AOB *amoA* 是影响土壤硝化势的主要因素,这与王晓辉等^[45]研究的结果

一致,其研究表明,在设施栽培的耕层土中施加生物炭,使 AOB 的丰度增加,导致了硝化势的增加. 这可能是因为配施生物炭显著改变了土壤 C/N 和 NH_4^+ -N,影响了土壤环境和氨氧化过程的反应基质含量,从而影响了氨氧化微生物群落的活性、丰度和组成,最终影响土壤硝化势.

4 结论

在酸性紫色土中,化肥和有机肥配施生物炭能显著提高土壤硝化势. 化肥和有机肥配施生物炭可以同时显著提高 AOA 和 AOB 的基因丰度,施用有机肥显著提高 AOA 的多样性,同时施肥显著降低 AOB 的多样性. 施肥通过改变 pH、TP、AP、C/N、SOM、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 等土壤环境因子影响土壤 AOA 和 AOB 群落结构. 化肥和有机肥配施生物炭主要通过影响 AOB *amoA* 基因丰度从而提高土壤硝化势. 因此,化肥和有机肥配施生物炭的条件下,AOB 群落是酸性紫色土中氨氧化过程的主要驱动者,同时施肥通过调控紫色土 C/N 和 NO_3^- -N 影响氨氧化过程.

参考文献:

- [1] 李景云,秦嗣军,葛鹏,等. 不同生育期苹果园土壤氨氧化微生物丰度研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 1149-1156.
Li J Y, Qing S J, Ge P, et al. Abundance of ammonia oxidizers in apple orchard soil at different growth stages[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(4): 1149-1156.
- [2] 王梅,王智慧,石孝均,等. 长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4727-4734.
Wang M, Wang Z H, Shi X J, et al. Long-term fertilization effects on the abundance of complete ammonia oxidizing bacteria (Comammox Nitrospira) in a neutral paddy soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4727-4734.
- [3] 范晓晖,朱兆良. 我国几种农田土壤硝化势的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 124-125.
Fan X H, Zhu Z L. Potential of nitrification in the three soil profiles of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(2): 124-125.
- [4] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria: a model for molecular microbial ecology[J]. Annual Review of Microbiology, 2001, 55: 485-529.
- [5] Liu H Y, Li J, Zhao Y, et al. Ammonia oxidizers and nitrite-oxidizing bacteria respond differently to long-term manure application in four paddy soils of south of China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 641-648.
- [6] Beekman F, Motte H, Beekman T. Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2018, 50: 166-173.
- [7] 潘逸凡,杨敏,董达,等. 生物炭对土壤氮素循环的影响及其机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2666-2673.
Pan Y F, Yang M, Dong D, et al. Effects of biochar on soil nitrogen cycle and related mechanisms: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2666-2673.

- [8] 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 等. 生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 467-476.
Yang W N, Deng Z X, Li J, *et al.* Effect of biochar and chemical fertilizer mixture on ammonia volatilization and phosphorus fixation[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 467-476.
- [9] Geng Y J, Yuan Y M, Miao Y C, *et al.* Decreased nitrous oxide emissions associated with functional microbial genes under bio-organic fertilizer application in vegetable fields[J]. Pedosphere, 2021, **31**(2): 279-288.
- [10] 陈晨, 许欣, 毕智超, 等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 N_2O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1912-1920.
Chen C, Xu X, Bi Z C, *et al.* Effects of biochar and organic manure on N_2O emissions and the functional gene abundance of nitrification and denitrification microbes under intensive vegetable production[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(5): 1912-1920.
- [11] Ball P N, Mackenzie M D, Deluca T H, *et al.* Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2010, **39**(4): 1243-1253.
- [12] Ducey T F, Ippolito J A, Cantrell K B, *et al.* Addition of activated switchgrass biochar to an aridic subsoil increases microbial nitrogen cycling gene abundances[J]. Applied Soil Ecology, 2013, **65**: 65-72.
- [13] 杨亚琴, 王恒松, 周亚利. 不同园林植物根际和非根际土壤养分的差异[J]. 江苏农业科学, 2015, **43**(12): 360-364.
- [14] Dai X L, Guo Q K, Song D L, *et al.* Long-term mineral fertilizer substitution by organic fertilizer and the effect on the abundance and community structure of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in paddy soil of south China[J]. European Journal of Soil Biology, 2021, **103**, doi: 10.1016/j.ejsobi.2021.103288.
- [15] 杨亚东, 宋润科, 赵杰, 等. 长期不同施肥制度对水稻土氨氧化微生物数量和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(11): 3829-3837.
Yang Y D, Song R K, Zhao J, *et al.* Effects of long-term different fertilization regimes on the abundance and community structure of ammonia oxidizers in paddy soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(11): 3829-3837.
- [16] 刘园, Khan M J, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. 土壤学报, 2015, **52**(4): 849-858.
Liu Y, Khan M J, Jin H Y, *et al.* Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in Cambosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(4): 849-858.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 张晶, 张惠文, 张成刚. 实时荧光定量 PCR 及其在微生物生态学中的应用[J]. 生态学报, 2005, **25**(6): 1445-1450.
Zhang J, Zhang H W, Zhang C G. Real-time fluorescent quantitative PCR and its application in microbial ecology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(6): 1445-1450.
- [19] He L L, Bi Y C, Zhao J, *et al.* Population and community structure shifts of ammonia oxidizers after four-year successive biochar application to agricultural acidic and alkaline soils[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 1105-1115.
- [20] Paavolainen L, Kitunen V, Smolander A. Inhibition of nitrification in forest soil by monoterpenes[J]. Plant and Soil, 1998, **205**(2): 147-154.
- [21] Song Y J, Zhang X L, Ma B, *et al.* Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, **50**(2): 321-332.
- [22] Chen Y N, Liu Y, Li Y P, *et al.* Influence of biochar on heavy metals and microbial community during composting of river sediment with agricultural wastes[J]. Bioresource Technology, 2017, **243**: 347-355.
- [23] 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 等. 生物炭对华北农田土壤 N_2O 通量及相关功能基因丰度的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3816-3825.
Liu X R, Zhao G X, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar on nitrous oxide fluxes and the abundance of related functional genes from agriculture soil in the North China plain[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3816-3825.
- [24] 吕玉, 周龙, 龙光强, 等. 不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3229-3236.
Lü Y, Zhou L, Long G Q, *et al.* Effect of different nitrogen rates on the nitrification potential and abundance of ammonia-oxidizer in intercropping maize soils[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3229-3236.
- [25] 郭俊杰, 朱晨, 刘文波, 等. 不同施肥模式对土壤氮循环功能微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, **27**(5): 751-759.
Guo J J, Zhu C, Liu W B, *et al.* Effects of different fertilization managements on functional microorganisms involved in nitrogen cycle[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, **27**(5): 751-759.
- [26] 刘远, 朱继荣, 吴雨晨, 等. 施用生物炭对采煤塌陷区土壤氨氧化微生物丰度和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(10): 3417-3423.
Liu Y, Zhu J R, Wu Y C, *et al.* Effects of biochar application on the abundance and structure of ammonia-oxidizer communities in coal-mining area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(10): 3417-3423.
- [27] Hayatsu M, Tago K, Uchiyama I, *et al.* An acid-tolerant ammonia-oxidizing γ -proteobacterium from soil [J]. The ISME Journal, 2017, **11**(5): 1130-1141.
- [28] 熊艺, 郑璐, 沈仁芳, 等. 缺氧胁迫对小麦根际土壤微生物群落结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2022, **59**(1): 218-230.
Xiong Y, Zheng L, Shen R F, *et al.* Effects of nitrogen deficiency on microbial community structure in rhizosphere soil of wheat[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, **59**(1): 218-230.
- [29] Ma B, Wang H Z, Dsouza M, *et al.* Geographic patterns of co-occurrence network topological features for soil microbiota at continental scale in Eastern China [J]. The ISME Journal, 2016, **10**(8): 1891-1901.
- [30] Tang H M, Xiao X P, Xu Y L, *et al.* Utilization of carbon sources in the rice rhizosphere and nonrhizosphere soils with different long-term fertilization management[J]. Journal of Basic Microbiology, 2019, **59**(6): 621-631.
- [31] 王先芳, 任天志, 智燕彩, 等. 添加生物炭改善菜地土壤氨氧化细菌群落并提高净硝化率[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(3): 502-510.
Wang X F, Ren T Z, Zhi Y C, *et al.* Biochar application improves ammonia oxidation microbial community and increases net nitrification in vegetable soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(3): 502-510.
- [32] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant

- productivity and nutrient cycling: a meta-analysis [J]. *GCB Bioenergy*, 2013, **5**(2): 202-214.
- [33] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1301-1310.
- [34] Deng L T, Zhao M M, Bi R X, *et al.* Insight into the influence of biochar on nitrification based on multi-level and multi-aspect analyses of ammonia-oxidizing microorganisms during cattle manure composting[J]. *Bioresource technology*, 2021, **339**, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125515.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Gao S J, Zhou G P, Rees R M, *et al.* Green manuring inhibits nitrification in a typical paddy soil by changing the contributions of ammonia-oxidizing archaea and bacteria[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **156**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103698.
- [38] Zhang X X, Zhang R J, Gao J S, *et al.* Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **104**: 208-217.
- [39] Hu H W, Macdonald C A, Trivedi P, *et al.* Water addition regulates the metabolic activity of ammonia oxidizers responding to environmental perturbations in dry subhumid ecosystems [J]. *Environmental Microbiology*, 2015, **17**(2): 444-461.
- [40] 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.
- [41] 贺纪正, 沈菊培, 张丽梅. 土壤硝化作用的新机理——氨氧化古菌在酸性土壤氨氧化中的主导作用[J]. *科学观察*, 2012, **7**(6): 58-60.
- [42] Fiorentino N, Sánchez-Monedero M A, Lehmann J. *et al.* Interactive priming of soil N transformations from combining biochar and urea inputs: A ¹⁵N isotope tracer study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **131**: 166-175.
- [43] 虞璐. 生物质炭对酸化土壤的改良效应及其对土壤硝化作用的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Yu L. The effect of biochar on acidic soil amelioration and soil nitrification[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [44] Sun R B, Myrold D D, Wang D Z, *et al.* AOA and AOB communities respond differently to changes of soil pH under long-term fertilization[J]. *Soil Ecology Letters*, 2019, **1**(3-4): 126-135.
- [45] 王晓辉, 郭光霞, 郑瑞伦, 等. 生物炭对设施退化土壤氮相关功能微生物群落丰度的影响[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(3): 624-631.
- Wang X H, Guo G X, Zheng R L, *et al.* Effect of biochar on abundance of n-related functional microbial communities in degraded greenhouse soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(3): 624-631.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)