

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响

冉泰山¹, 龙健^{1*}, 廖洪凯¹, 李娟², 杨国梅¹, 赵雨鑫¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 微塑料广泛分布在土壤环境中, 威胁着土壤生态环境系统, 改变了土壤理化性质和微生物特征. 生物炭因其特殊的孔隙结构具有良好的土壤养分保持能力, 常被作为改善土壤质量的土壤改良剂. 然而, 目前关于生物炭施用对微塑料污染土壤理化性质和细菌群落的影响及其机制研究还非常有限. 因此, 进行为期 21 d 微观土壤培养实验, 利用 16S rRNA 高通量测序技术分析生物炭的施用对不同浓度微塑料污染土壤理化性质和细菌群落变化的影响. 结果表明, 生物炭的施用减缓了微塑料污染土壤硝态氮和速效磷含量的降低, 增加了全磷含量. 生物炭的添加增加了微塑料污染石灰性土壤酸杆菌门 (Acidobacteriota)、放线菌门 (Actinobacteriota) 和拟杆菌门 (Bacteroidota) 等微塑料耐受菌门相对丰度. 在第 7 d 和第 21 d 各处理的优势细菌为变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门和放线菌门. 与第 7 d 相比, 第 21 d 各处理土壤变形菌门和厚壁菌门 (Firmicutes) 的相对丰度显著降低, 酸杆菌门、放线菌门、拟杆菌门、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和粘菌门 (Myxococcota) 的相对丰度增加. 施用生物炭还增加了微塑料污染土壤溶杆菌属 (*Lysobacter*) 的相对丰度. 以上结果表明生物炭的施用增加了微塑料耐受菌, 增强了微塑料污染土壤稳定性, 减缓了微塑料对土壤的污染, 且生物炭对改善微塑料污染石灰性土壤质量有着巨大潜力.

关键词: 微塑料; 生物炭; 细菌群落; 土壤理化性质; 石灰土

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4507-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209166

Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil

RAN Tai-shan¹, LONG Jian^{1*}, LIAO Hong-kai¹, LI Juan², YANG Guo-mei¹, ZHAO Yu-xin¹

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Microplastics are widely distributed in the soil environment, threatening the soil ecological environment system and changing soil physicochemical properties and microbial characteristics. Biochar is often used as a soil amendment to improve soil quality due to its special pore structure and good soil nutrient retention ability. However, the understanding of the effects and mechanisms of biochar application on the physicochemical properties and bacterial communities of microplastic-contaminated soils is still very limited. Therefore, a 21-day micro-soil culture experiment was conducted to analyze the effects of biochar application on physicochemical properties and bacterial community changes in soil contaminated with different concentrations of microplastics using 16S rRNA high-throughput sequencing technology. The results revealed that the application of biochar slowed down the decrease in nitrate nitrogen and Olsen-P contents in microplastic-contaminated soil and increased the total phosphorus content. Biochar addition increased the relative abundance of tolerant phylum such as Acidobacteriota, Actinobacteriota, and Bacteroidota in microplastic-contaminated calcareous soil. Proteobacteria, Acidobacteriota, and Actinobacteriota were the dominant bacteria of the soil bacterial community in each treatment on day 7 and day 21. Compared with that on day 7, the relative abundance of Proteobacteria and Firmicutes significantly decreased, and the relative abundance of Acidobacteriota, Actinobacteriota, Bacteroidota, Chloroflexi, and Myxococcota increased on day 21. Biochar application also increased the relative abundance of *Lysobacter* in microplastic-contaminated soils. This study demonstrated that the application of biochar increased microplastic-resistant bacteria, enhanced the stability of microplastic-contaminated soil, and slowed down the pollution of microplastics to the soil. Moreover, biochar had great potential to improve the quality of microplastic-contaminated calcareous soil.

Key words: microplastic; biochar; bacterial communities; physicochemical properties; calcareous soil

塑料是一种高分子聚合物, 一般可以从化石燃料副产品中提取获得^[1], 具有化学稳定性高、可塑性强、便宜且耐用的良好特征, 因此, 塑料广泛应用于医疗、餐饮服务行业、农业、工业和日常生活等各个方面^[2]. 有研究显示, 2005 ~ 2019 年, 全球塑料年产量增加了 1.18 亿 t^[3], 预计至 2050 年, 将生产约 7.3 亿 t 塑料制品^[4]. 2021 年我国塑料制品行业汇总统计企业累计完成产量 80 039.8 kt^[5]. 塑料进入环境中后受到风力作用和光照作用以及人为作用而裂解、破碎和磨损, 变成细小的碎

片、纤维、颗粒和薄膜等不同形态特征的塑料. 这些粒径 < 5 mm 且形态各异的塑料被称为“微塑料”^[6].

微塑料 (microplastic, MPs) 作为新型环境污染物^[7], 日益转变为地表系统生态环境威胁之一, 广

收稿日期: 2022-09-18; 修订日期: 2022-10-25

基金项目: 贵州省科学技术基金重点项目 (黔科合基础 [2020] 1Z036); 贵州省百层次创新人才项目 (黔科合平台人才 [2020] 6010)

作者简介: 冉泰山 (1997 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生物炭对微塑料污染土壤影响机制, E-mail: rantaishan@163.com

* 通信作者, E-mail: longjian0022@163.com

泛赋存于水体^[8]、大气^[9]和土壤环境^[10,11]当中.有研究显示与海洋环境相比^[12],陆地土壤环境既是微塑料的“源”也是微塑料的“汇”.据研究估计,欧洲和北美每年有 6.3~43 万 t 和 4.4~30 万 t 的微塑料被释放到农田自然环境当中^[13].Chen 等^[14]报道在我国武汉郊区菜地的微塑料丰度范围为 320~12 560 ind·kg⁻¹,其中粒径小于 0.2 mm 的微塑料占 70%.在上海城郊蔬菜大棚土壤中,表层土壤(0~3 cm)和较深层土壤(3~6 cm)中的微塑料丰度分别是 (78.00 ± 12.91) ind·kg⁻¹ 和 (62.50 ± 12.97) ind·kg⁻¹^[15].土壤环境中微塑料来源较为广泛,农业用膜、污水灌溉及底泥的施用、大气沉降和垃圾填埋场渗滤液渗流等是土壤环境中微塑料富集的重要来源^[16,17].由于塑料自身结构和特性,导致微塑料在自然生态环境中难以降解,并且由于其高疏水性和高比表面积,周围环境污染物和病原体容易附着在其表面,甚至还可能通过食物链传递^[18],对自然生态环境系统构成威胁^[19],带来的环境污染与毒害问题不容小觑^[20].因此,微塑料对土壤生态环境的影响还需要深入地研究.

通过各种途径迁移转化进入土壤的微塑料以及微塑料的累积效应对土壤环境生态系统产生了直接或间接的影响^[21].有研究表明,迁移转化到土壤环境中的微塑料可能会影响土壤理化性质^[6],植物生长性状^[22,23],土壤微生物群落结构、多样性^[24]和土壤酶活性^[25].Yan 等^[26]研究发现在红壤当中添加的高量和低量微塑料都显著增加了土壤中的有效磷的含量,但同时导致水稻土当中有效磷含量的降低.聚乙烯微塑料的添加降低了土壤的 pH 值,但同时升高了土壤的电导率,而在土壤中添加聚苯乙烯微塑料的则没有如此显著影响^[27,28].微塑料不仅对土壤物理性质产生影响,同时还影响土壤化学性质以及微生物群落结构和多样性^[29,30].Rillig 等^[31]研究显示,微塑料在土壤生态环境系统中对土壤微生物的活动、植物的生长以及凋落物的分解产生影响,从而影响碳在土壤生态环境系统中的循环.因此,存在土壤生态环境系统中的微塑料会影响土壤理化性质、植物生长、土壤微生物群落结构和多样性.表明微塑料会直接或间接地影响土壤环境生态系统.

生物炭具有高抗分解性、高比表面积和高碳氮比,常被作为改善土壤质量的土壤改良剂.生物炭因其特殊的孔隙结构具有良好的土壤养分保持能力^[32,33],同时生物炭对改善酸性土壤 pH 值,提高作物产量起着良好的促进作用^[34].生物炭显著增加微生物分类和功能多样性、微生物活动的总体变

化^[35].研究微塑料污染土壤理化性质和微生物特性的影响,有助于更好地了解土壤生态环境系统的整体变化.Palansooriya 等^[36]研究表明在两种水分条件下,不同类型生物炭对低密度聚乙烯(LDPE)微塑料污染微生物特性和土壤 pH、电导率(EC)、有效磷和总可交换阳离子(TEC)产生了不同影响.但是,关于生物炭作为微塑料污染土壤改良剂提高微塑料污染土壤质量的研究,以及生物炭对不同浓度 MPs 污染石灰性土壤理化性质和微生物特征的变化研究相对较少.

在本研究中,通过微观土壤培养实验,分析了生物炭的施用对不同浓度 MPs 污染土壤的影响,目的是探讨生物炭对不同浓度 MPs 污染石灰性土壤理化性质和微生物特征的影响及其机制,以评估生物炭作为微塑料污染土壤改良剂提升土壤质量的潜力以及为后续微塑料污染土壤修复提供参考.本研究假设生物炭的施用可以改善不同浓度 MPs 污染石灰性土壤质量,增加微塑料污染土壤细菌群落多样性和丰富度,增强微塑料污染土壤稳定性.

1 材料与方法

1.1 实验材料

土壤(根据土壤调查,土壤为砂质石灰土)采自贵州省贵阳市贵州师范大学校内相宝山(26°35'30"N, 106°43'09"E),采集未丢弃塑料垃圾的 0~20 cm 清洁土壤,剔除有机残体和石头,取约 10 g 新鲜土样装入无菌袋中,放入含生物冰袋的泡沫箱,用于 16S rRNA 高通量测序.其余土壤充分混合,自然风干后过 2 mm 筛做培养实验,土壤的基本性质如表 1.根据农田土壤微塑料污染现状^[13,15],供试微塑料选用聚丙烯(polypropylene, PP)粉末(粒径:1 mm,密度 0.90 g·cm⁻³),购自广东东莞明誉兴塑胶原料有限公司,过 1 mm 筛,去离子水冲洗 3 次烘干后使用.供试生物炭购于河南立泽环保科技有限公司,生物炭样品由玉米秸秆在 500℃ 缺氧条件下缓慢热解 2~3 h 而成.生物炭(粒径:1 mm),过 1 mm 筛,以供进一步使用.生物炭基本性质如下:pH 为 7.29, ω [总碳(TC)]为 55.31 g·kg⁻¹, ω [总氮(TN)]为 1.35 g·kg⁻¹, ω [全磷(TP)]为 0.243 g·kg⁻¹.

1.2 实验设计

本实验在贵州师范大学贵州省山地环境重点实验室恒温培养箱中进行,设置 6 个处理:添加低量微塑料[0.2%,质量分数,下同,M1]、添加高量微塑料(1%,M2)、添加生物炭(0.5%,C)、低量微塑料和生物炭混施(0.2%的微塑料和 0.5%的生物炭混施,M1C)和高量微塑料和生物炭混施(1%的微

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soil					
项目	pH	ω [有机质(SOM)] /g·kg ⁻¹	ω (TP) /g·kg ⁻¹	ω [速效磷(Olsen-P)] /mg·kg ⁻¹	ω [铵态氮(NH ₄ ⁺ -N)] /mg·kg ⁻¹
数值	7.51	64.60	0.62	7.68	7.35

料和 0.5% 的生物炭混施, M2C) 以及对照处理(不添加生物炭和微塑料, CK). 根据土壤生态环境系统中微塑料的污染现状^[24], 考虑到未来微塑料的累积效应, 设置高低两种微塑料浓度(0.2% 和 1%). 对于生物炭处理, 生物炭处理浓度设置为(0.5%). 每个处理重复 3 次, 共计 18 盆. 在正式培养前将风干土质量含水率调至 18%^[37], 然后在恒温培养箱[(24±1)℃]预培养一周, 以激活微生物. 每种处理供试土壤 0.5 kg(干重), 按上述比例先将微塑料和生物炭添加到 100 g 供试土壤中充分搅拌混合均匀, 然后再将这混合均匀的 100 g 土壤添加到剩下的 400 g 供试土壤中充分搅拌混合均匀. 最后装入底部直径 7 cm, 顶部直径 9 cm, 高 12 cm 的盆栽罐(搅拌在大玻璃烧杯当中进行). 将玻璃培养罐放置于培养箱内[(24±1)℃]培养 21 d. 玻璃罐顶部用带有小针孔的锡箔纸覆盖以便于气体交换, 定期进行培养观测.

1.3 样品采集与测定方法

在培养的第 0、7、14 和 21 d 分别采集土样. 每个处理每次采完土样后充分搅拌混匀. 每次采集土壤 60~65 g, 采集的土壤样品分为两部分, 其中一部分鲜土 30~35 g 存放于-20℃冰箱备用, 用于土壤微生物特征及NH₄⁺-N和NO₃⁻-N等的测定; 剩下土壤自然风干后过筛, 用于土壤 pH、SOM、Olsen-P 和 TP 等测定. 土壤 pH、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP、SOM 和 Olsen-P 的测定方法参考文献[38].

1.4 DNA 提取与扩增子测序

根据 Power Soil DNA 分离试剂盒(MoBio, San Diego, USA)的使用说明, 称取 0.5 g 土壤进行 DNA 提取, 使用 NanoDrop Spectrophotometer(ThermoScientific, Wilmington, USA)对提取的 DNA 进行浓度和纯度测定^[39]. 在天津诺禾致源生物信息科技有限公司, 通过正向引物 515F(5'-GTGCCAGC MGCCGCGGTAA-3') 和反向引物 907R(5'-CCGT CAATTCCTTTGAGTTT-3') 对细菌 16S rRNA 基因 V4-V5 区域进行 PCR 扩增, 高通量测序. 对原始 DNA 序列的质量优化在 QIIME(V1.9.1)(quantitative insights into microbial ecology)程序上进行, 使用 usearch(version 11)的 fastq_mergepairs、fastq_filter、fastx_uniques、unoise3 插件对双端序列进行合并、过滤、去冗余和降噪, 得到 ASVs 的代表

序列, otutab 函数统计 ASVs 丰度表. 基于 Silva138.1 数据库和 Kraken2 软件进行物种注释. 本文测序数据已经上传到美国国家生物技术信息中心(National Center for Biotechnology Information, NCBI)公共数据库, 登录号为 PRJNA847450. 细菌群落的丰富度指数和多样性指数(Shannon、Simpson)使用 R4.1.2 软件的“vegan”程序包进行计算.

1.5 数据统计与分析

使用 IBM SPSS Statistics 22.0 进行不同处理之间的多重比较, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)中的 Duncan 多重比较检验法, 以 0.05 水平统计差异的显著性. 用 Origin 22.0 进行绘图, Adobe illustrator 2022 进行图片排版. 使用 R 语言 4.1.2 基于 Bray-Curits 变异系数进行主坐标分析(PCoA), 通过 ANOSIM 分析比较不同处理间微生物群落的差异. 采用 R4.1.2 软件的“vegan”程序包进行微生物群落结构与土壤理化性质相关性分析及绘图.

2 结果与分析

2.1 生物炭对微塑料污染土壤理化性质的影响

生物炭和微塑料混合影响了土壤 pH 值(图 1). 总体上, pH 值在培养前期第 0、7 和 14 d 表现出呈升高的趋势, 后期保持稳定[图 1(a)]. 方差分析表明, 各处理土壤 pH 值未达到显著差异水平. 在第 0 d 和第 7 d M2 处理 pH 值都低于 M2C 处理, 其中在第 0 d M1C 处理 pH 值高于 M1 处理 pH 值. 生物炭对微塑料污染土壤 NH₄⁺-N 含量变化产生了影响. 不加生物炭的各处理在整个培养期间 NH₄⁺-N 含量平均值都均未观察到统计学显著差异(P>0.05). 在第 7 d 和第 14 d 加生物炭各处理(C、M1C 和 M2C) NH₄⁺-N 含量平均值与不加生物炭各处理(CK、M1 和 M2)相比较有增加趋势. 第 0~21 d NH₄⁺-N 含量平均值最大值出现在第 7 d 的 M1C 处理(17.55 mg·kg⁻¹)与 M2C 处理(21.38 mg·kg⁻¹), 且显著高于其它处理[图 1(b)]. 其中在第 7 d M1C 和 M2C 处理 NH₄⁺-N 含量平均值与 M1 和 M2 处理 NH₄⁺-N 含量平均值相比较分别增加了 38.30% 和 37.88%.

图 1(c)显示添加生物炭的各处理 NO₃⁻-N 含量

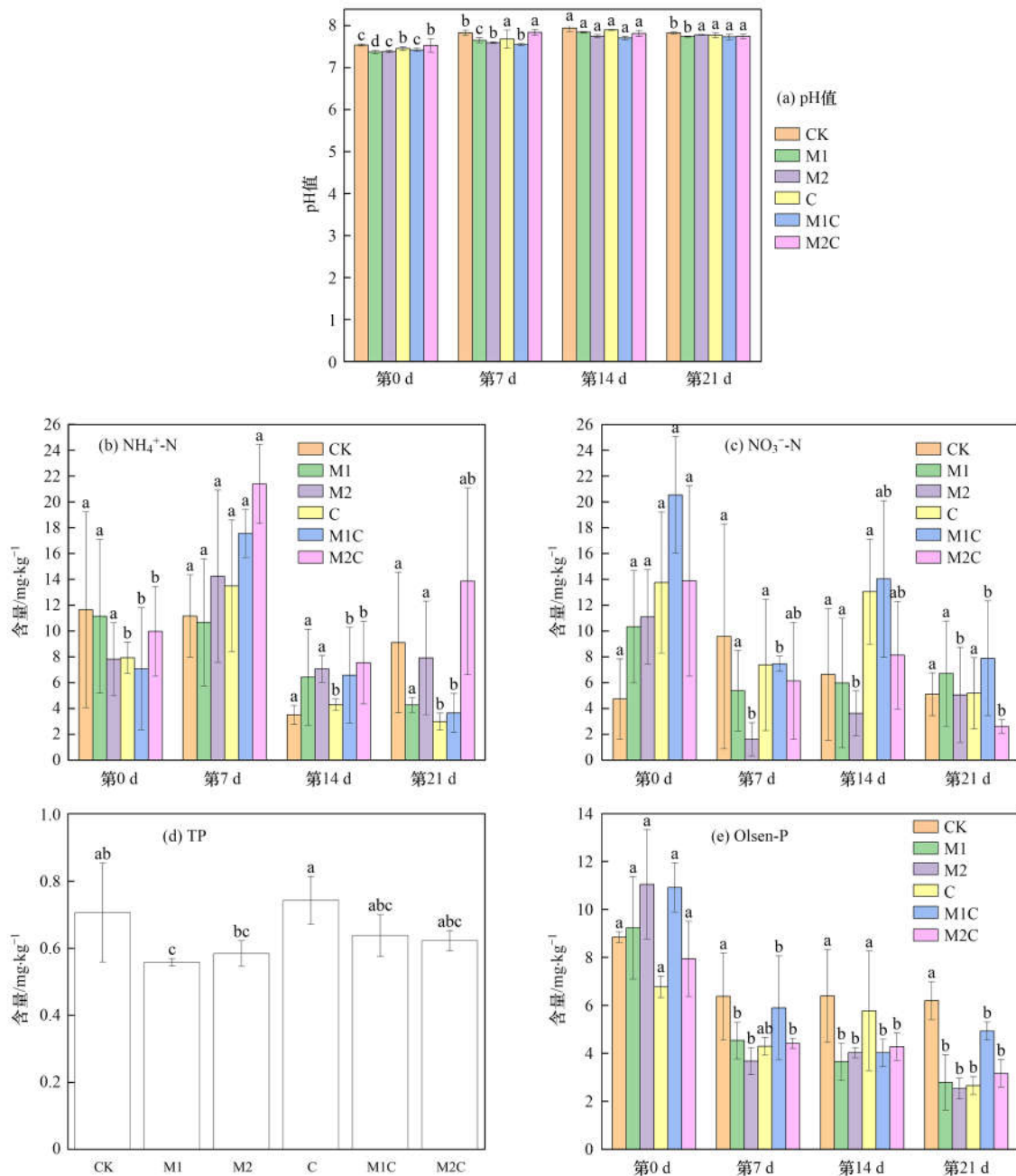
平均值呈先下降后上升然后再下降的趋势,在第0 d M1C 处理 NO_3^- -N含量平均值显著高于CK、C、M1、M2 和 M2C 处理,为 $20.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中在第0 d 和第14 d M1C 处理 NO_3^- -N含量平均值与 M2C 处理 NO_3^- -N含量平均值相比较分别增加了 47.98% 和 72.78%. 生物炭的添加提高了微塑料污染土壤的 TP 含量平均值[图 1(d)]. 与仅添加微塑料各处理(M1 和 M2)相比较,添加生物炭各处理(C、M1C 和 M2C)的 TP 含量平均值较高,其中 C 处理显著高于 CK、M1、M2、M1C 和 M2C 处理 $\omega(\text{TP})$ 平均值,为 $0.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. M1C 和 M2C 处理与 M1 和 M2 处理的

TP 含量平均值相比较分别增加了 12.5% 和 6.45%. 图 1(e) 显示第 0 ~ 21 d Olsen-P 含量平均值呈下降趋势,CK 处理未观察到统计学显著差异($P > 0.05$),其中 M1 和 M2 处理 Olsen-P 含量平均值分别下降了 69.88% 和 77.08%,M1C 和 M2C 处理分别下降了 54.81% 和 60.20%. 表明生物炭的添加能有效减缓微塑料污染土壤 Olsen-P 的降低.

2.2 生物炭对微塑料污染土壤细菌群落的影响

2.2.1 生物炭对微塑料污染土壤细菌多样性的影响

微塑料和生物炭混施显著影响了土壤细菌 α 多样性指数(Shannon 指数和丰富度). 图 2 显示了



不同小写字母表示不同处理间的差异显著水平($P < 0.05$)

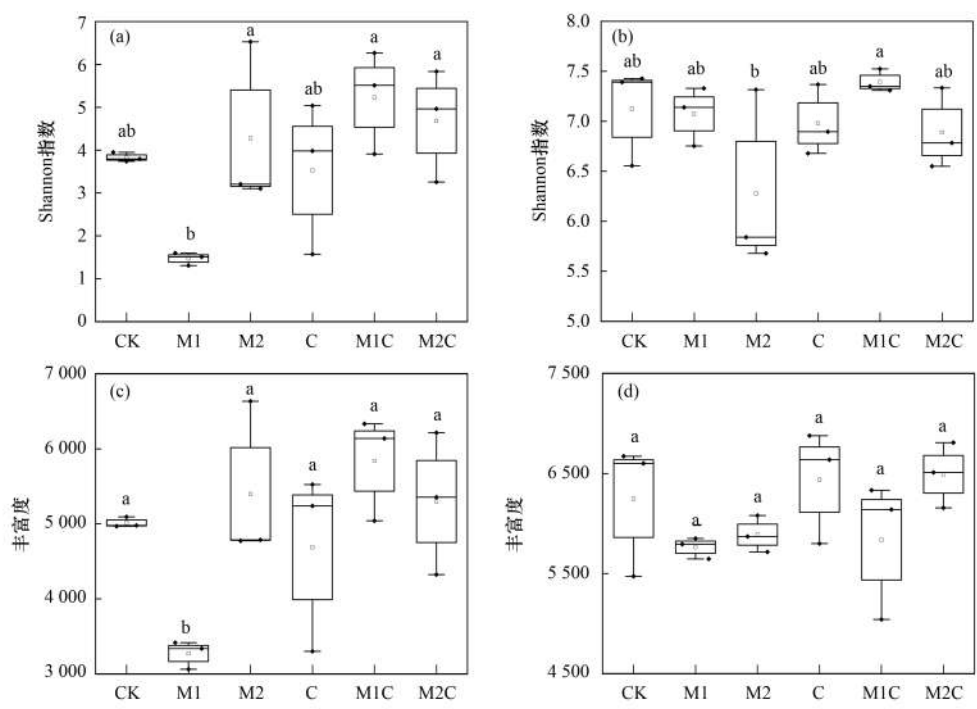
图 1 生物炭对微塑料污染对土壤理化性质的影响

Fig. 1 Effects of biochar on physicochemical properties of MPs-contaminated soil

与不加生物炭各处理(CK、M1、M2)土壤细菌丰富度和 Shannon 指数相比较,添加生物炭各处理(M1C、M2C、C)的土壤细菌丰富度和 Shannon 指数较高.

在本实验中,第 7 d M1 处理土壤细菌 Shannon 指数和丰富度显著低于 CK、C、M2、M1C 和 M2C 处理,第 21 d 各处理间无显著差异(图 2). 在整个培养期间,M1C 处理土壤细菌

Shannon 指数和丰富度与 M1 处理 Shannon 指数和丰富度相比较显著增加. 其中在第 7 d 和在第 21 d M1C 处理土壤细菌 Shannon 指数相对于 M1 处理分别增加了 255.78% 和 4.53%,M2C 处理和 M2 处理相比较分别增加了 9.35% 和 9.71% [图 2(a) 和 2(b)],M1 处理土壤细菌丰富度和 M1C 处理土壤细菌丰富度相比较分别降低了 42.03% 和 1.27% [图 2(c) 和 2(d)].



(a) 和 (c) 为第 7 d, (b) 和 (d) 为第 21 d; Shannon 指数越大,表示微生物群落多样性越高; 丰富度指数越大,表示菌群丰富度越高; 不同小写字母表示不同处理间的差异显著水平($P < 0.05$)

图 2 生物炭对微塑料土壤细菌多样性和丰富度的影响

Fig. 2 Effects of biochar on bacterial diversity and richness in MPs-contaminated soil

2.2.2 生物炭对微塑料污染土壤细菌群落多样性主坐标分析

对不同处理土壤微生物群落结构进行主坐标分析(PCoA). 结果表明,在第 7 d 细菌 β 多样性中[图

3(a)], PCoA 1 轴和 PCoA 2 轴的贡献率分别为 67.79% 和 9.12%,占 18 个变量总方差的 76.91%. 生物炭和微塑料混施处理(M1C 和 M2C)土壤和仅添加微塑料处理(M1 和 M2)土壤分组,说明生物炭

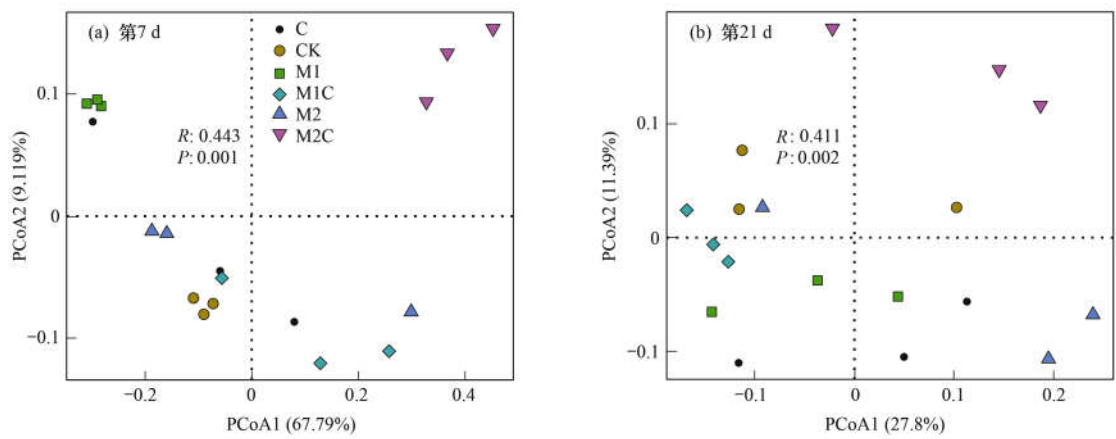


图 3 生物炭对微塑料污染土壤细菌群落多样性主坐标分析

Fig. 3 Principal coordinate analysis of biochar on MPs-contaminated soil microbial community diversity

的施用对微塑料污染土壤的细菌群落结构产生了影响 (ANOSIM, $R=0.433$, $P=0.001$).

在第 21 d 细菌 β 多样性中[图 3(b)], PCoA 1 轴和 PCoA 2 轴的贡献率分别为 27.80% 和 11.39%, 占 18 个变量总方差的 39.19%. 生物炭和微塑料混施处理 (M1C 和 M2C) 土壤和仅添加微塑料处理 (M1 和 M2) 土壤分组, 说明生物炭的施用对微塑料污染土壤的细菌群落结构产生了影响 (ANOSIM, $R=0.411$, $P=0.002$).

2.2.3 生物炭对微塑料污染土壤细菌群落组成的影响

生物炭对微塑料污染土壤细菌群落组成的影响与生物炭的施用有关 (图 4). 在所有处理中, 第 7 d 和第 21 d 土壤细菌群落组成相似, 都是以变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteriota) 和放线菌门 (Actinobacteriota) 为主. 与第 7 d 相比较第 21 d 各处理土壤中变形菌门 (Proteobacteria) 和厚壁菌门 (Firmicutes) 的相对丰度显著降低, 酸杆菌门 (Acidobacteriota)、放线菌门 (Actinobacteriota)、拟杆菌门 (Bacteroidota)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和粘菌门 (Myxococcota) 的相对丰度增加. 生物炭的添加增加了微塑料污染土壤溶杆菌属 (*Lysobacter*) 的相对丰度 (图 5), 其中在第 21 d M1C 处理土壤溶杆菌属 (*Lysobacter*) 的相对丰度显著高于 M1 处理土壤溶杆菌属 (*Lysobacter*) 的相对丰度.

图 4(a) 显示了第 7 d 各处理中相对丰度排名前 10 的细菌门, 占有所有细菌相对丰度的 94.72% ~

98.96%, 其余细菌门被归类为“其他分类 (others)”, 其中变形菌门 (Proteobacteria, 59.80% ~ 91.63%) 是所有处理的优势菌, 其次是酸杆菌门 (Acidobacteriota, 2.91% ~ 11.64%)、放线菌门 (Actinobacteriota, 1.90% ~ 8.87%)、厚壁菌门 (Firmicutes, 0.23% ~ 4.64%) 和绿弯菌门 (Chloroflexi, 0.46% ~ 2.11%). 在第 7 d M1 处理土壤酸杆菌门、放线菌门和厚壁菌门的相对丰度 (2.91%、1.90% 和 0.24%) 均低于 M1C 处理土壤 (11.64%、8.87% 和 4.64%), M2C 处理土壤酸杆菌门和放线菌门的相对丰度 (9.76% 和 7.68%) 均高于 M2 处理土壤酸杆菌门和放线菌门的相对丰度 (9.35% 和 6.33%).

图 4(b) 显示了第 21 d 各处理中相对丰度排名前 10 的细菌门, 占有所有细菌相对丰度的 90.93% ~ 94.75%, 其余细菌门被归类为“其他分类 (others)”, 其中变形菌门 (Proteobacteria, 37.87% ~ 52.39%) 和酸杆菌门 (Acidobacteriota, 17.47% ~ 24.55%) 是所有处理的优势菌, 其次是放线菌门 (Actinobacteriota, 8.79% ~ 11.88%)、拟杆菌门 (Bacteroidota, 3.79% ~ 5.09%) 和绿弯菌门 (Chloroflexi, 2.12% ~ 3.53%). 在第 21 d M1C 处理土壤中酸杆菌门、拟杆菌门和粘菌门的相对丰度 (24.55%、5.09% 和 3.05%) 均高于 M1 处理土壤 (21.13%、4.61% 和 2.67%), M2 处理土壤酸杆菌门和放线菌门的相对丰度 (17.47% 和 8.79%) 均低于 M2C 处理土壤酸杆菌门和放线菌门的相对丰度 (19.89% 和 11.88%).

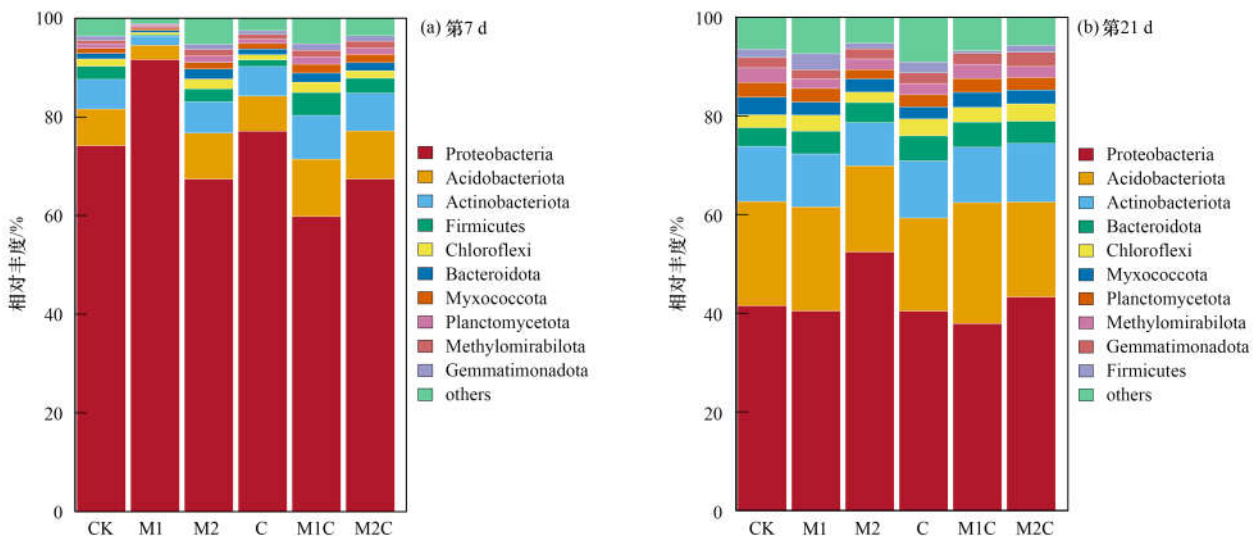


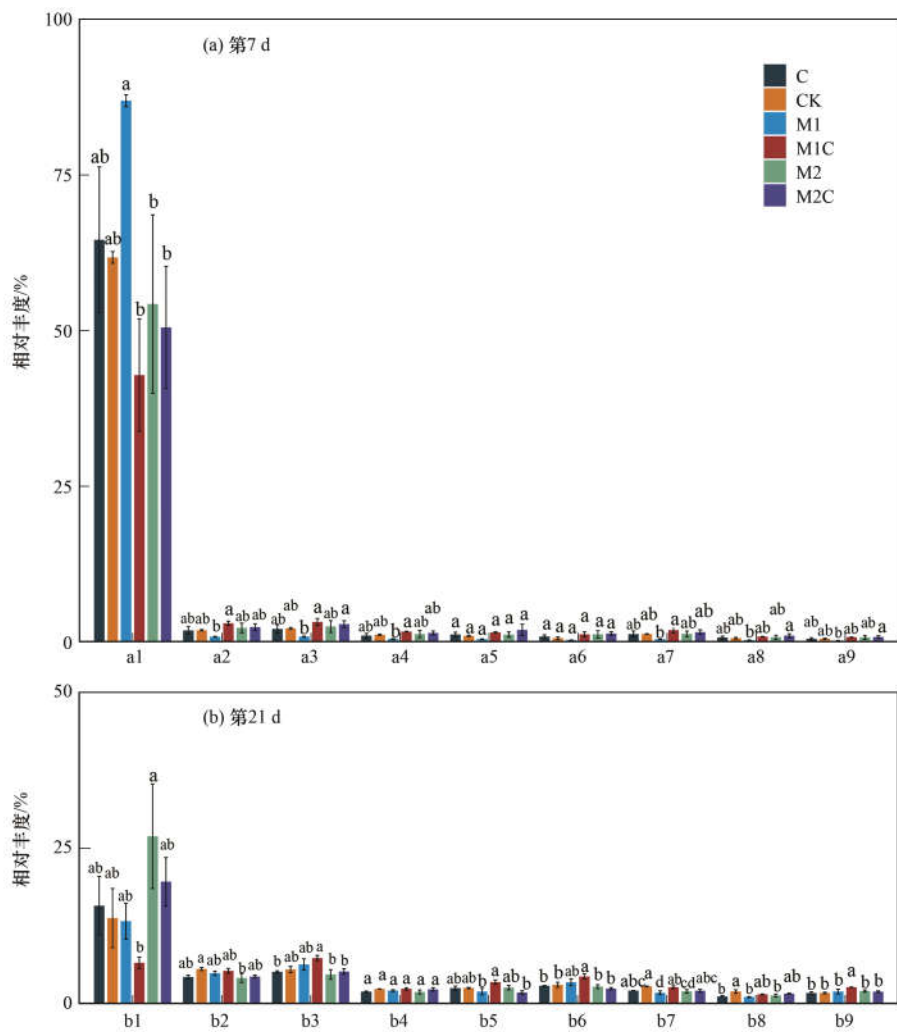
图 4 不同处理土壤细菌门水平相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of phyla under different soil treatments

2.3 影响微塑料污染土壤细菌群落的主要环境因子

以土壤细菌的 Shannon 指数、丰富度和群落结构 (主成分分析一轴) 与土壤理化性质进行相关性

分析 (图 6). 研究表明, 第 7 d 土壤细菌 Shannon 指数和 pH 值显著相关, 与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TP 和 Olsen-P 无显著相关关系 [图 6(a)]. 第 21 d 土壤细



a1. *γ*-Proteobacteria, a2. *Vicinamibacteriales*, a3. *Vicinamibacteraceae*, a4. SC-I-84, a5. *Lysobacter*, a6. *Rokubacteriales*, a7. *Gaiellales*, a8. *Comamonadaceae*, a9. RB41; b1. *γ*-Proteobacteria, b2. *Vicinamibacteriales*, b3. *Vicinamibacteraceae*, b4. SC-I-84, b5. *Lysobacter*, b6. *Rokubacteriales*, b7. *Gaiellales*, b8. *Xanthobacteraceae*, b9. *Comamonadaceae*; 不同小写字母表示不同处理间的差异显著水平 ($P < 0.05$)

图5 不同处理土壤细菌属水平相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of genera under different soil treatments

菌群落结构和丰富度与 TP 显著相关,与 pH 值、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 Olsen-P 无显著相关关系[图 6 (b)].表明生物炭的施用对微塑料污染土壤细菌群落的影响,其重点是通过改变微塑料污染土壤 pH 值和磷含量来表征的.

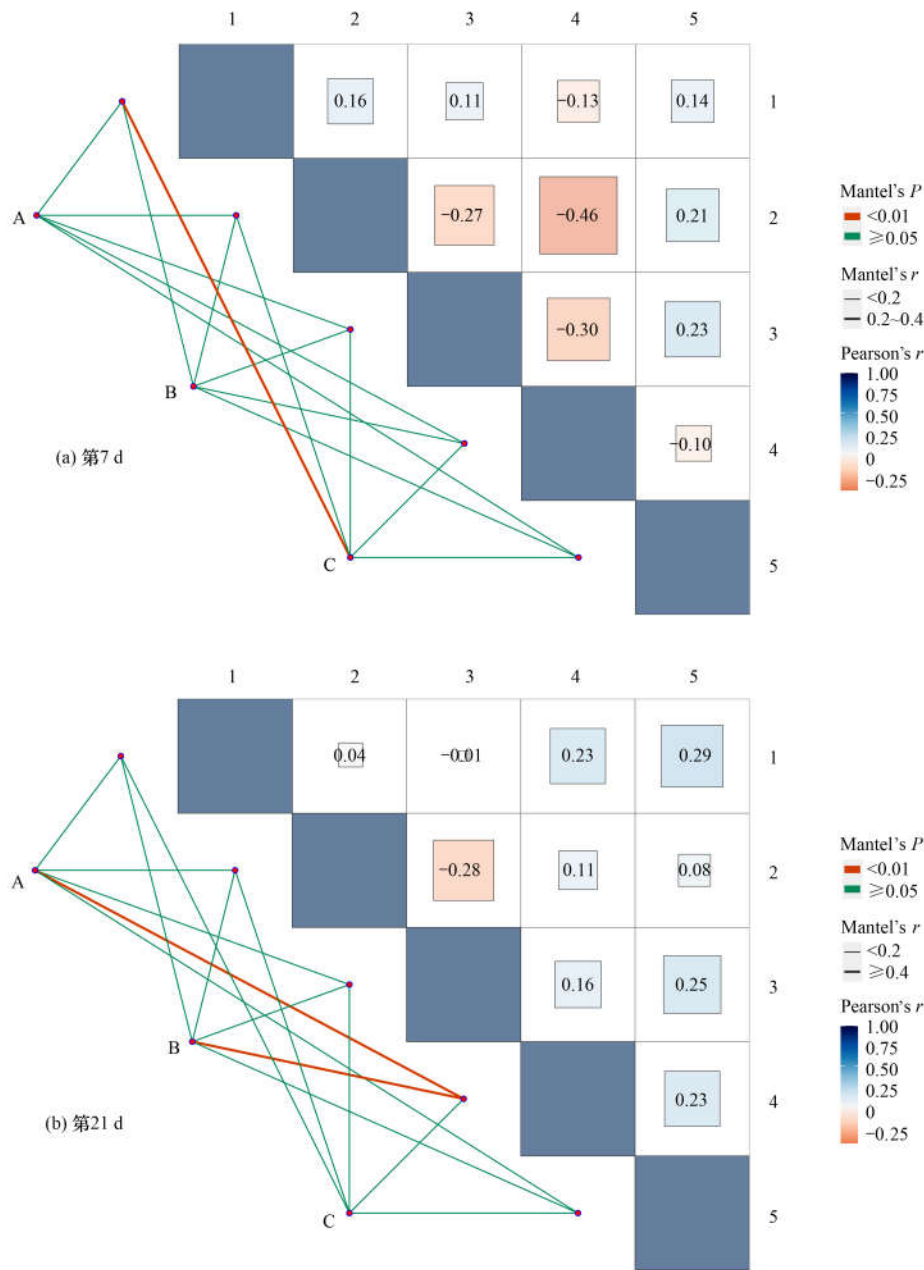
3 讨论

3.1 生物炭对微塑料污染土壤理化性质的影响

在培养实验结束时与土壤背景值 (pH = 7.51) 相比较,微塑料的添加 (M1 和 M2 处理) 使土壤 pH 值发生明显的变化,研究显示添加微塑料 (M1 和 M2 处理) 土壤 pH 值低于生物炭和微塑料混施 (M1C 和 M2C 处理) 土壤 pH 值[图 1(a)].生物炭的添加在一定程度上能够提高微塑料污染土壤的 pH 值,这与 Palansooriya 等^[36] 研究发现无论土壤水分状况如何,两种生物炭都会增加微塑料污染土壤

pH 值的研究结果相同.一般来说,在较高温度下产生的生物炭灰分和碱盐含量较高;因此,在土壤中施用生物炭会提高土壤 pH 值^[40].生物炭的碱性 pH 值影响土壤养分的生物有效性并提高植物生产力^[41].以上结果表明,生物炭可以作为微塑料污染土壤改良剂,改善微塑料污染土壤质量.

本研究发现,微塑料的添加 (M1 和 M2 处理) 降低了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量平均值,生物炭的施用对不同浓度微塑料污染土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化产生了影响.在整个培养期间生物炭和微量微塑料混施 (M1C 处理) 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量平均值高于仅添加微塑料 (M1 和 M2 处理) 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量平均值 [图 1(c)],这与先前研究发现微塑料浓度与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有显著正相关性,而与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有显著负相关性结论有差异^[22].这可能是由于生物炭能促进土壤氮素矿化作用和硝化作用, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为矿化作



A. 土壤细菌群落结构, B. 细菌丰富度, C. Shannon 指数, 1. pH 值, 2. $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 3. $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 4. TP, 5. Olsen-P

图 6 微塑料污染土壤细菌群落与土壤理化性质的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of MPs-contaminated soil microbial community and soil physicochemical properties

用产物,同时也是硝化作用的底物,氮含量的动态变化是多种作用累加的结果^[42]. 生物炭独特的表面特性使其对土壤水溶液中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有着较强的吸附作用,因此,通过减少土壤水溶液中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 溶解迁移,从而减缓土壤环境中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的降低^[43]. 以上结果表明,生物炭能够有效减缓微塑料污染土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 损失和同时增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,其中对低量微塑料污染土壤的作用更加明显,其原因可能是生物炭对无机氮吸持作用强于低量微塑料的吸持作用^[44],以及生物炭自身携带的氮营养元素的释放促进作用. 以上结果表明,生物炭的施用对有效减缓微

塑料污染土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 损失和增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有着巨大潜力.

仅添加微塑料(M1 和 M2 处理)降低了土壤 TP 含量平均值,导致土壤磷素养分的流失[图 1(d)],这与杨雪芹等^[45]研究发现土壤磷含量可能与塑料对磷的物理吸附作用有关,高分子聚合物对土壤磷有着物理吸附作用,从而导致土壤对磷的吸附作用减弱的结论一致. 生物炭的添加提高了微塑料污染土壤的 TP 含量平均值[图 1(d)],这一方面生物炭本身也含有大量高效的磷素养分可以直接提高土壤磷素有效性^[46],同时土壤 pH 的提高也可以促进土壤中固定磷的释放^[47]. CK 处理 Olsen-P 含量平均值

无显著变化,微塑料的添加降低了 Olsen-P 含量平均值,使得土壤 Olsen-P 素养分的损失[图 1(e)]. Yan 等^[26]研究发现添加 0.1% 和 1% 的聚氯乙烯微塑料都显著降低了土壤 Olsen-P 的含量,可能是由于微塑料对土壤磷的吸附和解吸过程中造成磷的损失^[45],而进一步导致 Olsen-P 的损失. 施用生物炭明显增加了土壤 pH 值,影响了土壤阳离子(如 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 的活性,并调节了磷的溶解度^[48]. 本研究发现 M1C 和 M2C 处理 Olsen-P 含量平均值下降量明显低于 M1 和 M2 处理,表明生物炭的添加能有效减缓微塑料污染土壤 Olsen-P 的降低,这可能是由于生物炭对磷素养分的吸持作用,生物炭产生的正电荷,可以吸持 SOM 不吸持的磷素养分^[49].

3.2 生物炭对微塑料污染土壤细菌群落的影响

微生物在土壤生态环境系统中有着最活跃的生物因子之称,对整个土壤生态环境系统的物质循环和能量流动有着重要的促进作用^[29]. 微生物是土壤生态环境系统中生物地球化学循环顺利进行的重要推动者,然而微塑料的介导会对土壤微生物群落产生影响,而改变生物地球化学循环,进一步影响整个土壤生态环境系统的功能和服务^[36]. 有研究发现,微生物活性的增强,能够推动土壤 C、N 和 P 等土壤养分元素的释放,促进土壤生态系统的物质循环和能量流动^[50]. 在土壤生态环境系统中的微塑料会改变土壤结构,影响土壤理化性质和土壤微生物活性. 进一步的研究发现,微塑料通过抑制微生物的生长和繁殖,破坏土壤生物多样性,对土壤微生物群落构成威胁^[51],最终影响土壤生态环境系统的整体稳定性.

通常,微生物群落多样性和丰富度指数越高,群落结构越复杂,稳定性越好^[52]. 本研究发现添加生物炭各处理(M1C、M2C 和 C)的土壤细菌丰富度和 Shannon 指数高于不加生物炭各处理(CK、M1 和 M2,图 2). 微塑料降低了土壤环境微生物群落多样性^[24],而生物炭的添加具有积极影响,提高土壤微生物丰富度或降低土壤微生物的损失^[41]. 生物炭灰分中含有较高碱盐^[36],本研究发现生物炭的施用是微塑料污染土壤的 pH 值变化的重要原因. Rousk 等^[53]研究显示 pH 值的改变会对土壤细菌丰富度和多样性造成影响,其中 pH 值在 4.5~8 之间,土壤细菌多样性和丰富度会随 pH 值的增加而增加. 因此,生物炭的施用是通过改变微塑料污染土壤 pH 值,从而间接影响微塑料污染土壤细菌群落. 表明生物炭的添加可以提高微塑料污染土壤细菌群落多样性和丰富度,增强微塑料污染土壤的稳定性,生物炭

在改善微塑料污染土壤方面有着巨大潜力.

进入土壤生态环境系统的微塑料通过影响土壤理化性质^[54],改变土壤微生物的生存环境,从而加剧土壤微生物群落结构的分化演替差异^[55]. 微塑料的添加对土壤细菌群落组成造成影响,这与 Ren 等^[56]通过 30 d 微宇宙培养实验报道聚乙烯微塑料的添加使得土壤中的放线菌取代变形菌而成为土壤中优势微生物的研究结果一致. Wang 等^[28]研究表明微塑料对土壤微生物群落的影响,时间越久影响越明显,由于微塑料在一定程度上会稀释土壤 SOM,土壤 SOM 含量的减少,会加剧土壤微生物物种间对底物的竞争,改变其生态位,从而加剧了土壤微生物群落结构的分化演替差异,同时还打乱了土壤微生物群落组成. 本研究中生物炭的施用对微塑料污染土壤细菌群落组成的影响有关(图 4). 土壤细菌群落组成是以变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、放线菌门(Actinobacteriota)、厚壁菌门(Firmicutes)和拟杆菌门(Bacteroidota)为主,这与 Palansooriya 等^[36]研究发现厚壁菌门、变形菌门和放线菌门等是土壤细菌群落组成的优势菌的结果一致. Zhang 等^[52]利用扫描电子显微镜(SEM)和高通量测序技术对采集自中国新疆棉田的微塑料进行了分析,发现变形菌门和放线菌门可降解农田地膜,称两种菌门为塑料相关细菌,他还发现酸杆菌存活在超过 30 a 塑料污染土壤中,拟杆菌门也是一门微塑料污染耐受菌门. 变形菌门中的溶杆菌属对多种植物病原真菌和革兰氏阳性细菌有显著的拮抗作用^[57]. 厚壁菌有很好的环境适应能力,能在恶劣的自然生态环境中存活^[58],变形菌门是细菌中最大的一门,该菌门的存活能力极强,对生存条件要求低^[59]. 生物炭的施用改变了微塑料污染土壤细菌群落组成(图 4). 本研究结果清楚地表明,生物炭的施用能够增加微塑料污染土壤厚壁菌门、放线菌门、酸杆菌门、变形菌门和拟杆菌门等微塑料污染耐受菌门相对丰度,改变微塑料污染土壤细菌群落,减缓微塑料对土壤细菌群落结构的威胁和分化演替差异. 本研究发现生物炭的添加增加了微塑料污染土壤溶杆菌属(*Lysobacter*)的相对丰度(图 5),溶杆菌属能够提高微塑料污染土壤对植物病原真菌和革兰氏阳性细菌的拮抗作用,抑制病原菌的生长和入侵,减少微塑料污染土壤的发病率,增强微塑料污染土壤稳定性. 表明生物炭的施用能够减缓微塑料对土壤细菌群落结构的威胁、分化演替差异和微塑料污染土壤的发病率,提高微塑料污染土壤稳定性.

4 结论

(1)生物炭对低量微塑料污染土壤理化性质和细菌群落有显著的影响.生物炭的施用提高了微塑料污染土壤 pH 值,增加微塑料污染土壤酸杆菌门、放线菌门和拟杆菌门等微塑料耐受菌门相对丰度,还增加了溶杆菌属的相对丰度,减缓了微塑料对土壤细菌群落结构的威胁,降低了微塑料对土壤的污染.

(2)微塑料污染土壤细菌群落结构和组成的变化与土壤 pH 和 TP 显著相关,生物炭的施用对微塑料污染土壤的影响机制,应重点关注土壤 pH 值和磷含量的变化.

(3)本研究结果有助于深入了解生物炭施用对微塑料污染土壤理化性质和微生物特性的变化,为微塑料污染土壤防治提供一定的科学参考依据,也有助于更好地了解土壤生态环境系统的整体变化.

参考文献:

- [1] 张佳佳, 陈延华, 王学霞, 等. 土壤环境中微塑料的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 937-952.
Zhang J J, Chen Y H, Wang X X, *et al.* A review of microplastics in the soil environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 937-952.
- [2] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. Science, 2015, 347(6223): 768-771.
- [3] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, *et al.* Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment[J]. Environmental Pollution, 2020, 260, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114096.
- [4] Mal L, Sun X F, Xia L L, *et al.* Global riverine plastic outflows[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(16): 10049-10056.
- [5] 马占峰, 牛国强, 芦珊. 中国塑料加工业(2021)[J]. 中国塑料, 2022, 36(6): 142-148.
Ma Z F, Niu G Q, Lu S. China plastics industry (2021)[J]. China Plastics, 2022, 36(6): 142-148.
- [6] 张浩, 孙洁, 杨慧颖, 等. 高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2955-2964.
Zhang H, Sun J, Yang H Y, *et al.* Effects of microplastics high-density polyethylene on cotton growth, occurrence of fusarium wilt and rhizosphere soil bacterial community[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2955-2964.
- [7] 熊飞, 黄庆辰, 何玉虹, 等. 微塑料污染现状及其毒性效应和机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(5): 211-220.
Xiong F, Huang Q C, He Y H, *et al.* Research progress on current status of microplastics pollution and its toxic effects and mechanisms[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(5): 211-220.
- [8] Alimi O S, Farmer Budarz J, Hernandez L M, *et al.* Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 1704-1724.
- [9] 涂晨, 田媛, 刘颖, 等. 大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1821-1828.
Tu C, Tian Y, Liu Y, *et al.* Occurrence of atmospheric (Micro) plastics and the characteristics of the plastic associated biofilms in the coastal zone of Dalian in summer and autumn [J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1821-1828.
- [10] 冯三三, 卢宏伟, 姚天次, 等. 青藏高原典型区微塑料分布特征及来源分析[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2130-2141.
Feng S S, Lu H W, Yao T C, *et al.* Distribution and source analysis of microplastics in typical areas of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(9): 2130-2141.
- [11] 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧娟, 等. 汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3894-3903.
Zhu Y E, Weng H X, Li T H X, *et al.* Distribution and sources of microplastics in farmland soil along the Fenhe River [J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3894-3903.
- [12] Bergmann M, Wirzberger V, Krumpfen T, *et al.* High quantities of microplastic in arctic deep-sea sediments from the hausgarten observatory[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(19): 11000-11010.
- [13] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(20): 10777-10779.
- [14] Chen Y L, Leng Y F, Liu X N, *et al.* Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China [J]. Environmental Pollution, 2020, 257, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113449.
- [15] Liu M T, Lu S B, Song Y, *et al.* Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 855-862.
- [16] 薄录吉, 李冰, 张凯, 等. 农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2375-2383.
Bo L J, Li B, Zhang K, *et al.* Distribution, sources and behavioral characteristics of microplastics in farmland soil [J]. Environmental Science, 2023, 44(4): 2375-2383.
- [17] Qi R M, Jones D L, Li Z, *et al.* Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review [J]. Science of the Total Environment, 2020, 703, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134722.
- [18] Prata J C, da Costa J P, Lopes I, *et al.* Environmental exposure to microplastics: an overview on possible human health effects [J]. Science of the Total Environment, 2020, 702, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134455.
- [19] Xu B L, Liu F, Cryder Z, *et al.* Microplastics in the soil environment: occurrence, risks, interactions and fate-A review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020, 50(21): 2175-2222.
- [20] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4661-4667.
Liao Y C, Nazygul · Jahitbek, Li M, *et al.* Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4661-4667.
- [21] 冯雪莹, 孙玉焕, 张书武, 等. 微塑料对土壤-植物系统的生态效应[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 299-313.
Feng X Y, Sun Y H, Zhang S W, *et al.* Ecological effects of

- microplastics on soil-plant systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(2): 299-313.
- [22] 吾兰·恩特马克. 外源添加微塑料对土壤性质和玉米生长的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- Entemake W. Study on the effect of adding microplastics on soil properties and corn growth [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [23] 纪红, 陈修文, 赵宏利, 等. 微塑料对高等植物生长发育影响研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2021, **21**(18): 7415-7424.
- Ji H, Chen X W, Zhao H L, *et al.* Research advances of the influence of microplastics on the growth and development of higher plants[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, **21**(18): 7415-7424.
- [24] de Souza Machado A A, Lau C W, Till J, *et al.* Impacts of microplastics on the soil biophysical environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(17): 9656-9665.
- [25] 樊有国, 罗学刚. 环境降解聚乙烯地膜残余组分对土壤酶活性的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(6): 1-6.
- Fan Y G, Luo X G. Effects of the residues of mulching films of environmental degradable polyethylene on soil enzyme activities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(6): 1-6.
- [26] Yan Y Y, Chen Z H, Zhu F X, *et al.* Effect of polyvinyl chloride microplastics on bacterial community and nutrient status in two agricultural soils [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, **107**(4): 602-609.
- [27] Qi Y L, Ossowski A, Yang X M, *et al.* Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **387**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121711.
- [28] Wang J, Huang M K, Wang Q, *et al.* LDPE microplastics significantly alter the temporal turnover of soil microbial communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **726**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138682.
- [29] 胡晓婧, 刘俊杰, 王浩, 等. 微塑料污染对土壤环境质量和微生物生态学特性的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2021, **52**(6): 1479-1485.
- Hu X J, Liu J J, Wang H, *et al.* Impacts of microplastics on soil environmental quality and microbial ecological characteristics: a review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(6): 1479-1485.
- [30] Li L Z, Luo Y M, Li R J, *et al.* Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode[J]. *Nature Sustainability*, 2020, **3**(11): 929-937.
- [31] Rillig M C, Leifheit E, Lehmann J. Microplastic effects on carbon cycling processes in soils [J]. *PLoS Biology*, 2021, **19**(3), doi: 10.1371/journal.pbio.3001130.
- [32] Chen C H, Lehmann J, Thies J E, *et al.* Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, **37**(11): 1477-1488.
- [33] Liang B Q, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Stability of biomass-derived black carbon in soils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(24): 6069-6078.
- [34] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (Biochar) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(4): 1247-1253.
- [35] Jaiswal A K, Elad Y, Paudel I, *et al.* Linking the belowground microbial composition, diversity and activity to soilborne disease suppression and growth promotion of tomato amended with biochar [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/srep44382.
- [36] Palansooriya K N, Sang M K, Igalavithana A D, *et al.* Biochar alters chemical and microbial properties of microplastic-contaminated soil [J]. *Environmental Research*, 2022, **209**, doi: 10.1016/j.envres.2022.112807.
- [37] 许学慧, 胡海娜, 陈颖. 聚乙烯微塑料对大豆生长的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021, (6): 262-268.
- Xu X H, Hu H N, Chen Y. Study on the effect of polyethylene microplastics on soybean growth [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021, (6): 262-268.
- [38] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [39] 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 等. 长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4745-4754.
- Hu Z E, Xiao M L, Ding J N, *et al.* Response characteristics of soil microbial community under long-term film mulching [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4745-4754.
- [40] Al-Wabel M I, Hussain Q, Usman A R A, *et al.* Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: a review [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, **29**(7): 2124-2161.
- [41] Anderson C R, Condon L M, Clough T J, *et al.* Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus [J]. *Pedobiologia*, 2011, **54**(5-6): 309-320.
- [42] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, *et al.* Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **55**: 20-27.
- [43] Lehmann J, da Silva J P Jr, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, **249**(2): 343-357.
- [44] Li X N, Jiang X, Song Y, *et al.* Coexistence of polyethylene microplastics and biochar increases ammonium sorption in an aqueous solution [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **405**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124260.
- [45] 杨雪芹, 胡田田, 王旭东, 等. 聚丙烯酰胺对磷素在土壤中吸附-解吸的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(1): 87-90.
- Yang X Q, Hu T T, Wang X D, *et al.* Effect on PAM on phosphorus adsorption and desorption in Lou soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(1): 87-90.
- [46] 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1914-1920.
- Yang C D, Zong Y T, Lu S G. Dynamic effects of different biochars on soil properties and crop yield of acid farmland [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1914-1920.
- [47] Song D L, Tang J W, Xi X Y, *et al.* Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018, **84**: 1-10.
- [48] Peng Y T, Sun Y Q, Fan B Q, *et al.* Fe/Al (hydr) oxides engineered biochar for reducing phosphorus leaching from a fertile calcareous soil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123877.
- [49] Lehmann J. Bio-energy in the black [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, **5**(7): 381-387.
- [50] Lwanga E H, Thap B, Yang X M, *et al.* Decay of low-density

- polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: a potential for soil restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 753-757.
- [51] Dazy M, Béraud E, Cotellet S, *et al.* Changes in plant communities along soil pollution gradients: responses of leaf antioxidant enzyme activities and phytochelatin contents [J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(3): 376-383.
- [52] Zhang M J, Zhao Y R, Qin X, *et al.* Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 470-478.
- [53] Rousk J, Brookes P C, Bååth E, *et al.* Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(6): 1589-1596.
- [54] Wang F L, Wang X X, Song N N. Polyethylene microplastics increase cadmium uptake in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by altering the soil microenvironment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **784**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147133.
- [55] 丁峰, 赖金龙, 季晓晖, 等. 聚乙烯微塑料对玉米根际土壤微生物群落结构的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, **29**(6): 970-978.
- Ding F, Lai J L, Ji X H, *et al.* Effects of polyethylene microplastics on the microbial community structure of maize rhizosphere soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(6): 970-978.
- [56] Ren X W, Tang J C, Liu X M, *et al.* Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113347.
- [57] Hayward A C, Fegan N, Fegan M, *et al.* *Stenotrophomonas* and *Lysobacter*: ubiquitous plant-associated *gamma*-proteobacteria of developing significance in applied microbiology [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, **108**(3): 756-770.
- [58] de Souza L C, Procópio L. The profile of the soil microbiota in the Cerrado is influenced by land use[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2021, **105**(11): 4791-4803.
- [59] Rampelotto P H, de Siqueira Ferreira A, Barboza A D M, *et al.* Changes in diversity, abundance, and structure of soil bacterial communities in Brazilian Savanna under different land use systems[J]. *Microbial Ecology*, 2013, **66**(3): 593-607.



CONTENTS

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