

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估	姜殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃疏铁矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍彦, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

微塑料和菲对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响

刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格*

(肇庆学院环境与化学工程学院, 广东省环境健康与资源利用重点实验室, 肇庆 526061)

摘要: 微塑料和多环芳烃(PAHs)因在土壤环境中广泛存在及其潜在生态风险而受到越来越多的关注。然而,关于微塑料-PAHs复合污染对土壤生态系统的影响鲜有报道。选用聚乙烯(PE)/聚丙烯(PP)和菲(PHE)作为微塑料和PAHs的代表,进行为期300 d的微宇宙培养实验,利用土壤农业化学分析方法和16S扩增子测序技术研究PE/PP和PHE的单一和复合污染对土壤化学特性、酶活性和微生物群落(数量、结构、功能)的影响,分析PE/PP和PHE存在下土壤性质、酶活性和菌群的互作关系。结果表明,PE/PP和PHE的单一和复合污染对土壤pH值、有效磷(AP)和微生物(细菌、放线菌、霉菌)数量没有产生明显影响,但显著提高了荧光素二乙酸酯酶(FDase)活性;PE、PP、PHE-PE和PHE-PP的添加显著增加了土壤有机质(SOM)含量和脲酶活性,PHE、PHE-PE和PHE-PP显著增强了脱氢酶和磷酸酶活性及速效氮(AN)含量;PHE的添加对微生物群落影响不大,PE、PP、PHE-PE和PHE-PP对群落产生了一定的影响。PE/PP和PHE能够促进微生物产生能量、生长和繁殖,加快污染物的代谢/降解和细胞膜转运等功能。PE/PP和PHE引起的AN和SOM变化是影响土壤酶活性的关键因子,AN、AP和pH的改变是微生物数量增加的主要原因;微生物群落结构的改变与土壤化学性质、酶活性具有一定的相关性,其中SOM对菌群的影响达到了显著水平,土壤中不同碳源(PE/PP和PHE)的存在及菌与菌之间的互作关系也会影响微生物群落的组成。综上,PE/PP和PHE通过改变土壤化学性质、酶活性和微生物群落及其互作过程来促进菌群适应污染物胁迫。

关键词: 微塑料; 菲(PHE); 土壤性质; 酶活性; 微生物群落

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0496-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202302197

Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities

LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge*

(Guangdong Key Laboratory of Environmental Health and Land Resource, School of Environmental and Chemical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

Abstract: Microplastic and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) pollution have received increasing attention due to their ubiquitous distribution and potential risks in soils. However, the effects of microplastics-PAHs combined pollution on soil ecosystems remain unclear. Polyethylene (PE)/polypropylene (PP) and phenanthrene (PHE) were selected as the representatives of microplastics and PAHs, respectively. A 300-day soil microcosm experiment was conducted to study the single and combined effects of PE/PP and PHE on soil chemical properties, enzymatic activities, and bacterial communities (i. e., quantity, composition, and function), using the soil agricultural chemical analysis method and 16S amplicon sequencing technology. The interactions of soil properties, enzyme activities, and flora in the presence of PE/PP and PHE were analyzed. The results showed that the addition of PE/PP and PHE slightly changed the pH, available phosphorus (AP), and microbial quantity (i. e., bacteria, actinomycetes, and mold) but considerably increased the fluorescein diacetate hydrolase (FDase) activity. There was a significant enhancement of soil organic matter (SOM) and urease activity in PE, PP, PHE-PE, and PHE-PP amended systems. PHE, PHE-PE, and PHE-PP obviously increased the dehydrogenase/neutral phosphatase activities and available nitrogen (AN) content. PHE had little effect on the microbial community. The PE, PP, PHE-PE, and PHE-PP addition influenced the microbial community to some extent. PE/PP and PHE showed positive effects on the energy production, growth, and reproduction of soil microorganisms and then accelerated the metabolism/degradation of pollutants and membrane transport. The changes in AN and SOM induced by PE/PP and PHE were the key factors affecting soil enzyme activities. Alterations in AN, AP, and pH were mainly responsible for the increase in microbial population. The changes in the microbial community were related to soil chemical properties and enzyme activities, and SOM had a significant effect on the microbial community. The presence of different carbon sources (PE/PP and PHE) in the soil and the microbial interaction also affected the microbiota. In conclusion, the addition of single or combined pollutants of PE/PP and PHE influenced the soil chemical properties, enzymatic activities, bacterial communities, and their interaction processes, thus facilitating the adaptation of the microbial community to pollutant stress.

Key words: microplastics; phenanthrene(PHE); soil properties; enzymatic activity; microbial community

塑料及其制品具有价格低、质轻和耐腐蚀等优点而被应用于工业、农业生产和日常生活中,导致大量的废旧塑料进入环境中。土壤中的农用塑料薄膜和农药、化肥废弃包装等经过长期的物理风化、磨损、紫外线照射、高温、生物和人为作用,逐渐磨损和破裂形成粒径更小的碎片和颗粒,当尺寸小于5 mm时称为微塑料。有机肥、污泥的施用、农业灌

收稿日期: 2023-02-23; 修订日期: 2023-04-08

基金项目: 肇庆学院优秀青年教师科研能力提升计划项目(YQ202105); 广东省普通高校重点领域专项(科技服务乡村振兴)(2021ZDZX4023); 国家自然科学基金项目(42007317); 肇庆市科技创新指导类项目(2022040302005)

作者简介: 刘沙沙(1986~),女,博士,讲师,主要研究方向为微塑料-多环芳烃复合污染的生态效应, E-mail: 2657222877@qq.com

* 通信作者, E-mail: 316533880@qq.com

溉和大气沉降等也会导致微塑料进入到土壤中^[1,2]。据报道,固原市农田土壤(耕作层)微塑料丰度为186.32~1 286.24个·kg⁻¹,农膜的使用是该地区微塑料的主要潜在来源^[3],云南滇池南部农田表层土壤中微塑料的丰度范围为13 020~28 100个·kg⁻¹^[4]。此外,随着工业化进程的加快,化石燃料的消耗量不断增加,导致环境中的PAHs污染日趋严重。单德鑫等^[5]研究发现东营市农田土壤中 ω (PAHs)为36.08 mg·kg⁻¹,其中菲(phenanthrene, PHE)含量高达12.60 mg·kg⁻¹。农用地作为农业生产的主体,是人类生存和发展的重要基础。因此,农用地中的微塑料和PAHs污染问题应引起足够重视。

PAHs可长期存在于土壤环境中,具有致畸、致癌和致突变效应。微塑料的性质稳定且具有较大的比表面积和强疏水性,通过吸附/解吸与共存的PAHs发生相互作用,进而影响PAHs的生物有效性及毒性效应。微生物是土壤生态系统中物质循环和能量流动的关键驱动者,在维持/恢复土壤功能、调控土壤养分和改善土壤结构等方面起到重要作用。PAHs污染后的土壤微生物数量会发生变化^[6];高浓度的PAHs会抑制微生物活性和生长^[7];PAHs对土壤中细菌群落的结构和功能具有显著的影响^[8],微生物具有适应性进化的遗传机制,形成可以降解PAHs的优势菌群^[9]。微塑料的存在影响了水稻土中微生物群落的组成、多样性和丰富度,抑制了氮循环过程^[10],改变了土壤pH、有机碳/氮/磷含量和酶活性^[11]。微塑料通过降低土壤碳、氮含量而降低了土壤肥力^[12],还会释放化学添加剂来抑制微生物的生长^[13],从而引起土壤微生物群落多样性的变化。由此可见,微塑料或PAHs会对土壤生态系统产生一定的影响,但目前关于微塑料-PAHs复合污染对土壤特性和微生物群落的长期影响尚不清楚。

鉴于微塑料与PAHs在土壤中长期共存的现状,本研究选用PHE作为目标PAHs,以聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)作为微塑料的代表,通过室内土壤培养实验,系统地研究微塑料(PE、PP)和PHE的单一及复合污染对土壤化学性质、酶活性、微生物数量和群落结构/功能的影响,探讨PE/PP和PHE共存下土壤性质、酶活性和菌群的互作关系,以期为农用地土壤中微塑料-PAHs复合污染的生态风险评估及其微生物修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 室内土壤培养实验

土壤样品来源于广东省肇庆市高要区的农用地,采用S形布点法采集土样,采样深度为0~20 cm,

混合均匀后运回实验室,自然风干,去除较大的石块、残根和凋落物等,过2 mm筛混匀,备用。将PHE溶解于丙酮中,然后加入到土壤中,待丙酮挥发后,分别加入PE和PP微塑料,充分混匀,装入玻璃烧杯中,具体分组如下:①CK,土壤中不加入PE/PP和PHE;②PHE,土壤中 ω (PHE)为50 mg·kg⁻¹;③PP,土壤中添加5%(质量分数)PP;④PE,土壤中添加5%(质量分数)PE;⑤PHE-PP,土壤中 ω (PHE)为50 mg·kg⁻¹,添加5%(质量分数)PP;⑥PHE-PE,土壤中 ω (PHE)为50 mg·kg⁻¹,添加5%(质量分数)PE。每个处理设置3个平行。在恒温恒湿培养箱中培养300 d后取样,进行土壤性质、酶活性和微生物高通量测序分析。

1.2 土壤化学性质分析

采用电位法(水土比2.5:1)测定土壤pH,AN的测定采用碱解扩散法,AP利用浸提-钼锑抗比色法进行分析,SOM的测定采用水合热重铬酸钾氧化-比色法^[14,15]。

1.3 土壤酶活性测定

土壤酶活性参照Yi等^[16]和关松荫^[17]的方法进行分析。脲酶活性通过次氯酸钠-苯酚钠比色法测定,以24 h后1 g土壤中NH₄⁺-N的质量(mg)表示;采用磷酸苯二钠比色法测定土壤中酸性磷酸酶活性,以24 h后1 g土壤中释出的酚的质量(mg)表示;利用荧光素二乙酸比色法测定FDAse活性,以20 min后1 g土壤中荧光素质量(μ g)表示;脱氢酶活性通过2,3,5-三苯基四唑氯化物(TTC)还原比色法测定,以1 g土壤中H⁺的产量(μ L)表示。

1.4 土壤微生物数量测定

土壤中微生物数量利用稀释平板法测定,细菌采用营养肉汤琼脂固体培养基(NB),放线菌采用改良高氏1号琼脂培养基(GA),霉菌采用马铃薯-蔗糖琼脂培养基(PSA)。将5 g土壤和50 mL无菌水加入到三角瓶中,放入摇床振荡10 min,使土壤均匀分散在无菌水中,吸取1 mL土壤悬液到9 mL无菌水中,依次按10倍法进行稀释,用无菌移液枪吸取稀释液于装有NB、GA和PSA的培养皿内,用涂布棒涂抹均匀。将培养皿放入恒温培养箱中,30℃条件下培养3~5 d,待菌落完全长出后进行计数。

1.5 土壤微生物群落的宏基因组测序

称取土壤样品200 mg,放入灭菌离心管中,加入70%乙醇1 mL后充分混匀,10 000 r·min⁻¹,离心3 min,倒掉上清液,加入PBS溶液,混匀后离心,弃上清液,将离心管倒置于吸水纸上至没有液体流出,放入烘箱中(55℃)使残留乙醇完全挥发。采用磁珠法提取土壤DNA,利用裂解液和蛋白酶进行裂解消化,经

结合液和磁珠吸附纯净 DNA, 加入清洗液和洗脱液进行洗涤和洗脱后回收 DNA, 1% 琼脂糖凝胶检测 DNA 完整性, Qubit 定量检测 DNA 样本浓度. 利用超声波将 DNA 片段化, DNA 片段经末端修复-连接接头-磁珠分选纯化连接产物-文库扩增-文库纯化, 通过检测文库大小、浓度和长度分布进行质控. 采用 Illumina HiSeq 平台进行高通量测序, 对原始数据进行质量评估和过滤处理, 获得有效数据, 拼接组装优质 reads, 根据 reads 间的 overlap 关系获得 contigs, 使用 Prodigal 软件对拼接的 contigs 进行 ORF 预测, 根据 NCBI 的微生物分类学信息数据库, 获得基因的物种分类注释信息, 在各个分类学水平上统计物种的相对丰度. 通过 Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (KEGG) 数据库进行代谢通路分析, 基于 Superior Evolutionary Element Destined-factor (SEED) 数据库对土壤微生物群落的生物学功能进行分析.

1.6 数据处理

采用 Origin 2019b 对数据进行处理和绘制图片, 利用 SPSS 22.0 软件进行相关性分析和显著性检验, 冗余分析 (RDA) 和主成分分析 (PCA) 通过 Canoco 5.0 软件完成, 选取优势物种或功能信息进行双侧检验, 使用 R 语言的 igraph 包绘制网络关系图.

2 结果与讨论

2.1 微塑料和 PHE 对土壤化学性质的影响

从表 1 中可以看出, PHE 的添加提高了土壤 pH 值, PE、PP、PHE-PE 和 PHE-PP 降低了土壤 pH, 但均未达到显著水平 ($P > 0.05$). Liu 等^[18] 的研究也发现 PE 未对农田土壤的 pH 产生影响. 但也有研究指出 PE 和 PP 的添加会促使土壤 pH 值的升高^[19,20], 可能是由于微塑料增强了土壤的通气性和孔隙度. Boots 等^[21] 的研究发现 PE 可能会释放添加剂进入到土壤中, 降低了 pH 值. 可能因为在这些研究中微塑料的形状、粒径、添加浓度和暴露时间不同. PHE 添加到土壤中会导致 pH 值升高, 这与 PHE 在长期的降解过程中, 产生的一些碱性代谢产物有一定的关系^[22,23]. 在本研究中, 与 CK 相比, PHE 轻微增加了土壤 pH 值, 推测土壤中微生物对 PHE 有一定的降解作用, 后文 2.4.1 节的结果也证实了土壤中存在 *Sphingomonas*

和 *Pseudomonas* 等可以降解 PHE 的菌种. 但 PE 和 PP 可能会释放添加剂, 对 PHE 降解的碱性代谢产物起到了中和作用, 因此 PHE-PE 和 PHE-PP 轻微降低了土壤 pH. 此外, Wang 等^[24] 指出土壤 pH 值与 *Acidobacteria* 的相对丰度呈负相关, 从图 1 中可以看出, 与 CK 相比, PE、PP、PHE、PHE-PE 和 PHE-PP 的添加对 *Acidobacteria* 的相对丰度基本没有影响, 这与 pH 值的变化规律一致.

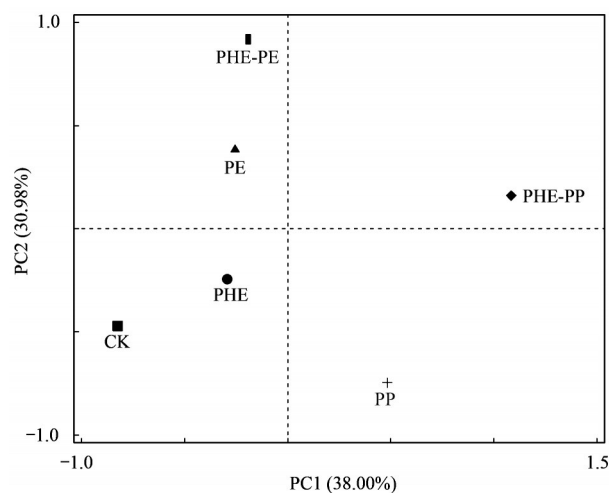


图1 土壤中属水平微生物的主成分分析

Fig. 1 PCA of microbial community in soil at genus level

PE/PP 和 PHE 的单一或复合污染增加了土壤 SOM 的含量, 尤其是 PE、PP、PHE-PE 和 PHE-PP 处理组, 达到显著水平 ($P < 0.05$). PHE 的有机碳含量较高, PE 和 PP 本身也含有一定的碳, 能够促进土壤有机碳的积累. PP 的碳原子个数要多于 PE, 因此添加 PP 后 SOM 的含量要高于 PE. PHE 还可以作为微生物生长的碳源 (例如: *Sphingomonas* 和 *Pseudomonas*) 而被优先利用, 降低了处理组土壤中 SOM 的分解; PHE 的生物降解过程会消耗氧气, 也会抑制 SOM 的矿化作用. PE 和 PP 释放的添加剂在土壤中的迁移可能会对微生物产生毒害作用, 改变微生物群落的结构和功能, 使其分解 SOM 的能力降低^[25-27]; 微塑料的存在会和土壤微生物竞争物理化学生态位^[28], 会抑制与有机碳降解相关的基因的表达^[29]; 以上可能是导致 PHE-PE 和 PHE-PP 组中 SOM 的含量显著高于 PHE 组的原因.

表1 微塑料和 PHE 对土壤化学性质的影响¹⁾

Table 1 Effect of microplastics and PHE on soil chemical properties

土壤化学性质	CK	PHE	PE	PP	PHE-PE	PHE-PP
pH	7.327 ± 0.032	7.373 ± 0.015	7.287 ± 0.006	7.267 ± 0.032	7.323 ± 0.015	7.310 ± 0.020
ω (SOM)/g·kg ⁻¹	19.232 ± 1.562	20.372 ± 0.532	23.885 ± 1.133*	36.037 ± 0.836*	24.229 ± 0.364*	37.531 ± 3.566*
ω (AN)/mg·kg ⁻¹	89.262 ± 4.081	79.861 ± 4.071*	84.570 ± 7.041	82.208 ± 4.058	75.167 ± 4.058*	63.418 ± 7.043*
ω (AP)/mg·kg ⁻¹	6.008 ± 0.190	5.598 ± 0.202	6.071 ± 1.101	6.272 ± 1.423	5.836 ± 0.200	5.610 ± 0.175

1)*表示处理组和 CK 之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

Zhou 等^[30]的研究指出,可降解污染物作为碳源供应能够增强微生物对氮的固定.推测 PHE 可以被土壤中的微生物用作碳源进行生长和繁殖,增加了对氮的利用,导致 PHE、PE-PHE 和 PP-PHE 处理组中的 AN 含量明显低于 CK 组($P < 0.05$).在另一方面,微生物通过氨化、硝化、反硝化和同化作用产生或分解 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,实现 AN 的积累.菌 *Acidobacteria*、*Pseudomonas*、*Proteobacteria*、*Burkholderiaceae*、*Xanthobacteraceae* 和 *Pseudomonadaceae* 已被报道可以进行硝酸盐还原、硝化和反硝化反应^[11,31,32],本研究中 PHE、PE-PHE 和 PP-PHE 改变了上述菌群的相对丰度,这也可能引起土壤中 AN 含量的降低.微塑料中的有机磷阻燃剂会使一定量的磷进入到土壤中,因此 PE 和 PP 处理组中的 AP 呈现略微升高的现象.与 CK 相比,PHE、PE-PHE 和 PP-PHE 在一定程度上降低了 AP,这说明微生物利用磷作为营养物质,进行 PHE 的降解.微塑料引起的土壤 pH 值的升高会降低 AP 的含量^[24];Li 等^[33]的研究发现 PP 和 PE 对细菌群落没有产生明显的影响,但显著降低了土壤中 AP 含量,说明 AP 的变化与菌群的关系不大.本研究只关注了 PE、PP 和 PHE 的

单独或复合作用对土壤细菌群落的影响,并没有关注真菌群落的变化.Li 等^[34]的研究发现土壤真菌群落对微塑料胁迫的敏感性高于细菌,未来开展微塑料和 PHE 对土壤真菌群落影响的研究将有助于进一步明确 AN 和 AP 变化的原因.此外,微塑料还会诱导土壤团聚体出现断裂点,改变团聚体的结构和数量,这也可能会影响土壤中氮和磷的含量^[35-37],还需开展进一步的研究.

2.2 微塑料和 PHE 对土壤酶活性的影响

脲酶能够促进含氮有机物的分解,在氮循环中起到重要作用.已有的研究证明 PE 和 PP 的加入能够显著增强脲酶的活性^[25,38],这与本研究的结果一致(表 2).土壤中养分的含量会影响酶活性,低养分水平会抑制土壤酶的产生^[39],SOM 中含有足够刺激酶活性的底物,土壤化学性质与酶活性之间的相关性分析见表 3,SOM 与脲酶活性呈现极显著正相关,这说明 PE/PP 和 PHE 的单一或复合污染增加了土壤中 SOM 的含量,是导致脲酶活性升高的原因之一.此外,PE 和 PP 可以通过增强土壤中脲酶的活性而影响氮循环过程^[25,40],因而降低了土壤中 AN 的含量(表 1),从表 3 中可以得知,AN 与脲酶活性具有极显著负相关关系.

表 2 微塑料和 PHE 对土壤酶活性的影响¹⁾

Table 2 Effect of microplastics and PHE on enzymatic activities

土壤酶	酶活性单位	CK	PHE	PE	PP	PHE-PE	PHE-PP
脲酶	$\text{mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	2.100 ± 0.097	2.220 ± 0.201	$3.056 \pm 0.129^*$	$3.616 \pm 0.206^*$	$3.637 \pm 0.105^*$	$4.417 \pm 0.189^*$
FDase 酶	$\mu\text{g} \cdot (20 \text{ min} \cdot \text{g})^{-1}$	9.240 ± 0.703	$15.698 \pm 0.885^*$	$15.342 \pm 0.662^*$	$16.911 \pm 2.496^*$	$21.023 \pm 3.197^*$	$24.029 \pm 2.652^*$
脱氢酶	$\mu\text{L} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	0.246 ± 0.015	$0.404 \pm 0.034^*$	0.266 ± 0.060	0.256 ± 0.030	$0.739 \pm 0.016^*$	$0.549 \pm 0.031^*$
中性磷酸酶	$\text{mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$	0.153 ± 0.032	$0.294 \pm 0.076^*$	0.164 ± 0.037	0.146 ± 0.066	$0.520 \pm 0.032^*$	$0.423 \pm 0.054^*$

1)*表示处理组和 CK 之间存在显著性差异($P < 0.05$)

表 3 土壤酶活性、微生物数量与土壤化学性质的相关性¹⁾

Table 3 Correlation between soil enzymatic activities, microbial quantity, and soil chemical properties

	pH	SOM	AN	AP	脲酶	FDase 酶	脱氢酶	中性磷酸酶	细菌	放线菌	霉菌
pH	1										
SOM	-0.592**	1									
AN	-0.119	-0.540*	1								
AP	-0.172	0.033	0.265	1							
脲酶	-0.453	0.844**	-0.693**	0.061	1						
FDase 酶	-0.131	0.597**	-0.761**	-0.084	0.815**	1					
脱氢酶	0.279	0.124	-0.629**	-0.138	0.514*	0.684**	1				
中性磷酸酶	0.314	0.109	-0.681**	-0.168	0.476*	0.741**	0.919**	1			
细菌	0.217	0.036	-0.544*	-0.492*	0.168	0.423	0.360	0.531*	1		
放线菌	0.593**	-0.313	-0.087	-0.175	-0.410	-0.048	0.049	0.073	0.284	1	
霉菌	0.041	0.012	0.054	-0.085	-0.019	0.039	0.093	-0.071	-0.166	0.282	1

1)*和**分别表示显著水平相关($P < 0.05$)和极显著水平相关($P < 0.01$)

FDase 酶是指示微生物活性的重要参数,可以代表土壤细菌的整体代谢活动.有研究表明 PE 和 PP 显著增强了 FDase 酶活性^[41,42].在本研究中,与 CK 相比,PE/PP 和 PHE 的单一、复合污染均明显增加了

FDase 酶活性($P < 0.05$,表 2),说明了土壤中的微生物可以通过自身代谢活动将 PE/PP 和 PHE 降解.此外,研究指出土壤中 SOM 含量高可以保护酶和微生物免受环境干扰,从而减轻污染物对酶的毒性^[43].

PE、PP、PHE-PE 和 PHE-PP 的添加显著提高了 SOM 含量,有利于 FDAse 酶活性的增强.相关性分析表明,SOM 与 FDAse 酶活性呈极显著正相关,验证了土壤中 SOM 含量的增加对 FDAse 酶活性的促进作用.微塑料可以增加土壤通气性和孔隙度,促进了空气循环,导致好氧微生物的聚集,进而提高土壤微生物活性,因此,与 PHE 相比,PHE-PP 和 PHE-PE 增强了 FDAse 酶活性.FDAse 酶活性的增强会促进土壤中微生物对氮的利用,导致 AN 的含量降低(表 1),AN 与 FDAse 酶活性呈现极显著负相关(表 3),也验证了这一点.

脱氢酶是微生物呼吸过程中重要的氧化还原酶之一,在所有活的微生物细胞中存在.有研究表明,脱氢酶活性与 PAHs 的降解效果呈正相关^[44,45].与 CK 相比,PHE、PHE-PE 和 PHE-PP 显著提高了脱氢酶活性(表 2),可能是 PHE 的存在使土壤中土著细菌(例如:*Sphingomonas* 和 *Pseudomonas*)对 PHE 的降解能力显著增强.与 PHE 相比,PHE-PE 和 PHE-PP 的添加也显著增强了脱氢酶活性,说明微塑料 PE 和 PP 能够促进 PHE 的生物降解;脱氢酶可以催化污染物通过电子链传输而被氧化,同时氧化磷酸化途径会产生能量,从而使土壤微生物数量和活性可以通过在降解聚合物过程中的生化反应而增加^[46].PE、PP、PHE-PE 和 PHE-PP 实验组中脱氢酶活性的增加表明土壤中微生物可能对微塑料具有降解作用.在 PE 和 PP 的分子结构链上分别存在甲基和亚甲基,与 PE 相比,甲基的存在增强了 PP 对生物降解的耐受能力,因此,PP 组中脱氢酶的增大幅度低于 PE 实验组.Fida 等^[47]的研究指出 PHE 的生物降解过程会消耗 O₂,会导致土壤缺氧,从而增强了脱氢酶活性.

磷酸酶可以催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯的水解,将有机磷转化为无机磷,提高有效磷的含量.添加 PHE、PHE-PE 和 PHE-PP 后,土壤中性磷酸酶活性显著增加,但 PE 和 PP 未对其产生明显影响(表 2).有研究指出磷酸酶活性与一些细菌的丰度显著相关^[42,48],包括 *Phenylobacterium*、*Pseudonocardia*、*Ramlibacter*、*Marmoricola*、*Saccharimonadales*、*Burkholderia* 和 *Solirubrobacter* 等.本研究中,PE/PP 和 PHE 的单独或复合添加均改变了 *Burkholderia*、*Marmoricola*、*Ramlibacter* 和 *Solirubrobacter* 的相对丰

度,可能是引起磷酸酶活性变化的原因之一.磷酸酶活性还与无机磷的生物利用性有关,这说明 PHE、PHE-PE 和 PHE-PP 促进了土壤中细菌对磷的利用.此外,土壤中 AN 含量的降低会引起 pH 的变化,进而使磷酸酶活性增加;相关性分析显示,AN 与中性磷酸酶活性具有极显著负相关关系(表 3),说明 AN 的变化对中性磷酸酶活性有一定的影响.

2.3 微塑料和 PHE 对土壤微生物数量的影响

PP/PE 和 PHE 的单一及复合添加对土壤中细菌、放线菌和霉菌的数量产生了一定的影响(表 4).Liu 等^[18]的研究发现微塑料不能被微生物群落作为外加碳源而被降解,导致微生物数量未发生变化,可以推测微生物对微塑料的降解能力与其数量的增加呈正相关.本实验中,PP 和 PE 增加了细菌的数量,说明土壤中的细菌对 PP 和 PE 具有一定的降解能力,但未达到显著水平.添加 PHE、PHE-PE 和 PHE-PP 的土壤体系中,细菌、放线菌和霉菌的数量均增多,这表明土壤中存在可以将 PHE 作为碳源的细菌、放线菌和霉菌;而且在 PHE-PE 和 PHE-PP 组中的细菌数量要大于 PHE 组,这说明土壤中有可以利用 PHE、PE 和 PP 进行生长繁殖的细菌,而且 PE 和 PP 的存在促进了细菌对 PHE 的降解.相关性分析表明(表 3),细菌数量与 AN 和 AP 含量呈显著负相关,说明细菌可以利用 AN 和 AP 进行生长繁殖.与 CK 相比,处理组中的 AN 和 AP 含量降低,这进一步证实了 PE/PP 和 PHE 的单一和复合添加可以增加细菌数量.中性磷酸酶活性与细菌数量显著正相关,磷酸酶活性的增强可促进有效磷的生成,为细菌的生长繁殖提供营养物质,表明磷酸酶的提高也是细菌数量增多的原因之一.微塑料中的添加剂等有害物质可能会释放到土壤中,抑制微生物的生长活动,这可能是本实验中添加 PE 和 PP 引起放线菌和霉菌数量轻微减少的原因之一,但未对细菌的生长起到抑制作用.此外,放线菌数量与 pH 呈极显著正相关,这与 Fu 等^[49]研究的结果一致,PE 和 PP 的存在降低了土壤 pH 值也可能引起放线菌数量的减少.

2.4 微塑料和 PHE 对土壤微生物群落的影响

2.4.1 土壤微生物群落结构

在属水平上对微生物群落进行主成分分析(PCA),结果见图 1,CK 和 PHE 在同一区域,PE 和

表 4 微塑料和 PHE 对土壤中微生物数量的影响

Table 4 Effects of microplastics and PHE on soil microbial quantity

微生物数量	CK	PHE	PE	PP	PHE-PE	PHE-PP
细菌×10 ⁶ /CFU·g ⁻¹	2.203 ± 0.443	2.944 ± 1.358	2.419 ± 0.762	2.413 ± 0.722	3.211 ± 1.155	3.130 ± 1.358
放线菌×10 ⁵ /CFU·g ⁻¹	1.413 ± 0.225	2.080 ± 0.106	1.391 ± 0.054	1.402 ± 0.240	1.427 ± 0.210	1.446 ± 0.195
霉菌×10 ⁴ /CFU·g ⁻¹	4.477 ± 0.994	4.457 ± 1.037	4.320 ± 0.877	4.337 ± 2.082	4.513 ± 1.951	4.467 ± 1.171

PHE-PE 在同一区域,这说明 CK 和 PHE、PE 和 PHE-PE 的微生物群落结构差别不大,但 CK/PHE 和 PE/PHE-PE 之间具有一定的群落差异性. PHE-PP 和 PP 与其它组在不同的区域,说明 PHE-PP 和 PP 与 CK、PHE、PE 和 PHE-PE 组的微生物群落存在差异, PHE-PP 和 PP 间也存在微生物群落分布的差异. 与 CK 相比, PHE 处理组中的微生物群落变化不大,经检测,在培养 300 d 后土壤中 $\omega(\text{PHE})$ 为 $0.0838 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明在培养过程中土壤中的 PHE 被微生物降解,从而对微生物群落结构的影响较小. 然而,在 PP、PE、PHE-PP 和 PHE-PE 处理组 $\omega(\text{PP})$ 、 $\omega(\text{PE})$ 、 $\omega(\text{PP})$ 和 $\omega(\text{PE})$ 的剩余质量分数分别为 4.48%、4.38%、4.72% 和 4.67%,虽然土壤中的微生物对 PP 和 PE 有一定的分解作用,但大部分的 PP 和 PE 仍存在于土壤中,在 300 d 的培养过程中 PP 和 PE 会对微生物产生影响,进而导致在 PE、PP、PHE-PE 和 PHE-PP 组中的微生物群落发生变化.

微塑料(PE/PP)和 PHE 的添加没有改变菌群的种类却改变了其相对丰度. 与 CK 相比, PHE、PP、PE、PHE-PE 和 PHE-PP 的存在均增加了 β -变形菌(Beta-Proteobacteria)、伯克霍尔德菌(*Burkholderia*)、贪铜菌(*Cupriavidus*)、 δ -变形菌(Delta-

Proteobacteria)、假单胞菌(*Pseudomonas*)和红游动菌(*Rhodoplanes*)的相对丰度,降低了溶杆菌(*Lysobacter*)、粘细菌(*Myxococcus*)、*Pyrinomonas* 和土壤红杆菌(*Solirubrobacter*)的相对丰度(图 2). β -变形菌、伯克霍尔德菌、贪铜菌、 δ -变形菌、假单胞菌和红游动菌不仅可以直接参与 PHE 的降解,还是在 PP 和 PE 表面定殖的主要微生物,参与微塑料的降解^[19,50],本研究中上述细菌丰度的增加再次验证了 PHE、PP 和 PE 在土壤中可以降解; PHE-PE 和 PHE-PP 污染体系中这些菌的丰度高于 PHE 体系中,说明 PP 和 PE 的存在可以促进 PHE 的生物降解. Fu 等^[53]的研究表明,微塑料可以通过增加土壤中碳水化合物和氨基酸的含量来降低溶杆菌的相对丰度. 从 2.4.2 节中的 SEED 功能分析中可知,微塑料(PP、PE)和 PHE 提高了碳水化合物的丰度,因此,这可能是导致溶杆菌的相对丰度降低的原因之一. *Pyrinomonas* 和土壤红杆菌具有固碳作用,有利于土壤中有机碳的积累,这两种菌相对丰度的下降表明 PP/PE 和 PHE 的添加降低了微生物固碳能力,但 2.1 节指出它们增加了 SOM 含量,推测可能土壤中有机碳含量增加主要是由于 PE/PP 和 PHE 本身含有的有机碳积累导致的.

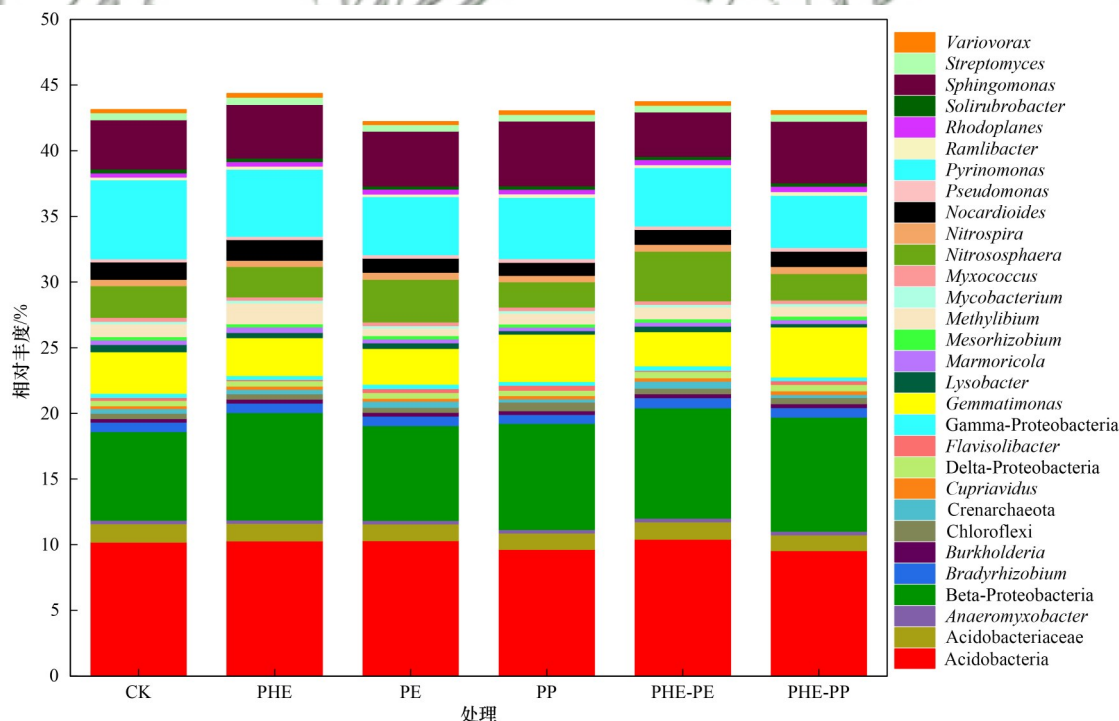


图 2 微塑料和 PHE 对属水平上微生物群落相对丰度的影响

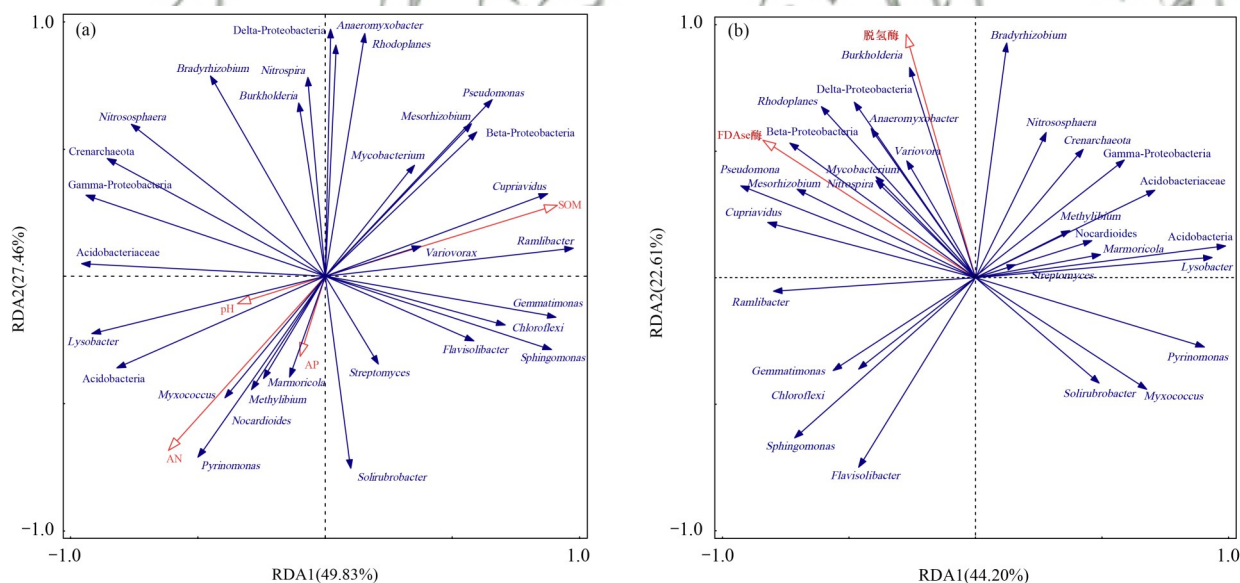
Fig. 2 Effects of microplastics and PHE on the relative abundance of microbial communities at genus level

基于方差膨胀因子(VIF)分析筛选得到关键影响因子,包括 pH 值、SOM、AN、AP、FDA 酶和脱氢酶. 用 RDA 对微生物群落的丰度与土壤化学性质、酶活性的相关关系进行分析,结果如图 3 所示. 根据

箭头连线长度可以看出,AN 和 SOM 与微生物群落的相关性较好,是影响群落结构的主要因素. 通过 Pearson 相关性分析表明,AN 与黄色土源菌(*Flavisolibacter*)显著负相关,其能够降解 PE/PP 中的

塑化剂和 PHE^[54,55],推测黄色土源菌利用 AN 进行生长繁殖而有利于污染物的降解. AN 与火山岩海球菌(*Marmoricola*)、甲基养菌(*Methylibium*)和类诺卡氏菌(*Nocardioide*s)均呈极显著正相关. SOM 与酸杆菌(*Acidobacteria*)和溶杆菌(*Lysobacter*)呈显著负相关,与沙壤土杆菌(*Ramlibacter*)呈显著正相关. 添加 PE/PP 和 PHE 后,由于土壤 pH 和 AP 没有发生显著变化,微生物群落与 pH 和 AP 无显著相关性. 从图 3 (b)中可以看出,FDA 酶和脱氢酶与微生物群落的相关性较好. Pearson 相关性分析表明,红游动菌与 FDA 酶呈显著正相关,这与 Zhou 等^[56]研究的结果一致. PHE 和 PE/PP 的添加提高了 FDA 酶的活性和红游动菌的相对丰度(见 2.2 节和 2.4.1 节),推测 FDA 酶是促进红游动菌降解 PHE 和 PE/PP 的重要因素. 假单胞菌属、*Pyrinomonas* 与脱氢酶和 FDAse 酶呈显著负相关, β -变形菌与 FDAse 酶显著正相关. 采用前向筛选法得到影响微生物群落的环境因子(表 5),土壤化学性质对微生物群落影响的重要性大小顺序为:SOM > AN > AP > pH,酶活性影响的重要性大小顺序为 FDAse 酶 > 脱氢酶,其中 SOM 达到显著水平($P < 0.05$),其它均未达到显著水平($P >$

0.05),说明 PE/PP 和 PHE 可以通过改变 SOM 来影响土壤微生物群落结构. 已有研究表明其它土壤理化特性也可能对土壤微生物群落产生影响,Zhang 等^[57]指出微塑料会改变土壤的物理特性(容重、孔隙度和团聚体结构),进而引起微生物群落的变化;Chi 等^[58]指出 PHE 存在引起的盐度、铵态氮和硝态氮的变化也会影响土壤微生物群落结构. 此外,土壤中菌与菌之间的相互作用也会影响微生物的群落组成. 通过微生物群落网络关系分析物种的相互关系(图 4),大多数菌属间呈正相关,是相互协作的关系,说明微生物为适应污染物的胁迫,种群间会偏向互相合作. 例如, β -变形菌、贪铜菌和假单胞菌彼此间呈显著正相关,可以共降解土壤中的 PE/PP 和 PHE,它们的单一和复合污染均增强了这 3 种菌的丰度,促进了菌群间的协作关系来抵抗污染胁迫. 但也有一些菌属间显著负相关,呈现竞争的生存关系,例如鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)与酸杆菌、泉古菌(*Crenarchaeota*)、 γ -变形菌(*Gamma-Proteobacteria*)和溶杆菌为负相关. 群落间的竞争关系会改变物种的丰度,进而影响微生物群落的结构.



(a)微生物群落与土壤化学特性的冗余分析,(b)微生物群落与酶活性的冗余分析;红色箭头表示环境因子(土壤化学性质/酶活性),蓝色箭头表示属水平上的细菌种类,箭头长度表示环境因子与细菌群落的相关性强弱,红色和蓝色箭头指向的同方向表示高度正相关

图3 微生物群落与环境因子的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil microbial community and environmental factors

由此可见,PE/PP 和 PHE 的添加导致土壤 SOM、AN 和酶活性(脲酶、FDAse 酶、脱氢酶和中性磷酸酶)发生了显著变化,但只有 SOM 的变化与微生物群落显著相关. 菌与菌之间的互作关系也是影响微生物群落的因素. 此外,土壤中不同碳源(PE/PP、PHE)的存在引起了群落组成的差异. 因此,PE/PP 和 PHE 的单一和复合污染引起的微生物群落的变化可能是

SOM、菌间互作关系和碳源底物共同作用的结果.

2.4.2 微塑料和 PHE 存在下土壤微生物群落的功能特征

(1)KEGG 代谢通路 土壤中微生物在 KEGG 数据库(Level 2)注释的主要代谢通路见图 5. 与 CK 相比,PP/PE、PHE 的单一和复合污染的土壤中,一些通路的相对丰度增加了,包括能量代谢、细胞膜转运、

表 5 土壤化学性质和酶活性解释微生物群落变化的重要性及显著性

环境因子	解释率/%	贡献率/%	显著性(P)
SOM	44.3	48.7	0.04
AN	16.0	17.6	0.36
AP	24.2	26.7	0.1
pH	6.4	7.1	0.61
FDase 酶	37.8	46.4	0.06
脱氢酶	29.0	35.6	0.1
中性磷酸酶	7.7	9.5	0.61
脲酶	6.9	8.5	0.74

核苷酸代谢、信号转导、转录和翻译。核苷酸代谢与细胞稳态直接相关,有利于能量(ATP、GTP)的产生。土壤中微生物的能量代谢可用腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)来衡量,ATP是微生物量和活力的标志,因此能量代谢可以促使土壤中细菌数量的增加。细胞膜转运能够调控微生物细胞对营养物质的吸收,还可将代谢产物及时排出以防止它们在细胞中积累而产生毒性,从而促进土壤中细菌的生长和生命活动。添加 PHE、PE、PP、PHE-PE 和 PHE-PP 后细菌数量增多(2.3 节)可能与上述代谢途径的丰度增强有关。信号转导是生物细胞为应对环境变化而做出的生理应答反应,能够改变细菌的基因转录表达以降低环境

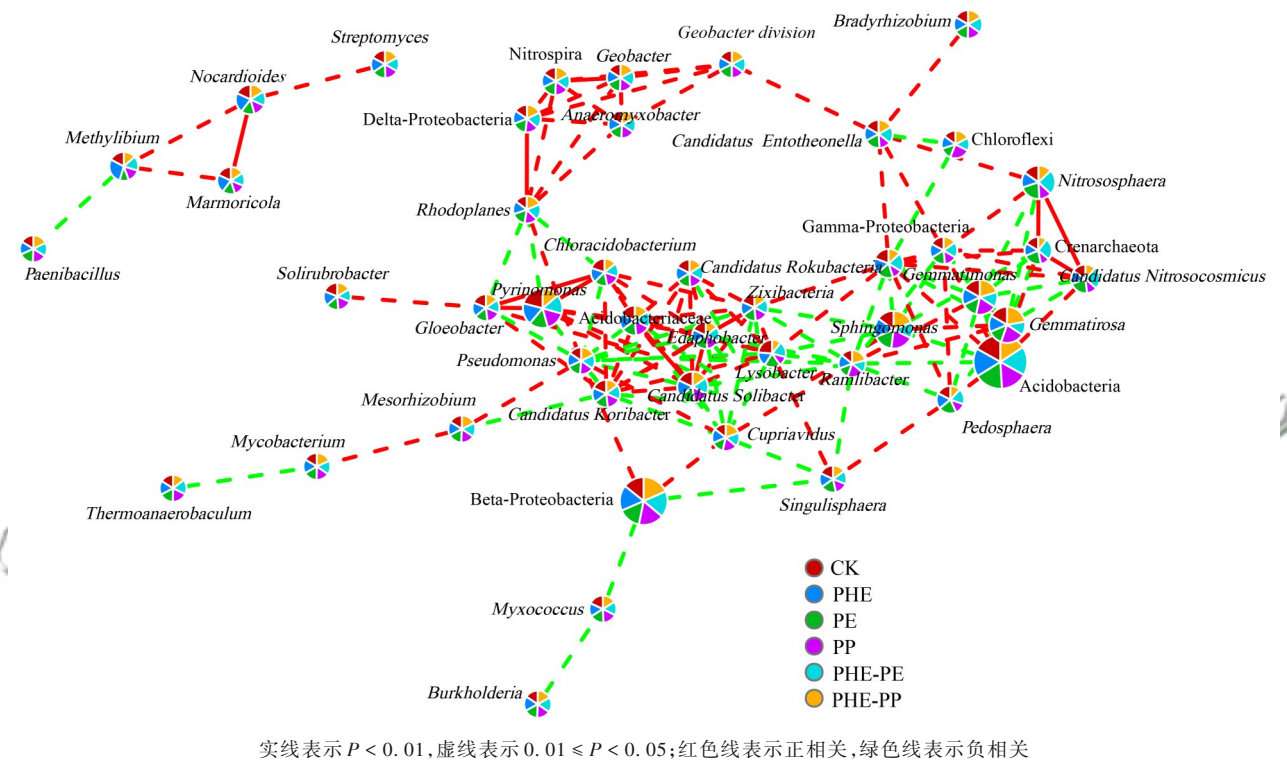


图 4 属水平上菌群相关性的网络分析

Fig. 4 Network analysis for the correlation of bacterial community at genus level

胁迫的影响^[59];转录和翻译在微生物体内是同时进行的生命过程,通过调整基因的表达来适应环境的变化;这些代谢途径的相对丰度增强可能有助于土壤中微生物应对 PHE 和 PE/PP 污染的胁迫。

(2)SEED 功能注释 根据 SEED 数据库,对 CK 和处理组土壤中微生物的生物学功能进行分析,结果见图 6。氨同化作用是将氨氮结合到碳骨架中生成有机氮,有利于微生物的代谢和能量产生;在此过程中,氨氮还被结合到谷氨酸和谷氨酰胺中,形成细胞内所有其它含氮成分的主要生物合成供体^[60],从而促进微生物的生长和繁殖。微生物细胞不仅要从环境中吸收铁来满足其生长的需求,而且还要将细胞内铁浓度维持在无害水平,因此铁的获

取和代谢对于微生物的生长繁殖是十分重要的。ATP 合成酶是微生物生长和繁殖的必需酶,参与细胞生命活动所需要的能量合成。DNA 代谢主要包括重组和复制,是细菌的生长和存活不可缺少的部分,对于维持细胞稳态至关重要。RNA 代谢/加工/修饰与细菌的生长密切相关^[61]。蛋白质生物合成对细菌的生长至关重要,蛋白质在肽链合成后需要进行加工和修饰才能具有生物活性。蛋白质和核蛋白的分泌在细菌的生长和繁殖过程中具有十分重要的作用,提高微生物耐受污染物胁迫的能力。细菌的胁迫应答一个应对不利环境条件的复杂系统,有利于细胞的生长。外源化学物的解毒是微生物的一种适应性特征,可以增强细胞对污染物胁迫

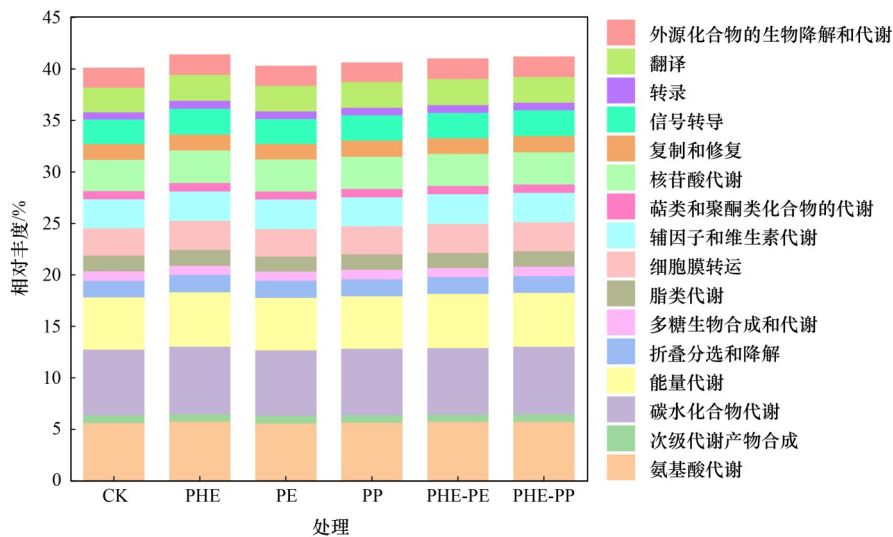


图5 基于KEGG的代谢通路

Fig. 5 Metabolic pathway of all samples based on KEGG

的耐受性. PHE 和 PE/PP 的单一、复合污染均增加了上述生物学功能的相对丰度,可能是微生物为了应对污染胁迫的调控机制,代谢、生长和繁殖等生命活动的增强会提高微生物对 PHE 和 PE/PP 污染

的适应能力. PHE、PHE-PE 和 PHE-PP 的存在增强了芳香烃的代谢和厌氧降解功能,说明土壤中的微生物对 PHE 具有一定的降解能力,可以降低 PHE 对菌群的毒性效应.

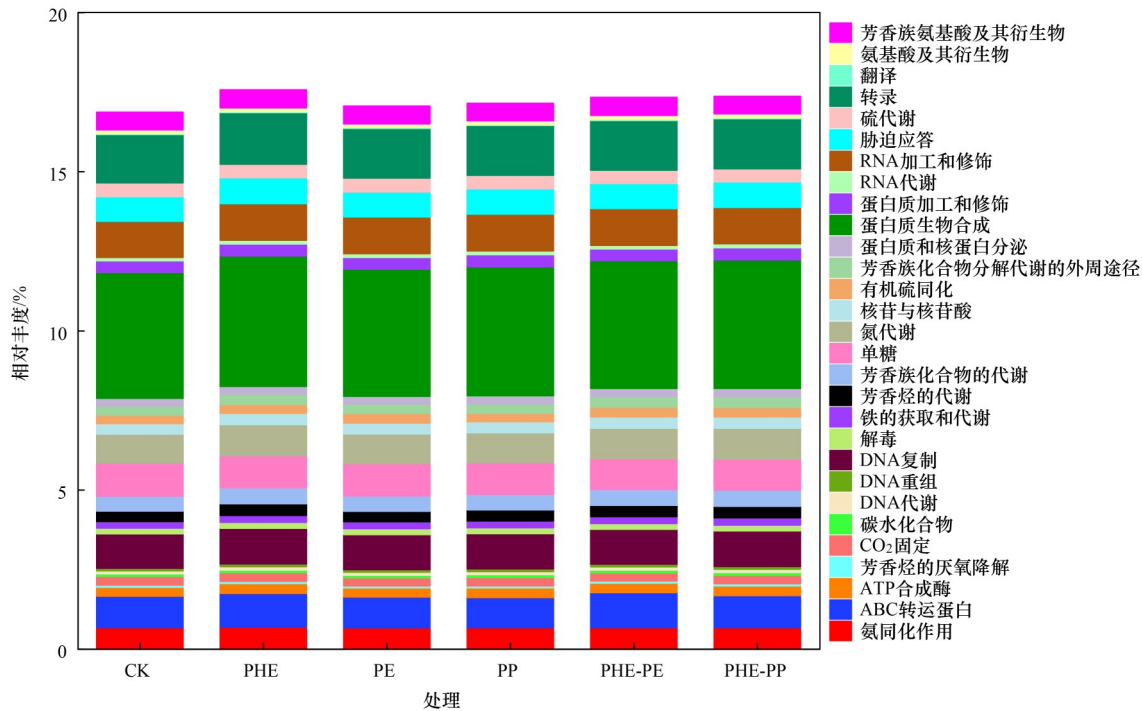


图6 基于SEED的功能分析

Fig. 6 Functional analysis of all samples based on SEED

3 结论

(1)PE/PP 和 PHE 的单一和复合污染对土壤 pH 和 AP 没有产生明显的影响,显著地提高了 FDase 酶活性;PE、PP、PHE-PE 和 PHE-PP 显著增加了 SOM 含量和脲酶活性;PHE、PHE-PE 和 PHE-PP 显著增强

了脱氢酶和磷酸酶活性;PE/PP 和 PHE 对土壤中细菌、放线菌和霉菌的数量产生了影响.

(2)pH、AP 与土壤酶活性无显著相关性;AN 与脲酶、FDase 酶、脱氢酶和中性磷酸酶呈极显著负相关;SOM 与脲酶、FDase 酶呈极显著正相关;说明 AN 和 SOM 是添加 PE/PP 和 PHE 后土壤酶活性变化的主

要影响因子. AN、AP与细菌数量呈显著负相关, pH与放线菌数量呈极显著正相关, 说明PE/PP和PHE引起的AN、AP和pH的变化是促进微生物数量增加的重要因素.

(3) PE/PP和PHE能够促使微生物产生能量, 加快污染物的代谢/降解和细胞膜转运过程, 促进微生物的生长和繁殖, 增强了菌群对污染胁迫的耐受能力. 微生物群落的变化与土壤化学特性、菌间互作关系和碳源底物(PP/PE、PHE)具相关性, 其中SOM是主要的驱动因子.

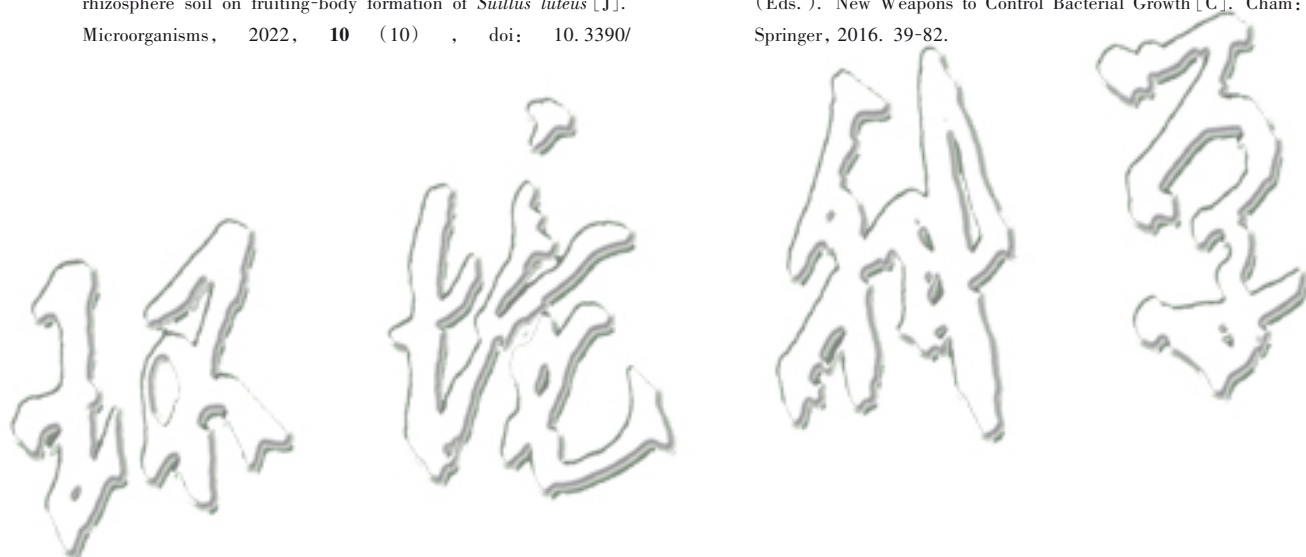
(4) 在土壤中添加PE/PP和PHE后, 随着培养时间的增加, 微生物会进行适应性进化, 微生物群落结构和代谢功能可能发生动态演替. 因此, 未来需要针对微塑料、PAHs及其复合污染在不同胁迫时间下土壤微生物群落的变化开展进一步的研究, 对于明确微塑料/PAHs污染的土壤生态毒理学效应具有重要意义.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 等. 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[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4507-4518.
- Ran T S, Long J, Liao H K, *et al.* Effects of biochar application on physicochemical properties and bacterial communities of microplastic-contaminated calcareous soil[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4507-4518.
- [3] 马贵, 丁家富, 周悦, 等. 固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5055-5062.
- Ma G, Ding J F, Zhou Y, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of microplastic in farmland soil in Guyuan[J]. 2023, 44(9): 5055-5062.
- [4] 刘亚菲. 滇池湖滨农田土壤中微塑料数量及分布研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- Liu Y F. Quantity and distribution of microplastics in farmland soil of lake shore in Dianchi Lake[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.
- [5] 单德鑫, 刘霄, 甘露, 等. 山东省东营市农田土壤PAHs污染特征及风险评估[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(1): 77-87.
- Shan D X, Liu X, Gan L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Dongying City, Shandong Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(1): 77-87.
- [6] 甄丽莎, 谷洁, 胡婷, 等. 黄土高原石油污染土壤微生物群落结构及其代谢特征[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5703-5710.
- Zhen L S, Gu J, Hu T, *et al.* Microbial community structure and metabolic characteristics of oil-contaminated soil in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5703-5710.
- [7] 张芳, 郜红建, 葛高飞. 苯并[a]芘累积污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(8): 1849-1857.
- Zhang F, Gao H J, Ge G F. Effects of cumulative benzo(a) pyrene pollution on functional diversity of microbial community in soil[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(8): 1849-1857.
- [8] Su J Q, Ouyang W Y, Hong Y W, *et al.* Responses of endophytic and rhizospheric bacterial communities of salt marsh plant (*Spartina alterniflora*) to polycyclic aromatic hydrocarbons contamination[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(2): 707-715.
- [9] Shen X F, Wan Y Y, Dong W H, *et al.* Experimental study on the biodegradation of naphthalene and phenanthrene by functional bacterial strains in the riparian soil of a binary system[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 223, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112603.
- [10] Sun X, Zhang X Y, Xia Y X, *et al.* Simulation of the effects of microplastics on the microbial community structure and nitrogen cycle of paddy soil[J]. Science of the Total Environment, 2022, 818, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151768.
- [11] Zhang J R, Ren S Y, Xu W, *et al.* Effects of plastic residues and microplastics on soil ecosystems: a global meta-analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 435, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129065.
- [12] Ng E L, Lin S Y, Dungan A M, *et al.* Microplastic pollution alters forest soil microbiome[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 409, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124606.
- [13] Kong X, Jin D C, Jin S L, *et al.* Responses of bacterial community to dibutyl phthalate pollution in a soil-vegetable ecosystem[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 353: 142-150.
- [14] 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.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Yi M L, Zhou S H, Zhang L L, *et al.* The effects of three different microplastics on enzyme activities and microbial communities in soil[J]. Water Environment Research, 2021, 93(1): 24-32.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] Liu Z Q, Liu Z X, Wu L Z, *et al.* Effect of polyethylene microplastics and acid rain on the agricultural soil ecosystem in Southern China[J]. Environmental Pollution, 2022, 303, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119094.
- [19] Gao B, Yao H Y, Li Y Y, *et al.* Microplastic addition alters the microbial community structure and stimulates soil carbon dioxide emissions in vegetable-growing soil[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2021, 40(2): 352-365.
- [20] Zhao T T, Lozano Y M, Rillig M C. Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a function of microplastic shape, polymer type, and exposure time[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9, doi: 10.3389/fenvs.2021.675803.
- [21] Boots B, Russell C W, Green D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(19): 11496-11506.
- [22] 王小雨, 冯江, 王静. 莫莫格湿地油田开采区土壤石油烃污染及对土壤性质的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2394-2401.
- Wang X Y, Feng J, Wang J. Petroleum hydrocarbon contamination and impact on soil characteristics from oilfield momoge wetland[J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2394-2401.
- [23] 陈婷. 非污染土壤化学性质对细根添加的响应研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.

- Chen T. The response to chemical properties in phenanthrene stimulated soil by adding roots [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.
- [24] Wang Q L, Feng X Y, Liu Y Y, *et al.* Effects of microplastics and carbon nanotubes on soil geochemical properties and bacterial communities [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **433**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128826.
- [25] Huang Y, Zhao Y R, Wang J, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
- [26] Zhang Y X, Li X, Xiao M, *et al.* Effects of microplastics on soil carbon dioxide emissions and the microbial functional genes involved in organic carbon decomposition in agricultural soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150714.
- [27] Hahladakis J N, Velis C A, Weber R, *et al.* An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **344**: 179-199.
- [28] Yu H, Fan P, Hou J H, *et al.* Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: an investigation at the aggregate-fraction level [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115544.
- [29] Yu Y X, Li X, Feng Z Y, *et al.* Polyethylene microplastics alter the microbial functional gene abundances and increase nitrous oxide emissions from paddy soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **432**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128721.
- [30] Zhou J, Gui H, Banfield C C, *et al.* The microplastisphere: biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structure and function [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108211.
- [31] Kielak A M, Barreto C C, Kowalchuk G A, *et al.* The ecology of *Acidobacteria*: moving beyond genes and genomes [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**, doi: 10.3389/fmicb.2016.00744.
- [32] He T X, Li Z L, Xie D T, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification with different mixed nitrogen loads by a hypothermia aerobic bacterium [J]. *Biodegradation*, 2018, **29**(2): 159-170.
- [33] Li H X, Liu L. Short-term effects of polyethene and polypropylene microplastics on soil phosphorus and nitrogen availability [J]. *Chemosphere*, 2022, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132984.
- [34] Li H Z, Zhu D, Lindhardt J H, *et al.* Long-term fertilization history alters effects of microplastics on soil properties, microbial communities, and functions in diverse farmland ecosystem [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55** (8): 4658-4668.
- [35] Lehmann A, Fitschen K, Rillig M C. Abiotic and biotic factors influencing the effect of microplastic on soil aggregation [J]. *Soil Systems*, 2019, **3**(1), doi: 10.3390/soilsystems3010021.
- [36] Liang Y, Lehmann A, Ballhausen M B, *et al.* Increasing temperature and microplastic fibers jointly influence soil aggregation by saprobic fungi [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.02018.
- [37] Lozano Y M, Lehnert T, Linck L T, *et al.* Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, **12**, doi: 10.3389/fpls.2021.616645.
- [38] 马云, 王剑. 土壤微生态系统中聚丙烯微塑料对土壤酶活性的影响 [J]. *浙江工业大学学报*, 2022, **50**(2): 216-221.
- Ma Y, Wang J. Effect of polypropylene microplastics on soil enzyme activities in microenvironment [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2022, **50**(2): 216-221.
- [39] Xu C Y, Pu L J, Li J G, *et al.* Effect of reclamation on C, N, and P stoichiometry in soil and soil aggregates of a coastal wetland in eastern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(3): 1215-1225.
- [40] Li J, Yu Y F, Zhang Z Y, *et al.* The positive effects of polypropylene and polyvinyl chloride microplastics on agricultural soil quality [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, **23**: 1304-1314.
- [41] Liu H F, Yang X M, Liu G B, *et al.* Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil [J]. *Chemosphere*, 2017, **185**: 907-917.
- [42] Wang F Y, Wang Q L, Adams C A, *et al.* Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **424**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127531.
- [43] Tao K L, Tian H X, Fan J, *et al.* Kinetics and catalytic efficiency of soil fluorescein diacetate hydrolase under the pesticide parathion stress [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **771**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144835.
- [44] Rostami S, Azhdarpoor A, Baghapour M A, *et al.* The effects of exogenous application of melatonin on the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of *Festuca* [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116559.
- [45] Ding P, Wu P, Zhang J, *et al.* Damage of anodic biofilms by high salinity deteriorates PAHs degradation in single-chamber microbial electrolysis cell reactor [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **777**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145752.
- [46] Chen H Y, Wang F, Chen H L, *et al.* Specific biotests to assess eco-toxicity of biodegradable polymer materials in soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **105**: 150-162.
- [47] Fida T T, Breugelmans P, Lavigne R, *et al.* Exposure to solute stress affects genome-wide expression but not the polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading activity of *Sphingomonas* sp. strain LH128 in biofilms [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(23): 8311-8320.
- [48] 马文倩, 许美玲, 郭红岩. 野外农田系统中聚乙烯微塑料对土壤-小麦系统的影响 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, **57**(3): 393-400.
- Ma W Q, Xu M L, Guo H Y. Effect of polyethylene microplastic on soil-wheat system in field [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, **57**(3): 393-400.
- [49] Fu G, Liu Z W, Cui F F. Features of soil enzyme activities and the number of microorganisms in plantations and their relationships with soil nutrients in the Qinling Mountains, China [J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2009, **4**(3): 344-350.
- [50] Debroas D, Mone A, Halle A T. Plastics in the North Atlantic garbage patch: a boat-microbe for hitchhikers and plastic degraders [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 1222-1232.
- [51] Li W Y, Miao L Z, Adyel T M, *et al.* Characterization of dynamic plastisphere and their underlying effects on the aging of biodegradable and traditional plastics in freshwater ecosystems [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, **446**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130714.
- [52] Skariyachan S, Taskeen N, Kishore A P, *et al.* Novel consortia of

- Enterobacter* and *Pseudomonas* formulated from cow dung exhibited enhanced biodegradation of polyethylene and polypropylene [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112030.
- [53] Fu Q, Lai J L, Ji X H, *et al.* Alterations of the rhizosphere soil microbial community composition and metabolite profiles of *Zea mays* by polyethylene-particles of different molecular weights [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127062.
- [54] Dou R N, Sun J T, Lu J, *et al.* Bacterial communities and functional genes stimulated during phenanthrene degradation in soil by bio-microcapsules [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **212**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.111970.
- [55] 杨靖. 邻苯二甲酸酯降解菌的降解特性与土壤应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- Yang J. Characterization of phthalate-degrading bacterial strain and its application in phthalate-contaminated soil [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [56] Zhou Y X, Shi Z C, Pang Q L, *et al.* Responses of bacterial community structure, diversity, and chemical properties in the rhizosphere soil on fruiting-body formation of *Suillus luteus* [J]. *Microorganisms*, 2022, **10** (10), doi: 10.3390/microorganisms10102059.
- [57] Zhang X Y, Li Y, Ouyang D, *et al.* Systematical review of interactions between microplastics and microorganisms in the soil environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **418**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126288.
- [58] Chi Z F, Hou L N, Li H, *et al.* Indigenous bacterial community and function in phenanthrene-polluted coastal wetlands: potential for phenanthrene degradation and relation with soil properties [J]. *Environmental Research*, 2021, **199**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111357.
- [59] Piattelli E, Peltier J, Soutourina O. Interplay between regulatory RNAs and signal transduction systems during bacterial infection [J]. *Genes*, 2020, **11**(10), doi: 10.3390/genes11101209.
- [60] 吴传栋. 基于碳源调控的污泥堆肥氮素转化及氨同化作用机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- Wu C D. Study on nitrogen transformation and ammonia assimilation during sewage sludge composting based on carbon source control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [61] Villa T G, Feijoo-Siota L, Rama J L R, *et al.* Control of bacterial growth through RNA degradation [A]. In: Villa T G, Vinas M (Eds.). *New Weapons to Control Bacterial Growth* [C]. Cham: Springer, 2016. 39-82.



CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)