环境科学
（HUANJING KEXUE）
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第45卷　第5期
2024年 5月 15日

目　次

基于时间序列分解的京津冀区域$PM_{2.5}$和O_3空间分布特征……姚青，丁净，杨旭，蔡子颖，韩素芹（2487）
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析……周红，王鸣，柴文轩，赵昕（2497）
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测……杨晓彤，康平，王安怡，臧增亮，刘浪（2507）
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估……符传博，林建兴，唐家翔，丹利（2516）
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估……高冉，李琴，车飞，张艳平，祖永刚，刘芬（2525）
2022年北京市城区$PM_{2.5}$水溶性离子含量及其变化特征……陈圆圆，崔迪，赵泽熙，常淼，景宽，沈秀娥，刘保献（2537）
郑州市冬春季$PM_{2.5}$中金属元素污染特征、来源及健康风险评估……陶杰，闫慧姣，徐艺斐，荆海涛（2548）
淄博市供暖前后$PM_{2.5}$中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险……孙港立，吴丽萍，徐勃，高玉宗，赵雪艳，姬亚芹，杨文（2558）
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析……李萌津，张勇，张倩，田杰，李丽，刘卉昆，冉伟康，王启元（2571）
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析……卢苗苗，韩素芹，刘可欣，唐晓，孔磊，丁净，樊文雁，王自发（2581）
基于空间尺度效应的山东省$PM_{2.5}$浓度时空变化及空间分异地理探测……徐勇，韦梦新，邹滨，郭振东，李沈鑫（2596）
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势……武婷，崔焕文，肖咸德，翟增秀，韩萌（2613）
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析……张敬巧，刘铮，丁文文，朱瑶，曹婷，凌德印，王淑兰，王宏亮（2622）
景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析……王玉仓，杜晶晶，张禹，吴昊，胡敏鹏，陈丁江（2631）
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源
……孟佳靖，窦红，陈哲，周石磊，底怡玲，武辰彬，王晨光，张家丰，崔建升（2640）
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析……胡昱欣，周瑞静，宋炜，杨全合，王鑫茹（2651）
郯庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价……刘海，魏伟，宋阳，徐洁，管政亭，黄健敏，赵国红（2665）
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价……王蔚青，徐雄，刘权震，林利华，吕婧，王东红（2678）
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征……韦程宸，魏枫沂，夏慧，黄魁（2686）
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析……金晓龙，邓学良，戴睿，徐倩倩，吴月，范裕祥（2694）
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征……贺赟，李雪梅，李宏权，魏琳琳，姜春晖，姜大伟，李魁晓（2707）
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响……梅渝，黄平，王鹏，朱凯（2715）
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系……蒙俊杰，刘双羽，邱小琮，周瑞娟（2727）
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析……张含，张涵，王佳伟，高金华，文洋，李相昆，任征然（2741）
市政污水中吗啡来源辨析……邵雪婷，赵悦彤，蒋冰，裴伟，李彦莹，谭冬芹，王德高（2748）
滹沱河流域生态环境动态遥感评价……李艳翠，袁金国，刘博涵，郭豪（2757）
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素……王奕淇，孙学莹（2767）
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化：以汾河流域为例……蔡进，危小建，江平，梁玉琦（2780）
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因……李月，冯霞，吴路华，罗光杰，罗红芬（2793）
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子……周怡婷，严俊霞，刘菊，王琰（2806）
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量……崔写，董燕，张露尹，王荣耀（2817）
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响……武爱彬，陈辅国，赵艳霞，秦彦杰，刘欣，郭小平（2828）
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响……江可，贾亚男，杨琰，陈坚淇，禹朴家（2840）
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析……黄世威，赵一锴，朱馨雨，刘贺雷，刘姣姣，陈稍，陈佳永，张阿凤（2848）
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测……胡志瑞，赵万伏，宋垠先，王芳，林妍敏（2859）
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响……孙凯，崔玉涛，李顺晋，魏冰丽，王媛，杨宏博，王孝忠，张伟（2871）
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性……周连昊，曾全超，梅唐英泽，汪明霞，谭文峰（2881）
控释掺混肥对麦玉轮作体系作物产量和温室气体排放的影响
……高玮，王学霞，谢建治，陈延华，倪小会，王甲辰，董艳芳，李子双，曹兵（2891）
生物炭对黄绵土中NO_3^--N运移过程影响及模拟……白一茹，刘旭，张钰涵，张睿媛，马艳，王幼奇（2905）
中国农田土壤重金属污染分析与评价……杨雳，白宗旭，薄文浩，林静，杨俱佳，陈涛（2913）
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望……王晓雨，刘恩峰，杨祥梦，王碧莲，林锦阔，颜梦霞，毕世杰（2926）
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展……陈玥如，高文艳，陈虹任，薛生国，吴川（2939）
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析……戴文婷，张晖，吴霞，钟鸣，段桂兰，董霁红，张培培，樊洪明（2952）
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价……韩双宝，袁磊，张秋霞，郑焰，李甫成（2962）
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评价与来源解析……于路加，马海军，王翠平（2971）
基于源导向和蒙特卡洛模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估
……陈莲，邹子航，张培珍，王雨菡，王振江，林森，唐翠明，罗国庆，钟建武，李智毅，王圆（2983）
西南典型碳酸盐岩高地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型……唐瑞玲，徐进力，刘彬，杜雪苗，顾雪，于林松，毕婧（2995）
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划……韦美溜，周浪，黄燕玲，庞瑞，王佛鹏，宋波（3005）
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应……刘梦宇，罗绪锋，辜娇峰，易轩韬，周航，曾鹏，廖柏寒（3016）
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响……肖乃川，王子芳，杨文娜，谢永红，代文才，高明（3027）
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响……郑晨格，裴欢欢，张亚珊，李嘉欣，刘奋武，乔星星，秦俊梅（3037）
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应……姜继韶，侯睿，崔慧林，闫广轩，刘栋（3047）
微塑料对土壤N_2O排放及氮素转化的影响研究进展……刘一戈，杨安琪，陈舒欣，牛英奕，卢瑛，李博（3059）
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响……戴柳云，侯磊，王化，符立松，王艳霞，李晓琳，王万宾，梁启斌（3069）
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征……宋可心，贺金成，李昌文，解思琦，刘宝堃，黄伟，冯志华（3078）
聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响……王志超，李哲，李嘉辰，屈忠义，杨文焕，李卫平（3088）
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测……俞锦丽，赵俊凯，罗思琦，朱颖婷，张文慧，胡启武，刘淑丽（3098）
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径……徐艺诺，翁大维，王硕，胡喜生，王占永，张园园，张兰怡（3107）
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析……徐圆圆，龚德鸿，黄正光，杨浪（3119）

第45卷第5期
2024年5月

环 境 科 学
Environmental Science

Vol.45 No.5
May，2024

聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响

王志超[1,2]，李哲[1,2]，李嘉辰[1,2]，屈忠义[1,2]，杨文焕[1,2]，李卫平[1,2*]
（1. 内蒙古科技大学能源与环境学院，包头 014010；2. 黄河流域内蒙古段生态保护与综合利用自治区协同创新中心，包头 014010）

摘要：地膜覆盖保墒已成为盐渍化土壤种植中重要的农艺措施，而盐渍化与微塑料双重胁迫对土壤微生物的影响越来越受到重视. 为探究聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响，通过室内模拟盐渍化土壤环境中微塑料污染的方法，探究不同类型(氯盐类和硫酸盐类)和不同含量(弱、中、强)的盐渍化土壤赋存不同丰度聚乙烯(PE)微塑料(土样干重的1%和4%)条件下对土壤微生物群落的影响. 结果表明，PE微塑料会降低盐渍化土壤微生物群落多样性和丰富度，且硫酸盐类盐渍土处理受到的影响更强烈. 赋存PE微塑料后不同处理微生物组成基本一致，但其相对丰度会发生变化，硫酸盐类盐渍土处理中各菌群相对丰度的变化较氯盐类盐渍土处理更强；门水平上，变形菌门相对丰度与赋存PE微塑料丰度呈正相关，而拟杆菌门、放线菌门和酸杆菌门相对丰度与赋存PE微塑料丰度呈负相关；科水平上，黄杆菌科、食碱菌科、盐单胞菌科和鞘脂单胞菌科相对丰度随赋存PE微塑料丰度增大而增大. KEGG代谢通路预测显示，赋存PE微塑料会降低微生物新陈代谢和遗传信息等功能相对丰度，硫酸盐类盐渍土对新陈代谢功能的抑制作用强于氯盐类盐渍土，而对遗传信息功能的抑制效果弱于氯盐类盐渍土；新陈代谢功能二级通道中氨基酸代谢、碳水化合物代谢、能量代谢等功能受到抑制，推测新陈代谢功能的降低可能是由于上述二级代谢通路相对丰度降低引起的. 试验结果可为微塑料和盐渍化双重污染条件下对土壤环境的影响研究提供理论依据.

关键词：聚乙烯微塑料(PE MPs)；盐渍化土壤；微生物；组成和多样性；功能
中图分类号：X172 **文献标识码：**A **文章编号：**0250-3301(2024)05-3088-10 **DOI：**10.13227/j.hjkx.202305246

Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils

WANG Zhi-chao[1,2]，LI Zhe[1,2]，LI Jia-chen[1,2]，QU Zhong-yi[1,2]，YANG Wen-huan[1,2]，LI Wei-ping[1,2*]
(1. School of Energy and Environment，Inner Mongolia University of Science and Technology，Baotou 014010，China；2. Autonomous Region Level Ecological Protection and Comprehensive Utilization Cooperative Innovation Center for the Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin，Baotou 014010，China)

Abstract：Mulching to conserve moisture has become an important agronomic practice in saline soil cultivation，and the effects of the dual stress of salinity and microplastics on soil microbes are receiving increasing attention. In order to investigate the effect of polyethylene microplastics on the microbial community of salinized soils，this study investigated the effects of different types (chloride and sulphate) and concentrations (weak，medium，and strong) of polyethylene (PE) microplastics (1% and 4% of the dry weight mass of the soil sample) on the soil microbial community by simulating microplastic contamination in salinized soil environments indoors. The results showed that：PE microplastics reduced the diversity and abundance of microbial communities in salinized soils and were more strongly affected by sulphate saline soil treatments. The relative abundance of each group of bacteria was more strongly changed in the sulphate saline soil treatment than in the chloride saline soil treatment. At the phylum level，the relative abundance of Proteobacteria was positively correlated with the abundance of fugitive PE microplastics，whereas the relative abundances of Bacteroidota，Actinobacteriota，and Acidobacteria were negatively correlated with the abundance of fugitive PE microplastics. At the family level，the relative abundances of Flavobacteriaceae，Alcanivoracaceae，Halomonadaceae，and Sphingomonasceae increased with increasing abundance of PE microplastics. The KEGG metabolic pathway prediction showed that the relative abundance of microbial metabolism and genetic information functions were reduced by the presence of PE microplastics，and the inhibition of metabolic functions was stronger in sulphate saline soils than in chloride saline soils，whereas the inhibition of genetic information functions was weaker than that in chloride saline soils. The secondary metabolic pathways of amino acid metabolism，carbohydrate metabolism，and energy metabolism were inhibited. It was hypothesized that the reduction in metabolic functions may have been caused by the reduced relative abundance of the above-mentioned secondary metabolic pathways. This study may provide a theoretical basis for the study of the effects of microplastics and salinization on the soil environment under the dual pollution conditions.

Key words：polyethylene microplastics(PE MPs)；salinized soil；microbes；composition and diversity；function

我国盐渍化土地面积达 3.6×10^7 hm^2，占可用耕地的5%左右，具有面积大、分布范围广和扩张速度快的特点[1]. 尤其是在中国西北部的内陆干旱区，盐渍化土壤已经出现 2×10^6 hm^2，土壤盐渍化问题十分严重，成为制约中国西北地区农业和生态可持续发展的重要因素[2]. 土壤盐渍化是一种土壤理化和生物学性质恶化的过程，不仅严重影响耕地质量和粮食生产，同时也威胁着地区的生态环境安全[3]. 土壤盐渍化是易溶性盐分在土壤表层逐步积累的过程，受到多种因素的影响，其盐分含量还会制约土壤微生物群落的生长繁殖. 陈瑞蕊等[4]研究不同盐度滨海土壤细菌多样性发现，盐度是细菌群落构建过程的主控因子. 赵峰[5]研究盐渍化土壤中真核微生物多样

收稿日期：2023-05-28；**修订日期：**2023-08-11
基金项目：国家自然科学基金项目(42007119)；内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目；内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT22066)

作者简介：王志超(1988~)，男，博士，副教授，主要研究方向为微塑料的环境效应研究，E-mail：wzc5658@126.com
* 通信作者，E-mail：sjlwp@163.com

性发现，内陆盐碱土壤中真核微生物多样性低于滨海盐碱土壤多样性．部分微生物通过自身的适应策略对一定程度的盐度具有耐受性，但其耐受性存在一定的阈值，超过阈值后，其活性还会受到限制[6]．

微塑料（MPs）污染作为新型土壤污染问题，是全球共同面临的严峻挑战，其对生态系统的威胁及潜在风险，已成为当前土壤污染防治领域的研究热点．有研究表明，微塑料自身所携带的有害物质会向土壤释放[7]．例如，其中所含的双酚A和邻苯二甲酸酯等释放到土壤中，会抑制土壤微生物活性．Wang等[8]研究发现微塑料还会对丛枝菌根真菌的群落结构和多样性产生影响，且与微塑料种类有关，其中高密度聚乙烯（HDPE）产生的影响更显著．微塑料进入土壤后会通过改变碳源、添加剂和附着化学物质的含量影响土壤微生物群落，如邻苯二甲酸盐、双酚A、重金属等和微塑料所含添加剂，会抑制土壤微生物活性，进而对微生物的增殖和生长产生影响[9]．微塑料还会影响土壤微生物的潜在功能，Huang等[10]通过高通量测序发现微塑料会强化氨基酸代谢途径和外源生物降解代谢途径．不同种类的微塑料对氮转化过程存在不同的影响[11]，聚氨酯泡沫（PUF）和聚乳酸（PLA）可促进硝化和反硝化过程，而PVC则抑制这两种过程．Ng等[12]研究发现低浓度低密度聚乙烯（LDPE）微塑料提高了土壤好氧和厌氧代谢速率，但低浓度LDPE和聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）对土壤代谢速率无显著影响．

据统计，河套灌区农用地膜年使用量已达4.9万t，并呈现逐年递增的趋势，但其回收率仅有60%左右，平均残留量为84 kg·hm^{-2}．地膜残留在土壤中不断累积会加深土壤的微塑料污染现状[13]，盐渍化与微塑料双重污染下会导致土壤生态风险加重．目前，微塑料已经在几种土壤类型开展相关研究，包括重金属污染土壤、森林土壤和酸性作物土壤等[14 ~ 16]，但微塑料污染对于盐渍化土壤的影响研究还较为匮乏．因此，本研究在前期研究基础上，通过室内模拟的方法，探究聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响，揭示盐渍化和微塑料污染下的潜在微生物生态效应，以期为微塑料对盐渍化土壤污染的生态风险评估提供理论依据．

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试土样：为使原状土壤中微塑料丰度的本底值最低，本实验土壤采集于内蒙古自治区河套灌区中未进行播种且较少有人工干预的地下50~150 cm的土壤作为样本．为确保实验土壤均质，将所取土壤样本剔除大块掺杂物和石头，进行自然风干后使用玛瑙材质的研钵进行砸碎研磨，再通过2 mm筛子进行筛分．

供试微塑料：为尽可能模拟盐渍化土壤微塑料污染现状，本实验采用农用地膜材料的主要成分聚乙烯（polyethylene，PE）为供试微塑料[17,18]．供试微塑料为江苏飞弘塑化有限公司制造，PE微塑料粒径为150 μm，密度为0.95 g·cm^{-3}，抗弯强度为80 kg·cm^{-2}，熔点为132 ℃，形状为无规则球状．

1.2　盐渍土配置

在自然界的盐渍土中含有多种盐分，其含量差异很大且存在一定的影响，因此在盐渍土赋存条件下，各种盐分对土壤的影响很难研究，结果也很难分析[19]．通过查阅已有研究[20,21]，中国西北地区盐渍土所含盐类主要有氯盐及硫酸盐，故本模拟实验采用氯盐和硫酸盐这两类较为典型的盐类．为较明显地对这两种盐渍土进行对比，根据盐渍土分类（表1）[22]，按流程配制含盐量（质量分数）为0.5%、4%和7%的土壤（图1），分别模拟弱、中和强这3类盐渍土．

表1　盐渍土分类

Table 1　Classification of saline soil

盐渍土名称	弱盐渍土	中盐渍土	强盐渍土
氯化物和硫酸盐氯化物/%	0.3~1	1~5	5~8

1.3　实验方法

按照盐渍土类型和含量，设置6组实验组．根据已有土壤中微塑料含量调查研究[23]，每组进行不同丰度聚乙烯（PE）微塑料赋存处理，共4种丰度处理（土样干重的0%、1%、2%和4%），设置不添加盐类和微塑料的实验土样作为空白对照组CK，对其进行理化指标检测，检测结果（表2）发现赋存丰度为1%和4%的PE微塑料对盐渍化土壤理化性质的影响较为突出，故选取赋存丰度为1%和4%的PE微塑料处理（表3）．每个处理下取5 kg供试土壤于花盆中培育，按比例将不同丰度的微塑料添加到供试土壤中，并用不锈钢勺将微塑料与土壤均匀混合．于27℃（恒温培育箱）进行培育，在第60 d对各处理采用五点取样法进行取样，用于高通量测序分析．

1.4　土壤微生物群落的高通量测序

提取培养60 d后的土壤样品进行细菌群落分析，采用CTAB从样品中提取基因组DNA．用515F（5′-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3′）和907R（5′-CC

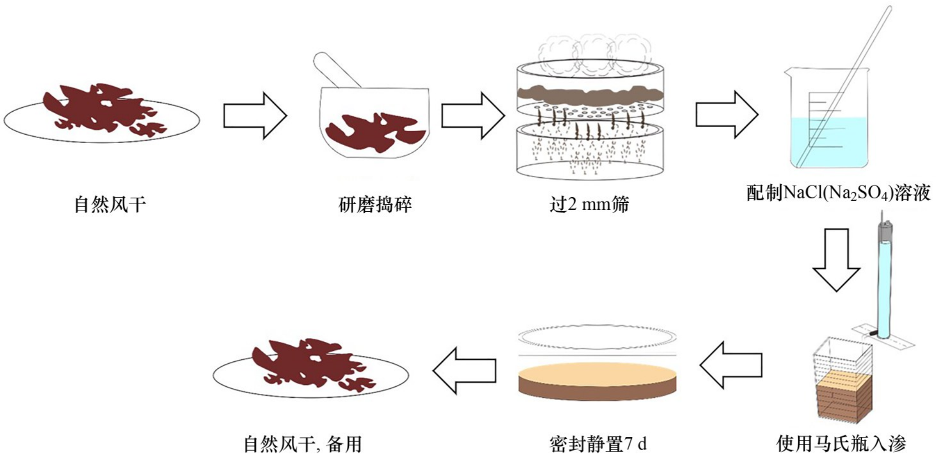

图 1　盐渍土配制流程示意

Fig 1　Saline soil preparation process

表 2　盐渍化土壤微塑料污染前后实验理化指标检测结果

Table 2　Results of experimental physicochemical indexes before and after microplastic contamination of salinized soils

实验土样	处理编号	盐类型	微塑料相对丰度/%	处理前后土壤样品理化数据(前/后)			
				含水率/%	pH	ω(TOC)/g·kg^{-1}	ω(TN)/g·kg^{-1}
空白	CK	无	0	10.12/22.46	6.85/7.31	20.44/18.13	0.611/0.599
弱氯盐类盐渍土(质量分数 0.5%)	LC	NaCl	0	13.24/23.53	7.23/7.89	19.76/16.16	0.613/0.584
	LC1	NaCl	1	12.64/22.48	7.23/7.91	20.31/15.89	0.611/0.56
	LC2	NaCl	2	12.20/21.68	7.23/7.77	20.74/13.76	0.607/0.545
	LC3	NaCl	4	11.84/21.07	7.23/7.35	21.45/12.56	0.587/0.491
中氯盐类盐渍土(质量分数 4%)	MC	NaCl	0	14.47/23.85	7.61/8.71	18.13/14.49	0.596/0.538
	MC1	NaCl	1	13.77/22.75	7.61/8.51	18.61/13.96	0.584/0.0.489
	MC2	NaCl	2	13.18/21.82	7.61/8.25	18.80/11.57	0.584/0.494
	MC3	NaCl	4	12.81/21.33	7.61/7.89	19.65/9.96	0.563/0.461
强氯盐类盐渍土(质量分数 7%)	HC	NaCl	0	14.73/24.33	8.16/9.22	16.84/12.39	0.555/0.471
	HC1	NaCl	1	14.24/23.47	8.16/9.01	17.22/11.44	0.538/0.476
	HC2	NaCl	2	13.84/22.82	8.16/8.66	17.41/8.43	0.517/0.446
	HC3	NaCl	4	13.64/22.53	8.16/8.25	17.89/6.55	0.506/0.396
弱硫酸盐类盐渍土(质量分数 0.5%)	LS	Na_2SO_4	0	13.07/23.24	7.42/8.67	19.49/15.38	0.604/0.571
	LS1	Na_2SO_4	1	12.48/22.20	7.42/8.35	19.98/14.84	0.591/0.532
	LS2	Na_2SO_4	2	12.04/21.41	7.42/8.14	20.21/12.1	0.593/0.52
	LS3	Na_2SO_4	4	11.69/20.81	7.42/7.71	20.76/10.28	0.575/0.473
中硫酸盐类盐渍土(质量分数 4%)	MS	Na_2SO_4	0	14.13/23.29	7.73/8.9	17.14/12.77	0.587/0.521
	MS1	Na_2SO_4	1	13.24/22.22	7.73/8.61	17.62/12.43	0.566/0.486
	MS2	Na_2SO_4	2	12.76/21.36	7.73/8.46	17.78/9.84	0.537/0.443
	MS3	Na_2SO_4	4	12.59/20.87	7.73/8.00	18.11/7.56	0.512/0.406
强硫酸盐类盐渍土(质量分数 7%)	HS	Na_2SO_4	0	14.21/23.47	8.41/9.4	15.75/10.95	0.521/0.429
	HS1	Na_2SO_4	1	13.78/22.64	8.41/9.14	16.27/10.04	0.533/0.439
	HS2	Na_2SO_4	2	13.35/22.01	8.41/8.94	16.44/8.44	0.509/0.428
	HS3	Na_2SO_4	4	13.19/21.73	8.41/8.52	16.96/4.61	0.484/0.369

GTCAATTCCTTTGAGTTT-3′)引物对 V4+V5 可变区进行 PCR 扩增. 按照产物的浓度将样品均匀混合, 使用 1 × TAE 2% 浓度的琼脂糖凝胶电泳进行纯化 PCR. 用 NEB Next® Ultra DNA Library Prep Kit 建库试剂盒进行文库构建, 将构建好的文库使用安捷伦 5400 进行检测和 Q-PCR 定量; 最后利用 NovaSeq 6000进行高通量测序.

1.5　数据处理与分析

用 Qiime2 的 DADA2 插件对所有样品的全部原始序列(imput)进行质量控制(filtered), 去噪(纠正测序错误的序列, denoised), 拼接(merged), 并且取嵌合体(non-chimeric), 形成 ASV. 运用 QIIME2 feature-classifier 插件将 ASV 的代表序列比对到预先训练好的 13_8 版本 99% 相似度的 GREENGENES 数

表3 盐渍化土壤微塑料污染模拟实验设置[1)]

Table 3 Simulation experiment setting of microplastic pollution in salinized soil

实验土样	处理编号	盐类型	添加微塑料类型	添加微塑料丰度/%
空白	CK	—	—	—
弱氯盐类盐渍土（质量分数0.5%）	LC1	NaCl	聚乙烯	1
	LC3	NaCl	聚乙烯	4
中氯盐类盐渍土（质量分数4%）	MC1	NaCl	聚乙烯	1
	MC3	NaCl	聚乙烯	4
强氯盐类盐渍土（质量分数7%）	HC1	NaCl	聚乙烯	1
	HC3	NaCl	聚乙烯	4
弱硫酸盐类盐渍土（质量分数0.5%）	LS1	NaCl	聚乙烯	1
	LS3	NaCl	聚乙烯	4
中硫酸盐类盐渍土（质量分数4%）	MS1	Na_2SO_4	聚乙烯	1
	MS3	Na_2SO_4	聚乙烯	4
强硫酸盐类盐渍土（质量分数7%）	HS1	Na_2SO_4	聚乙烯	1
	HS3	Na_2SO_4	聚乙烯	4

1)“—”表示实验土样中不添加盐和微塑料

据库（根据515F/907R引物对将数据库修剪到V4-V5的区域），得到物种的分类信息表，统计各样品的群落组成和多样性，运用Origin 2021进行制图.根据OTU表，采用PICRUSt2对获取的16S rRNA基因序列在KEGG数据库（kyoto encyclopedia of genes and genomes，京都基因和基因组百科全书，http：//www.genome.jp/kegg/）中进行微生物功能预测.

2 结果与讨论

2.1 聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落多样性的影响

在本实验中得到有效序列信息共包含过滤后高质量序列1 108 972条，平均每个样本85 306条序列，样本序列数目最小的为78 936条，最大序列数目为91 607条.高通量测序结果采用DADA2插件对所有样品的全部原始序列进行处理形成ASV，相当于100%相似度聚类的OTU，即所有样品Coverage指数为1，说明样本中的细菌序列全部被检出，测序结果可以反映样本的真实性.Chao1指数被用来反映微生物丰富度，其值越大表示微生物丰富度就越高；Simpson和Shannon指数用来反映微生物群落多样性，Simpson指数越大表示微生物群落多样性就越高，而Shannon指数越大表示微生物多样性就越高[24,25].

不同类型和含量盐渍土赋存不同PE丰度微塑料后微生物Alpha多样性的影响见表4.在丰富度方面，各处理Chao1指数与CK对照组Chao1指数呈现显著差异（$P < 0.01$），Chao1指数随盐分含量和赋存PE微塑料丰度的增大呈下降趋势，对于氯盐类盐渍土的各处理（LC1、LC3、MC1、MC3、HC1和HC3）下降率分别为13.73%、24.56%、22.91%、45.41%、48.98%和63.74%（$P < 0.01$）；对于硫酸盐类盐渍土的各处理（LS1、LS3、MS1、MS3、HS1和HS3）下降率分别为12.69%、25.63%、37.68%、45.67%、57.39%和65.90%（$P < 0.01$）.在多样性方面，对于Simpson指数，各处理的Simpson指数与CK间无显著差异；对于Shannon指数，各处理Shannon指数与CK对照组Shannon指数均有显著性差异，对于氯盐类盐渍土的各处理（LC3、MC1、MC3、HC1和HC3）较CK对照组下降率分别为2.03%、4.02%、8.81%、11.81%和17.99%（$P < 0.01$）；对于硫酸盐类盐渍土的各处理（LS3、MS1、MS3、HS1和HS3）较CK对照组下降率分别为2.85%、5.74%、9.30%、13.08%和18.98%（$P < 0.01$）.

硫酸盐类盐渍土各处理Chao1指数下降率较氯盐类盐渍土各处理Chao1指数下降率高0.49% ~ 1.72%（$P < 0.01$），这与张慧敏等[26]的研究结果一致，这可能是不同类型盐渍土对土壤环境的影响不同导致的.已有研究发现盐渍化土壤较其他非盐渍化土壤Chao1指数低，即盐分含量对Chao1指数与盐分含量呈负相关，同时土壤中赋存PE微塑料后，土壤中Chao1与赋存微塑料丰度呈负相关[27]，说明盐渍土在微塑料赋存条件下会加重对微生物丰富度的抑制.赋存不同丰度PE微塑料后，微塑料对酶活性会产生影响[28]，会造成微生物群落丰富度持续下降.本研究对于微生物多样性方面，LC1和LS1处理与CK对照组Shannon指数相比，上升0.46%和0.14%，其余处理均呈现出下降趋势，这与Yuan等[27]的研究结果略有不同.不同盐渍化程度土壤Shannon指数与土壤盐度呈负相关[29]，LC1和LS1处理Shannon指数较CK对照处理高的结果是由于低密度PE微塑料可以改变土壤中微生物群落，加快了土壤微生物群落

表 4　不同类型和浓度盐渍土赋存不同丰度 PE 微塑料后微生物群落 Alpha 多样性的影响

Table 4　Effect of different types and concentrations of saline soils on the Alpha diversity of the microbial community following the assignment of different abundances of PE microplastics

项目	Chao1 指数	Simpson 指数	Shannon 指数
CK	1 685.705 4	0.900 62	8.926 9
LC1	1 454.258 9	0.900 31	8.968 1
LC3	1 271.702 7	0.902 00	8.745 4
MC1	1 299.439 0	0.903 38	8.567 5
MC3	920.187 5	0.905 46	8.140 6
HC1	860.075 9	0.907 38	7.872 5
HC3	611.314 6	0.911 61	7.320 9
LS1	1 471.805 3	0.899 22	8.938 8
LS3	1 253.679 1	0.902 22	8.672 1
MS1	1 050.455 6	0.904 22	8.414 5
MS3	915.785 7	0.906 69	8.096 7
HS1	718.282 8	0.909 30	7.759 2
HS3	574.842 5	0.913 56	7.232 3

多样性演替[30].

2.2　聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落结构组成的影响

赋存不同丰度 PE 微塑料对不同类型和浓度盐渍土细菌在门水平群落组成的影响不同，具体表现为不同处理优势菌门种类相同，但赋存不同丰度 PE 微塑料后会改变各菌门相对丰度. 图 2 为不同处理中丰度排名前 12 的细菌门，占所有序列读数的 97.67% ~ 99.41%，其余菌门被归类为“其他菌门(Others)”. 其中变形菌门(Proteobacteria，34.76% ~ 63.62%，相对丰度，下同)、拟杆菌门(Bacteroidota，12.60% ~ 25.46%)和放线菌门(Actinobacteriota，7.69% ~ 13.02%)是所有处理中的优势菌，其次是芽单胞菌门(Gemmatimonadetes，0.98% ~ 8.07%)、绿弯菌门(Chloroflexi，4.58% ~ 8.18%)和酸杆菌门(Acidobacteria，1.50% ~ 6.09%)等. 与 CK 对照组相比，各处理中变形菌门的相对丰度与盐分浓度和赋存 PE 微塑料丰度呈正相关，且硫酸盐类盐渍土中上升的程度更大(HS3 处理相对于 CK 对照组上升 28.87%). 拟杆菌门、放线菌门和酸杆菌门相对丰度基本与盐分浓度和赋存 PE 微塑料丰度呈负相关. 硫酸盐类盐渍土中拟杆菌门和酸杆菌门下降程度更大(HS3 处理相对于 CK 对照组拟杆菌门和酸杆菌门相对丰度分别下降 12.86% 和 4.59%)，氯盐类盐渍土中放线菌门下降程度更大(HC3 处理较 CK 对照组下降 4.07%). 本研究中也存在较为特殊的处理，赋存 1% PE 微塑料的中盐渍土拟杆菌门的相对丰度大于赋存 4% PE 微塑料的低盐渍土(MC1 处理较 LC3 处理高 1%、MS1 较 LS3 高 2.63%).

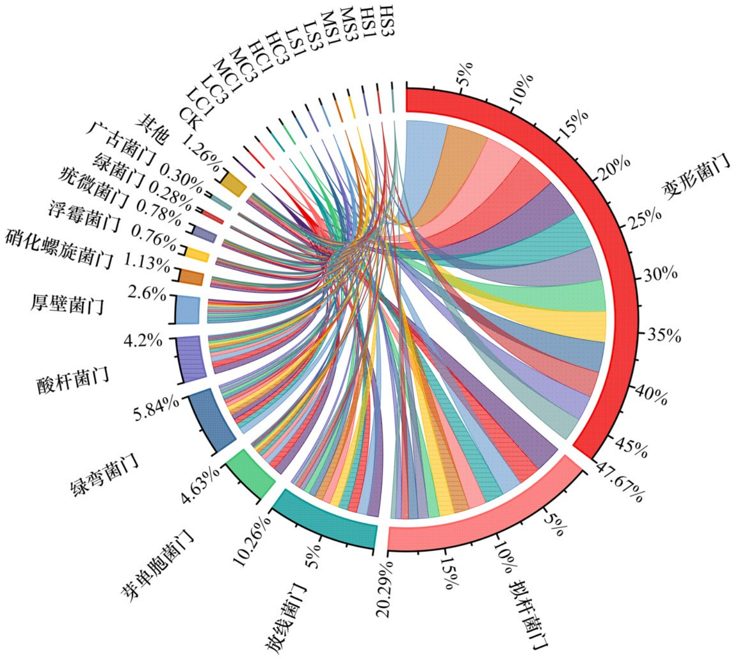

图 2　不同类型和浓度盐渍土赋存不同丰度 PE 微塑料后门水平上的物种相对丰度的变化

Fig. 2　Changes in the relative abundance of species at the backdoor level in saline soils of different types and concentrations endowed with different abundances of PE microplastics

氯盐类盐渍土中微生物丰度略高于硫酸盐类盐渍土微生物丰度[31]，Huang 等[32]研究发现土壤中赋存 PE 微塑料培养一段时间后变形菌门丰度显著上升，这与本研究的结果相似. 变形菌门是盐渍土中最常见的菌门，由许多耐盐细菌组成[33]，赋存不同丰度 PE 微塑料后，微生物生长所需的营养条件可能

受到影响，从而导致赋存微塑料实验组中变形菌门的相对丰度升高量更大．拟杆菌门对盐渍化环境具有较强的抗性，是盐渍化土壤中的优势种群[34]．本研究中赋存1% PE微塑料的中盐渍土拟杆菌门的相对丰度大于赋存4% PE微塑料的低盐渍土，可能是由于拟杆菌门对于中盐渍化土壤的抗性强于低盐渍化，同时低盐渍土还受到赋存4% PE微塑料的影响．本研究中拟杆菌门相对丰度下降的原因是拟杆菌门丰度与pH呈显著负相关[35]，根据表2中处理前后土壤样品pH值的变化发现不同类型和浓度盐渍土赋存不同丰度PE微塑料，其pH值均显著增加，故本研究中拟杆菌门相对丰度下降．本研究中各处理放线菌门与酸杆菌门相对丰度在赋存微塑料后基本呈现出下降趋势，可能是因为微塑料表面定殖的微生物群落会富集一些具有降解塑料聚合物的微生物种群[36]，例如放线菌门和酸杆菌门，微塑料对微生物群落的富集会导致土壤中微生物群落丰度降低．酸杆菌门具有嗜酸性，其生存受到环境中pH的影响，在本研究中酸杆菌门相对丰度的下降，也证实了本研究中不同类型和含量盐渍土中赋存不同丰度PE微塑料pH值的检测结果的有效性．

图3为不同类型和含量盐渍土赋存不同丰度PE微塑料后物种相对丰度大于1%的11种细菌科相对丰度的差异．结果显示不同处理相对丰度大于1%的菌科种类相同，但赋存不同丰度PE微塑料后会改变各菌科相对丰度，硫酸盐类处理影响强于氯盐处理．与CK对照组相比，黄杆菌科（Flavobacteriaceae，17.48%～44.44%）、食碱菌科（Alcanivoracaceae，12.31%～3.86%）、盐单胞菌科（Halomonadaceae，1.35%～2.43%）和鞘脂单胞菌科（Sphingomonadaceae，1.32%～2.59%）的相对丰度在不同类型和含量盐渍土赋存不同丰度PE微塑料后呈上升趋势．

Roager等[37]研究发现PE微塑料会加强黄杆菌科的定殖，故在本研究中黄杆菌科相对丰度在赋存不同丰度PE微塑料后呈现上升趋势．食碱菌科与鞘脂单胞菌科对多环芳香烃和芳香化合物等有降解作用，对土壤中污染物的降解体现出积极作用[38]，微塑料对土壤污染物具有吸附作用[39]，可能促进食碱菌科与鞘脂单胞菌科的代谢作用．同时，食碱菌科和鞘脂单胞菌科与PE微塑料呈现显著相关性[40]，这也解释了本研究中食碱菌科相对丰度在赋存不同丰度PE微塑料后上升的原因．盐单胞菌科中所含菌属大部分为耐盐细菌[41]，不同盐分含量盐渍土对其活性影响较小，故其相对丰度会有一定程度的上升，而微塑料对盐单胞菌科也存在富集作用[42]，故产生不同类型和含量盐渍土赋存不同丰度PE微塑料后呈上升趋势的结果．而在氯盐类盐渍土中以上3种菌科的上升趋势低于硫酸盐类盐渍土上升趋势，表明硫酸盐类环境中离子分布可能更加适合该菌科的生存．

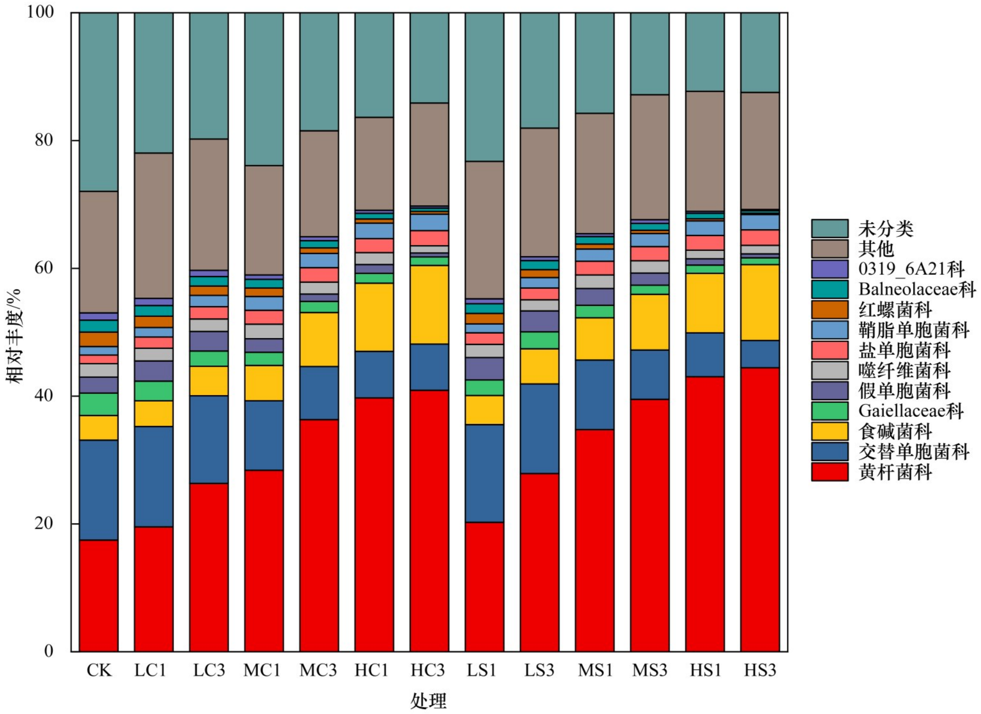

图3　不同类型和含量盐渍土赋存不同丰度PE微塑料后科水平上的物种相对丰度的变化

Fig. 3　Changes in the relative abundance of species at the family level after different types and concentrations of saline soils endowed with different abundances of PE microplastics

2.3 聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物功能的影响

使用PICRUST2软件，对各处理进行功能预测，根据KEGG数据库中得到的代谢通路中Level 1相对丰度(图4)和Level 2相对丰度(图5)进行分类分析．一级代谢通路分别是：新陈代谢(metabolism，70.22%～73.73%)、遗传信息(genetic information processing，9.08%～10.75%)、细胞过程(cellular processes，6.19%～7.75%)、人类疾病(human diseases，3.82%～9.78%)、环境信息(environmental information processing，2.36%～2.73%)和有机体系统(organismal systems，2.36%～2.39%)．二级代谢通路相对丰度大于1%的代谢通路有19种，其中新陈代谢功能的二级代谢通路中，包括：氨基酸代谢(amino acid metabolism，10.87%～11.65%)、碳水化合物代谢(carbohydrate metabolism，6.61%～8.84%)、其他氨基酸的代谢(metabolism of other amino acids，6.08%～6.61%)、能量代谢(energy metabolism，2.97%～4.09%)、多糖合成和代谢(glycan biosynthesis and metabolism，2.93%～2.05%)．通过对比不同处理的微生物功能相对丰度，发现不同类型和浓度盐渍土中赋存不同丰度PE微塑料对微生物功能的影响不同．一级代谢通路中对于新陈代谢功能相对丰度，氯盐类盐渍土的各处理(LC1、LC3、MC1、MC3、HC1和HC3)较CK对照组新陈代谢功能相对丰度下降0.92%、1.45%、1.18%、2.07%、1.82%和3.32%($P < 0.01$)；硫酸盐类盐渍土的各处理(LS1、LS3、MS1、MS3、HS1和HS3)较CK对照组新陈代谢功能相对丰度下降0.79%、1.60%、0.91%、2.59%、1.84%和3.52%($P < 0.01$)．对于遗传信息功能相对丰度，氯盐类盐渍土的各处理(LC1、LC3、MC1、MC3、HC1和HC3)较CK对照组新陈代谢功能相对丰度下降1.06%、1.45%、1.14%、1.56%、1.61%和1.76%($P < 0.01$)；硫酸盐类盐渍土的各处理(LS1、LS3、MS1、MS3、HS1和HS3)较CK对照组新陈代谢功能相对丰度下降1.45%、1.14%、1.34%、1.54%、1.50%和1.67%($P < 0.01$)．对于一级代谢通路新陈代谢功能和遗传信息功能的相对丰度，同种类型的盐渍土中盐分含量越大相对丰度下降越多，且赋存4%丰度PE微塑料的处理较赋存1%丰度PE微塑料的处理新陈代谢功能和遗传信息功能相对丰度下降得更多．硫酸盐类盐渍土较氯盐类盐渍土新陈代谢功能相对丰度的下降程度更大，但遗传信息功能相对丰度的下降程度较弱．

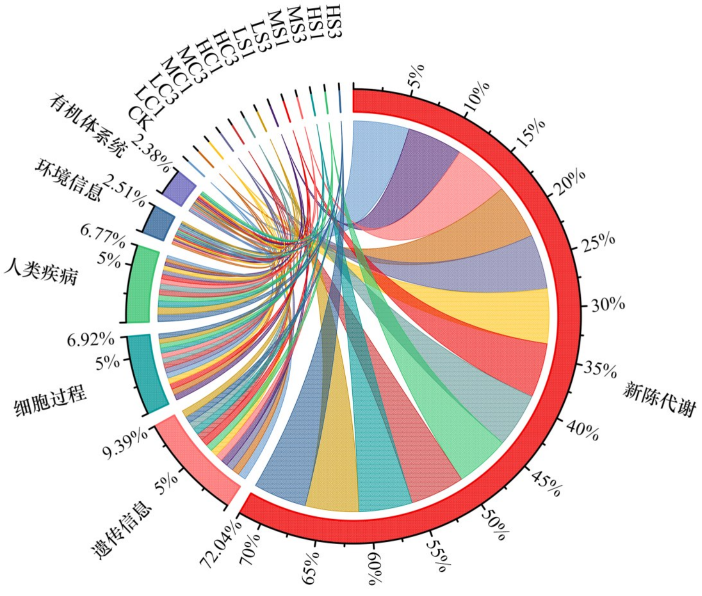

图4 各处理KEGG Level 1水平通路相对丰度

Fig 4 Each processing KEGG pathway relative abundance Level 1

二级代谢通路中各处理氨基酸代谢、碳水化合物代谢、其他氨基酸的代谢、能量代谢、多糖合成和代谢相对丰度较CK对照组均有所下降，氯盐类盐渍土的各处理(LC1、LC3、MC1、MC3、HC1和HC3)较CK对照组氨基酸代谢的相对丰度下降0.05%、0.26%、0.07%、0.43%、0.48%和0.67%($P < 0.01$)，碳水化合物代谢相对丰度下降0.63%、1.16%、1.23%、1.63%、1.88%和2.04%($P < 0.01$)，其他氨基酸的代谢相对丰度下降0.06%、0.23%、0.19%、0.42%、0.22%和0.47%($P < 0.01$)，能量代谢相对丰度下降0.21%、0.25%、0.40%、0.48%、0.55%和0.78%($P < 0.01$)；硫酸盐类盐渍土的各处理(LS1、LS3、MS1、MS3、HS1和HS3)较CK对照组氨基酸代谢相对丰度下降0.29%、0.37%、0.10%、

0.47%、0.62% 和 0.78%（$P < 0.01$），碳水化合物代谢相对丰度下降 0.82%、1.23%、1.23%、1.68%、1.85% 和 2.23%（$P < 0.01$），其他氨基酸的代谢相对丰度下降 0.04%、0.07%、0.16%、0.64%、0.95% 和 1.12%（$P < 0.01$），能量代谢相对丰度下降 0.26%、0.29%、0.46%、0.53%、0.64% 和 0.87%（$P < 0.01$）．根据以上结果发现，硫酸盐类盐渍土较氯盐类盐渍土氨基酸代谢、碳水化合物代谢、其他氨基酸的代谢、能量代谢、多糖合成和代谢的相对丰度下降程度更大，同种类型的盐渍土中盐分含量越大相对丰度下降越多，且赋存 PE 微塑料丰度越大越会抑制上述二级代谢功能的运作．

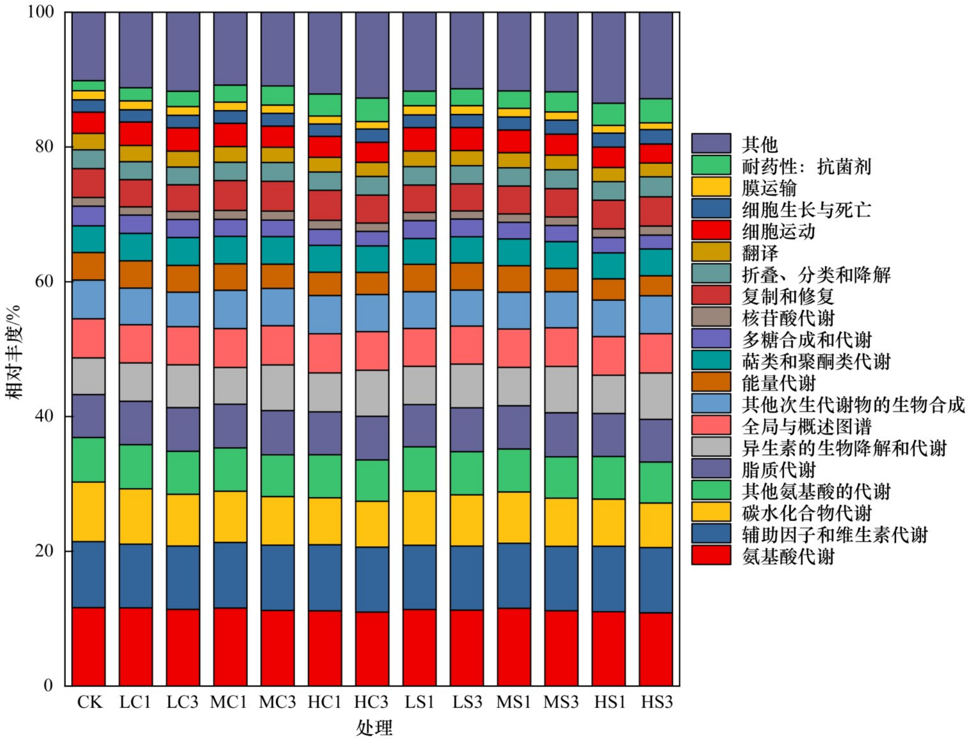

图 5　各处理 KEGG Level 2 水平通路相对丰度

Fig 5　Processing KEGG pathway relative abundance Level 2

土壤盐渍化会导致土壤失去肥力出现板结现象，抑制微生物新陈代谢相关酶活性[43]，进而降低微生物新陈代谢功能相对丰度．而赋存不同丰度的微塑料后，微生物环境中的营养成分会受到影响[44]，会加重对微生物新陈代谢功能相对丰度的影响，硫酸盐类盐渍土的新陈代谢功能相对丰度下降趋势大于氯盐类盐渍土可能是由于硫酸盐类盐渍土对土壤肥力的抑制作用强于氯盐类盐渍土的原因．蛋白质是遗传物质 DNA 的复制、转录的主要参与对象[45]，NaCl 会使蛋白质发生盐析且强度高于 Na_2SO_4[46]，故本研究中氯盐类盐渍土对遗传信息功能相对丰度的抑制效果大于硫酸盐类盐渍土．赋存不同丰度微塑料后，微塑料易与蛋白质发生相互作用，改变这些生物分子的二级结构[47]，导致蛋白质变性，使蛋白质不能发挥出原有的作用，影响微生物遗传信息功能的运作．微塑料还容易对环境中的重金属产生吸附作用，加重土壤重金属污染情况[48]，使土壤中蛋白质变性甚至失活，这可能也是本研究中微生物遗传信息功能相对丰度下降的原因之一．二级代谢通路中，氨基酸代谢、碳水化合物代谢、其他氨基酸的代谢、能量代谢、多糖合成和代谢对丰度呈现出随盐分浓度和赋存微塑料丰度增大而下降的趋势，说明微塑料新陈代谢功能的降低可能主要是由于以上这些二级通路相对丰度降低引起的．微生物群落功能预测是目前微生物研究中较为热门的研究方向，但是 PICRUST2 软件对微生物功能预测是建立在数据库的基础上，仍存在局限性，未来可与宏基因组技术相结合，对不同类型和含量盐渍土中赋存不同丰度微塑料对微生物群落功能的差异进行深入研究．

3　结论

（1）硫酸盐类盐渍土各处理 Chao1 指数下降率较氯盐类盐渍土各处理 Chao1 指数下降率高 0.49% ~ 1.72%（$P < 0.01$）．各处理 Shannon 指数与 CK 对照组对比 LC1 和 LS1 处理上升 0.46% 和 0.14%，其余处理均呈现出下降趋势，且硫酸盐类盐渍土处理 Shannon 指数下降值低于氯盐类盐渍土处理．

(2)在门水平，不同处理优势菌门相同，但相对丰度发生变化，且硫酸盐类盐渍土处理产生的影响程度更大：变形菌门的相对丰度随盐分浓度和赋存PE微塑料丰度的增大呈上升趋势；拟杆菌门、放线菌门和酸杆菌门的相对丰度水平随盐分含量和赋存PE微塑料丰度的增大呈下降趋势.在科水平，赋存不同丰度PE微塑料后黄杆菌科、食碱菌科、盐单胞菌科和鞘脂单胞菌科的相对丰度呈上升趋势，PE微塑料对硫酸盐类盐渍土影响强于氯盐类盐渍土.

(3)一级代谢通路中，新陈代谢功能、遗传信息功能与盐分含量和赋存PE微塑料丰度呈负相关关系，但对于新陈代谢功能和细胞过程功能PE微塑料对氯盐类盐渍土的影响弱于对硫酸盐类盐渍土的影响，遗传信息功能反之.二级代谢通路中，氨基酸代谢、碳水化合物代谢等相对丰度与盐分含量和赋存微塑料丰度呈负相关关系，推测新陈代谢功能的降低主要是由上述二级代谢通路相对丰度降低引起的.

参考文献：

[1] 范晓梅，刘高焕，唐志鹏，等.黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J].水土保持学报，2010，**24**(1)：139-144.
Fan X M，Liu G H，Tang Z P，*et al*. Analysis on main contributors influencing soil salinization of Yellow River Delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation，2010，**24**(1)：139-144.

[2] 孙小茹.近四十年河套平原土壤盐渍化时空变异及其影响因素分析[D].武汉：华中农业大学，2022.
Sun X R. Spatial-temporal variability of soil salinization and its influencing factors in Hetao plain in recent 40 years[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2022.

[3] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报，2008，**45**(5)：837-845.
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica，2008，**45**(5)：837-845.

[4] 陈瑞蕊，张建伟，董洋，等.盐度对滨海土壤细菌多样性和群落构建过程的影响[J].应用生态学报，2021，**32**(5)：1816-1824.
Chen R R，Zhang J W，Dong Y，*et al*. Effects of salinity on soil bacterial diversity and assembly processes in coastal soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2021，**32**(5)：1816-1824.

[5] 赵峰.盐碱地和近海沉积物中真核微生物多样性及与环境的关系[D].青岛：中国科学院海洋研究所，2013.
Zhao F. Microeukaryotic diversity in relation to environmental variables in saline-alkali soil and marine sediment[D]. Qingdao：Institute of Oceanology，Chinese Academy of Sciences，2013.

[6] Rath K M，Fierer N，Murphy D V，*et al*. Linking bacterial community composition to soil salinity along environmental gradients[J]. The ISME Journal，2019，**13**(3)：836-846.

[7] Wang J，Lv S H，Zhang M Y，*et al*. Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils [J]. Chemosphere，2016，**151**：171-177.

[8] Wang F Y，Zhang X Q，Zhang S Q，*et al*. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil [J]. Chemosphere，2020，**254**，doi：10.1016/j. chemosphere. 2020. 126791.

[9] Teuten E L，Saquing J M，Knappe D R U，*et al*. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B：Biological Sciences，2009，**364**(1526)：2027-2045.

[10] Huang S，Guo T，Feng Z，*et al*. Polyethylene and polyvinyl chloride microplastics promote soil nitrification and alter the composition of key nitrogen functional bacterial groups[J]. Journal of Hazardous Materials，2023，**453**，doi：10.1016/J. JHAZMAT. 2023.131391.

[11] Seeley M E，Song B，Passie R，*et al*. Microplastics affect sedimentary microbial communities and nitrogen cycling[J]. Nature Communications，2020，**11**（1），doi：10.1038/s41467-020-16235-3.

[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] 谢洁芬，章家恩，危晖，等.土壤中微塑料复合污染研究进展与展望[J].生态环境学报，2022，**31**(12)：2431-2440.
Xie J F，Zhang J E，Wei H，*et al*. Microplastic-based compound pollution in soil：an overview [J]. Ecology and Environmental Sciences，2022，**31**(12)：2431-2440.

[14] Liu S，Huang J H，Zhang W，*et al*. Investigation of the adsorption behavior of Pb(Ⅱ) onto natural-aged microplastics as affected by salt ions[J]. Journal of Hazardous Materials，2022，**431**，doi：10.1016/j.jhazmat.2022.128643.

[15] Feng X Y，Wang Q L，Sun Y H，*et al*. Microplastics change soil properties，heavy metal availability and bacterial community in a Pb-Zn-contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials，2022，**424**，doi：10.1016/j.jhazmat.2021.127364.

[16] Chen C，Pan J Y，Xiao S X，*et al*. Microplastics alter nitrous oxide production and pathways through affecting microbiome in estuarine sediments [J]. Water Research，2022，**221**，doi：10.1016/J.WATRES.2022.118733.

[17] Fang J M，Fowler P. The use of starch and its derivatives as biopolymer sources of packaging materials [J]. Journal of Food Agriculture & Environment，2003，**1**(3-4)：82-84.

[18] van der Meulen E S，Nol L，Cammeraat L H. Effects of irrigation and plastic mulch on soil properties on semiarid abandoned fields [J]. Soil Science Society of America Journal，2006，**70**（3）：930-939.

[19] 姚远，项伟.人工配制盐渍土溶陷变形分析[A].见：第九届全国工程地质大会论文集[C].青岛：中国地质学会工程地质专业委员会，2012. 89-94.

[20] 许婕，陈永金，刘加珍.盐生植物灌丛对土壤养分和盐分空间分布的影响及其机制研究进展[J].安徽农业科学，2020，**48**(1)：19-23，69.
Xu J，Chen Y J，Liu J Z. Research progress of the effects of halophyte shrubs on spatial distribution of soil nutrients and salts and their mechanisms[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2020，**48**(1)：19-23，69.

[21] 唐雄宇，张吾渝，高义婷，等.青海东西部典型盐渍土抗剪强度对比试验研究[J].青海大学学报，2021，**39**(4)：58-65.
Tang X Y，Zhang W Y，Gao Y T，*et al*. Comparative experiment on the shear strength of typical saline soil in eastern and western Qinghai[J]. Journal of Qinghai University，2021，**39**(4)：58-65.

[22] 王利莉.氯盐类盐渍土变形特性的试验研究[D].杨凌：西北农林科技大学，2009.
Wang L L. Experimental study on deformation characteristics of saline soils with chloride salts [D]. Yangling：Northwest Agriculture and Forestry University，2009.

[23] Fuller S，Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. Environmental Science & Technology，2016，**50**(11)：5774-5780.

[24] Hou J H，Xu X J，Yu H，*et al*. Comparing the long-term responses

of soil microbial structures and diversities to polyethylene microplastics in different aggregate fractions [J]. Environment International, 2021, **149**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106398.

[25] Guo Q Q, Xiao M R, Ma Y, *et al.* Polyester microfiber and natural organic matter impact microbial communities, carbon-degraded enzymes, and carbon accumulation in a clayey soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **405**, doi: 10.1016/j. jhazmat. 2020. 124701.

[26] 张慧敏, 郭慧娟, 侯振安. 不同盐碱胁迫对土壤细菌群落结构的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, **55**(6): 1074-1084.

Zhang H M, Guo H J, Hou Z A. Effects of saline and alkaline stress on soil bacterial community structure [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, **55**(6): 1074-1084.

[27] Yuan Y D, Zu M T, Li R Z, *et al.* Soil properties, microbial diversity, and changes in the functionality of saline-alkali soil are driven by microplastics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, **446**, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2022.130712.

[28] 丁峰, 赖金龙, 李晓晖, 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.

[29] 李新, 焦燕, 杨铭德. 用磷脂脂肪酸(PLFA)谱图技术分析内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤微生物群落多样性[J]. 生态科学, 2014, **33**(3): 488-494.

Li X, Jiao Y, Yang M D. Microbial diversity of different saline-alkaline soil analyzing by PLFA in the Hetao area of inner Mongolia [J]. Ecological Science, 2014, **33**(3): 488-494.

[30] 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.

[31] 迪力热巴·阿不都肉苏力, 穆耶赛尔·奥斯曼, 祖力胡玛尔·肉孜, 等. 盐碱土壤微生物多样性与生物改良研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, **37**(10): 225-233.

Abudurousuli D L R B, Aosiman M Y S E, Rouzi Z L H M E, *et al.* Progress of microbial diversity and bio-improvement of saline soil [J]. Biotechnology Bulletin, 2021, **37**(10): 225-233.

[32] 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.

[33] 孙慧, 张建锋, 许华森, 等. 余姚滨海不同盐碱度土壤微生物群落组成及土壤酶活性的变化[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(10): 3361-3370.

Sun H, Zhang J F, Xu H S, *et al.* Variations of soil microbial community composition and enzyme activities with different salinities on Yuyao coast, Zhejiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(10): 3361-3370.

[34] 牛世全, 龙洋, 李海云, 等. 应用Illumina MiSeq高通量测序技术分析河西走廊地区盐碱土壤微生物多样性[J]. 微生物学通报, 2017, **44**(9): 2067-2078.

Niu S Q, Long Y, Li H Y, *et al.* Microbial diversity in saline alkali soil from Hexi Corridor analyzed by Illumina MiSeq high-throughput sequencing system[J]. Microbiology China, 2017, **44**(9): 2067-2078.

[35] 乔沙沙, 周永娜, 刘晋仙, 等. 关帝山针叶林土壤细菌群落结构特征[J]. 林业科学, 2017, **53**(2): 89-99.

Qiao S S, Zhou Y N, Liu J X, *et al.* Characteristics of soil bacterial community structure in coniferous forests of Guandi mountains, Shanxi province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, **53**(2): 89-99.

[36] 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.

[37] Roager L, Sonnenschein E C. Bacterial candidates for colonization and degradation of marine plastic debris[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(20): 11636-11643.

[38] 程池, 杨梅, 李金霞, 等. Biolog微生物自动分析系统——细菌鉴定操作规程的研究[J]. 食品与发酵工业, 2006, **32**(5): 50-54.

Cheng C, Yang M, Li J X, *et al.* Biolog microbial identification system--study on the operating regulation of bacteria identification [J]. Food and Fermentation Industries, 2006, **32**(5): 50-54.

[39] 郑阳, 王娟, 查旭琼, 等. 微塑料对土壤污染物的吸附行为研究进展[J]. 广州化工, 2021, **49**(20): 13-15, 44.

Zheng Y, Wang J, Zha X Q, *et al.* Research progress on adsorption of soil pollutants by microplastics [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, **49**(20): 13-15, 44.

[40] Zettler E R, Mincer T J, Amaral-Zettler L A. Life in the "Plastisphere": microbial communities on plastic marine debris [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(13): 7137-7146.

[41] Arahal D R, García M T, Vargas C, *et al.* *Chromohalobacter salexigens* sp. nov., a moderately halophilic species that includes Halomonas elongata DSM 3043 and ATCC 33174[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2001, **51**(Pt 4): 1457-1462.

[42] Miao L Z, Wang P F, Hou J, *et al.* Distinct community structure and microbial functions of biofilms colonizing microplastics [J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2395-2402.

[43] 任丽洁. 金橙黄微小杆菌处理碱性废水土壤及其机理的初步研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

Ren L J. Treatments of alkaline waste water and soil by *Exiguobacterium* and their mechanism [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[44] 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 等. 微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4558-4565.

Zhang X L, Yan Z W, Wang F, *et al.* Effects of microplastics addition on soil organic carbon mineralization in citrus orchard[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4558-4565.

[45] 侯军华. 聚乙烯微塑料对土壤团聚体性质及微生物多样性影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.

Hou J H. Effects of polyethylene microplastics on soil aggregate properties and microbial diversity[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.

[46] 申玉香, 王爱民, 李洪山, 等. 盐分胁迫对宁盐1号小麦群体质量·产量及蛋白质含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(34): 14866-14868.

Shen Y X, Wang A M, Li H S, *et al.* Effects of salt stress on the mass-yield and protein content of Ningyan 1 wheat population[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, **36**(34): 14866-14868.

[47] Bandmann V, Müller J D, Köhler T, *et al.* Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis [J]. FEBS Letters, 2012, **586**(20): 3626-3632.

[48] Brennecke D, Duarte B, Paiva F, *et al.* Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, **178**: 189-195.

HUANJING KEXUE Vol. 45 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2024

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of $PM_{2.5}$ and O_3 in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition …… YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, *et al.* (2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest …… ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, *et al.* (2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model …… YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, *et al.* (2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model …… FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, *et al.* (2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020 …… GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, *et al.* (2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of $PM_{2.5}$ and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022 …… CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, *et al.* (2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in $PM_{2.5}$ Between Winter and Spring in Zhengzhou …… TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, *et al.* (2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of $PM_{2.5}$-bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City …… SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, *et al.* (2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution …… LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, *et al.* (2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin …… LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, *et al.* (2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of $PM_{2.5}$ Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect …… XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, *et al.* (2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China …… WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, *et al.* (2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang …… ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, *et al.* (2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis …… WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, *et al.* (2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season …… MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, *et al.* (2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing …… HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, *et al.* (2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section) …… LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, *et al.* (2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China) …… WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, *et al.* (2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River …… WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, *et al.* (2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets …… JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, *et al.* (2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water …… HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, *et al.* (2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir …… MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, *et al.* (2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals …… MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, *et al.* (2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System …… ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, *et al.* (2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater …… SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, *et al.* (2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing …… LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, *et al.* (2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin …… WANG Yi-qi, SUN Xue-ying (2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin …… CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, *et al.* (2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau …… LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, *et al.* (2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021 …… ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, *et al.* (2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios …… CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, *et al.* (2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration …… WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, *et al.* (2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China …… JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, *et al.* (2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses …… HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, *et al.* (2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm …… HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, *et al.* (2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields …… SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, *et al.* (2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity …… ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, *et al.* (2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System …… GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, *et al.* (2891)
Effect of Biochar on NO_3^--N Transport in Loessial Soil and Its Simulation …… BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, *et al.* (2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis …… YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, *et al.* (2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust …… WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, *et al.* (2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site …… CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, *et al.* (2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong …… DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, *et al.* (2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin …… HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, *et al.* (2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City …… YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping (2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models …… CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, *et al.* (2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China …… TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, *et al.* (2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province …… WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, *et al.* (3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China …… LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, *et al.* (3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice …… XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, *et al.* (3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper …… ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, *et al.* (3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis …… JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, *et al.* (3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N_2O Emissions and Nitrogen Transformation …… LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, *et al.* (3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin …… DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, *et al.* (3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay …… SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, *et al.* (3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils …… WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, *et al.* (3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China …… YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, *et al.* (3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang …… XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, *et al.* (3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck …… XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, *et al.* (3119)