

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

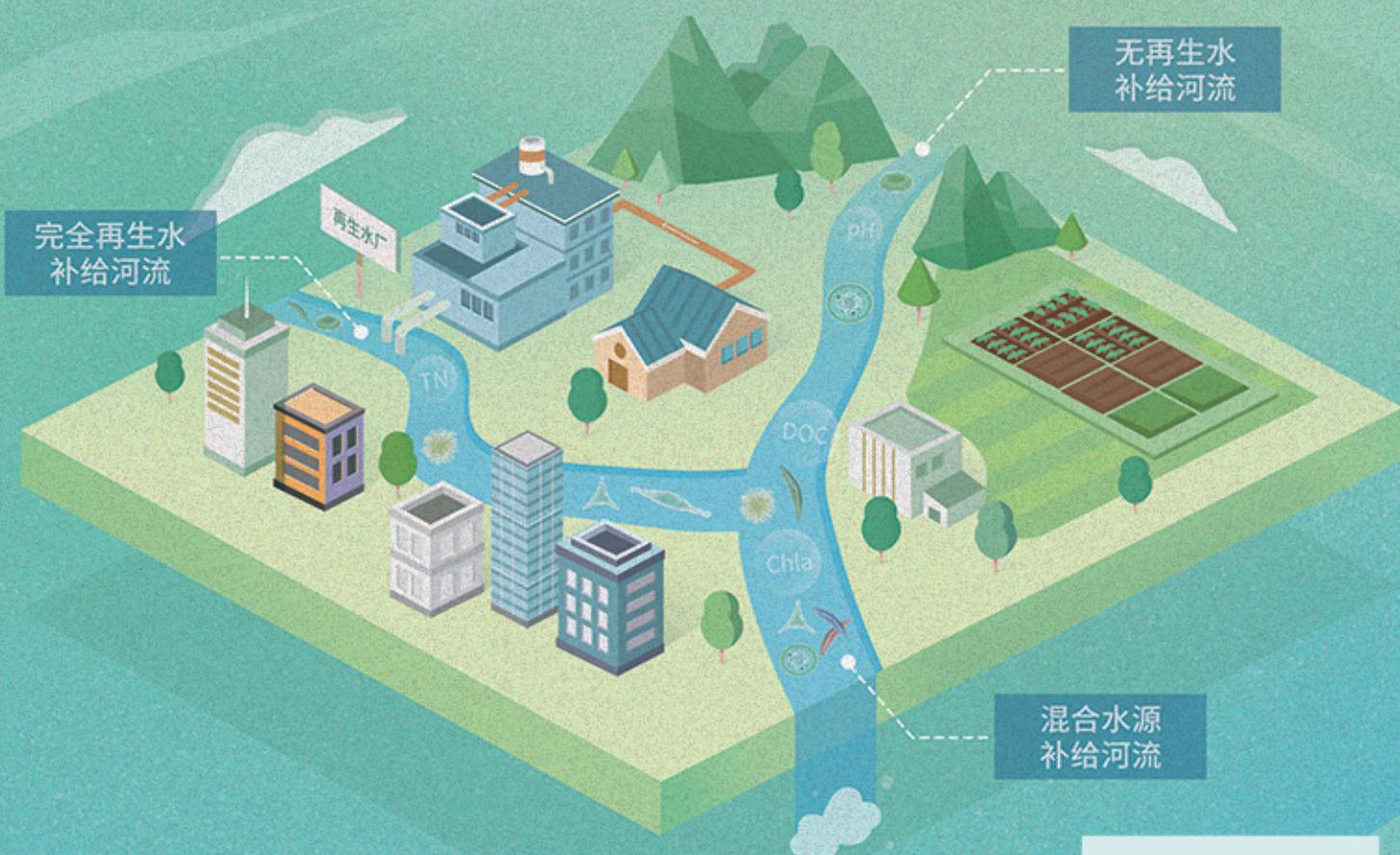
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C₃N₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉锌的影响

王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 不同生物之间存在复杂相互作用, 构建多元生物协同修复有利于提高修复效果. 微生物群落繁殖快, 适应性强以及抗逆性等优势在土壤重金属污染治理中发挥着重要作用. 以巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)为供试菌株, 以包心芥菜[*Brassica juncea* (L.) Czerniak.]为供试植物, 探究二者联合作用下修复 Cd 和 Zn 污染土壤的可行性. 首先开展 60 d 室内培养试验, 明确巨大芽孢杆菌活化土壤 Cd 和 Zn 含量的潜力及改善土壤质量的可行性; 进而通过盆栽试验探究巨大芽孢杆菌对包心芥菜富集重金属的影响. 结果表明室内培养条件下, 巨大芽孢杆菌能够显著降低土壤 pH 值, 土壤有效态 Cd 和 Zn 含量显著增加, 与对照相比, 增幅分别为 24%~47% 和 11%~13%; 同时土壤磷酸酶(ALP)、蔗糖酶(SU)和脲酶(UR)活性明显改善. 盆栽试验结果表明, 与对照相比, 接菌处理显著提高了包心芥菜生物量, 增幅为 10%~23%. 同时植物富集 Cd 和 Zn 含量升高: 植物地上和地下部分 Cd 富集浓度分别为对照组的 1.61~1.70 倍和 1.05~1.15 倍; 不同部位对 Zn 的富集浓度分别为对照的 1.38~1.61 倍和 1.47~1.53 倍. 相关性分析结果表明, 土壤 pH 值是引起土壤重金属有效态活性和酶活性改变的关键因素. 接菌处理下, 植物过氧化氢酶(CAT)活性对增强植物抗逆性更为显著. 试验结果初步证实了巨大芽孢杆菌-包心芥菜联合修复 Cd 和 Zn 污染土壤的可行性.

关键词: 巨大芽孢杆菌; 包心芥菜; 重金属; 土壤酶; 抗逆性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5798-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202201297

Effects of *Bacillus megaterium* on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant

WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, XU Ya-qiong, ZHANG Shu-qiang, LI Qian, XU Kai-li, LI Rong-hua, ZHANG Zeng-qiang*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The construction of a multi-organism synergistic system is beneficial to improve the effects of remediation because of the complex interaction among different organisms. Microbial communities, with the advantages of fast reproduction, strong adaptability, and stress tolerance, play an important role in the remediation of soil contaminated by heavy metals. *Bacillus megaterium* and mustard [*Brassica juncea* (L.) Czerniak.] were chosen to explore the feasibility for the remediation of soil contaminated with Cd and Zn. The results of the 60d indoor culture experiment showed that the soil pH value was significantly ($P < 0.05$) reduced by *Bacillus megaterium* compared with that in the control. The available contents of Cd and Zn were significantly ($P < 0.05$) increased by 24%-47% and 11%-13%, respectively. Meanwhile, the activities of soil alkaline phosphatase (ALP), sucrase (SU), and urease (UR) were improved considerably. Compared with that in the control, the addition of *Bacillus megaterium* significantly ($P < 0.05$) increased the biomass of the plant by 10%-23%. At the same time, the contents of Cd in the aboveground parts and roots of the plants were increased by 1.61-1.70 and 1.05-1.15 times than the control values and by 1.38-1.61 and 1.47-1.53 times for Zn contents, respectively. The inoculation of *Bacillus megaterium* significantly enhanced the activities of antioxidant enzymes in the plant. The subsequent correlation analysis suggested that soil pH was the key factor leading to changes in the availability of heavy metals and soil enzyme activities. Catalase (CAT) was the most significant antioxidant enzyme type that improved the resistance and growth of the plant under the heavy metal stress. This study preliminarily confirmed the feasibility of the combination of *Bacillus megaterium* and mustard for the remediation of soil contaminated with Cd and Zn.

Key words: *Bacillus megaterium*; mustard; heavy metals; soil enzymes; stress resistance

土壤是包括人类在内的大多数生物生存的物质基础. 社会经济发展和环境保护往往是矛盾的^[1,2]. 人口的增加和工业的迅猛发展所造成的包括土壤重金属污染在内的环境破坏问题越来越严重. 如何治理重金属污染土壤是摆在人类面前的重大挑战. 植物修复作为生物修复的一种, 被认为是绿色、环保和低成本的修复技术手段, 然而如何提高其修复效率是当前需要突破的瓶颈问题. 考虑到不同生物之间存在复杂的相互作用, 它们之间通过物质循环和能量传递呈现出对环境的适应性. 与单一的生物修复相比, 构建多元生物协同修复将更具有优势^[3].

微生物对重金属等有害物质表现出独特的耐性和解毒潜力^[4-6], 关于其对重金属污染土壤的修复作用正在被不断挖掘^[7-10]. 芽孢杆菌是一种常见的革兰氏阳性菌, 生长快且对环境适应性好, 抗逆性强, 逐渐被应用到环境治理领域^[11]. 其中, 巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)是一种解磷菌, 能够增加土壤养分含量, 促进植物生长, 并且能够增加土壤有益菌属和真菌的相对丰度, 抑制病原菌属^[12]. 已经

收稿日期: 2022-01-28; 修订日期: 2022-04-01

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2916KTCQ03-20)

作者简介: 王萍(1991~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤治理修复, E-mail: wang_ping_0224@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangzq58@126.com

证实巨大芽孢杆菌能够提高土壤重金属有效态含量,从而提高植物的修复效率^[13-17]. 但是缺少巨大芽孢杆菌对土壤理化性质的长期影响效果研究及其对增强植物修复效率的研究. 印度芥菜 (*Brassica juncea*) 被认定为 Cd 超富集植物. 但作为引进物种, 其对气候敏感, 很难在我国大面积种植^[18]. 芥菜是印度芥菜的近源植物, 在我国品种丰富, 生物量大, 生长周期短, 筛选出具有重金属耐性或高积累性的本土品种具有重要意义^[19]. 本课题组已经从常见的 21 个芥菜品种筛选发现, 包心芥菜 [*Brassica juncea* (L.) Czerniak.] 对 Cd 具有良好的耐性和富集性^[20], 但是其修复效率还有待提高.

因此, 本研究以巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*) 为供试菌株, 首先开展了接菌处理下为期两个月的土壤理化性质监测试验. 重点关注土壤 pH 值、有效态 Cd 和 Zn 含量及土壤酶活性变化. 进而在盆栽试验条件下研究接菌处理对土壤理化性质、包心芥菜的生长和吸收重金属的影响, 明确巨大芽孢杆菌-包心芥菜联合修复的实际应用价值.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自陕西省宝鸡市凤县某冶炼厂周边土壤 (33°56'57"N, 106°31'29"E), 采土深度为 0~20 cm. 将采集的土壤样品自然风干, 去除杂物后研磨过筛备用. 本试验所用基肥为课题组以猪粪和麦秸为主要原料腐熟发酵所得堆肥样品. 将堆肥样品磨碎过 60 目尼龙网筛备用. 供试巨大芽孢杆菌菌剂从广西农保生物工程有限公司购入. 供试土壤和堆肥样品基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤、堆肥基本理化性质¹⁾

参数	土壤	基肥 (堆肥)
pH	7.88 ± 0.13	8.07 ± 0.09
EC/μS·cm ⁻¹	281 ± 0.02	4 690 ± 10.89
ω(总 N)/g·kg ⁻¹	1.50 ± 0.28	25.5 ± 1.17
ω(总 P)/g·kg ⁻¹	0.860 ± 0.05	11.6 ± 0.35
ω(总 K)/g·kg ⁻¹	8.09 ± 0.77	14.7 ± 2.23
ω(总 Cd)/mg·kg ⁻¹	20.5 ± 1.83	ND
ω(总 Zn)/mg·kg ⁻¹	973 ± 11	497 ± 3
ω(有机质)/g·kg ⁻¹	9.28 ± 0.42	436 ± 7
ω(DTPA-Cd)/mg·kg ⁻¹	11.3 ± 1.21	ND
ω(DTPA-Zn)/mg·kg ⁻¹	264 ± 3	265 ± 7

1) ND 表示未检测出

1.2 试验设计

1.2.1 室内培养试验

将土壤样品装入塑料花盆 (高 12 cm, 直径 10 cm), 每盆 0.3 kg 土, 并加入 15 g (5%, 质量分数) 的

腐熟堆肥样品作为基肥 (为和后续盆栽土壤保持一致). 加水至田间持水量的 60%, 平衡两周进行后续试验. 分别将 1 mL 活菌量 (cfu·mL⁻¹) 为 1 × 10⁵ (T1)、1 × 10⁷ (T2) 和 1 × 10⁹ (T3) 的巨大芽孢杆菌原液用无菌水稀释至 20 mL, 均匀喷洒于各试验盆, 以加入无菌水的土壤作为对照 (CK). 每个处理设置 3 次重复. 置于恒温培养箱中培养两个月, 温度设置为 30℃. 培养期间, 称重法维持土壤含水量. 培养第 3、7、15、30 和 60 d 采集土壤样品 (约 15 g). 将采集的土样分为两部分: 一部分土样保存在 4℃ 冰箱用于测定土壤酶活性; 另一部分土样自然风干, 研磨过筛, 用于其他土壤理化指标的测定.

1.2.2 盆栽试验

盆栽试验在早棚内进行, 为期 60 d. 将 1.5 kg 土壤样品装入高 12 cm、直径 15 cm 的塑料花盆中, 并加入 75 g (5%, 质量分数) 的堆肥样品, 加入蒸馏水使含水量至田间持水量 60%. 将 5 mL 浓度为 1 × 10⁵ cfu·mL⁻¹ (T1)、1 × 10⁷ cfu·mL⁻¹ (T2) 和 1 × 10⁹ cfu·mL⁻¹ (T3) 巨大芽孢杆菌原液用无菌水稀释至 100 mL, 均匀喷洒于各试验盆, 以加入无菌水的土壤作为对照 (CK). 每个处理设置 3 次重复. 包心芥菜种子用 5% (体积分数) 的次氯酸钠 (NaClO) 溶液消毒后, 用去离子水冲洗干净, 挑选籽粒饱满的种子备用. 每盆播种 10 粒, 播种深度为 0.5~1.0 cm, 待幼苗长出 2~3 片真叶后, 每盆间苗为 3 株. 盆栽过程中用称重法定期补充水分, 且随机更换花盆的位置, 避免因外界条件 (例如光照) 造成的植物生长差异. 植物收获时, 采集每株植物相同部位, 长势、叶龄相近且有代表性的叶片, 测定叶绿素含量及抗氧化酶活性. 将采集的植物样品分地上和地下两部分, 地上部分用自来水冲洗后再用去离子水冲洗, 地下部分用自来水冲洗后再用 EDTA-2Na 溶液浸泡 30 min, 以去除根系表面的可交换态金属离子, 最后用去离子水冲洗干净. 将植物样品装入信封内于 105℃ 下杀青 30 min, 然后在 70℃ 下烘至恒重, 记录植物干重. 将植物样品研磨、密封保存待测. 采集植株样品同时采集根际土壤样品, 利用抖落法采集紧贴根表颗粒较细的土壤作为根际土壤^[21], 混合均匀后分成两部分, 后土壤样品处理方法同培养试验.

1.3 测定方法

土壤 pH 和 EC 分别用玻璃电极和电导率仪进行测定; 土壤总氮、磷和钾分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法 (外加热法) 测定; 土壤 Cd 和 Zn 总量用王水-高氯酸消解, AAS 测定; 土壤有效态 Cd 含量 (DTPA-Cd) 和有效态 Zn 含量 (DTPA-Zn) 采用

DTPA-TEA 浸提, AAS 法测定^[22]. 土壤碱性磷酸酶 (alkaline phosphatase, ALP) 采用磷酸苯二钠比色法测定; 土壤蔗糖酶 (sucrase, SU) 采用 3-5 二硝基水杨酸比色法测定; 土壤脲酶 (urease, UR) 采用靛酚比色法测定^[23]. 植物 Cd 和 Zn 含量采用 HNO_3 - HClO_4 消解, AAS 测定. 植物叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 采用氮蓝四唑光还原法; 过氧化物酶 (POD) 采用愈创木酚-分光光度法测定; 过氧化氢酶 (CAT) 采用紫外吸收法测定^[24]. 植物叶片丙二醛 (MDA) 采用硫代巴比妥酸 (TBA) 显色, 分光光度法测试; 叶绿素含量采用丙酮浸提, 分光光度法测定^[25]. 为保证测样准确性, 采用标准物质进行质量控制. 土壤和植物样品所采用的标准物质分别是 GBW07406 (GSS-6) 和 GBW10046 (GSB-24). 标准物质按照与样品一致的处理方式进行测定, 土壤和植物标准样品 Cd 回收率分别为 92%~108% 和 86%~102%; Zn 的回收率分别为 96%~110% 和 88%~104%.

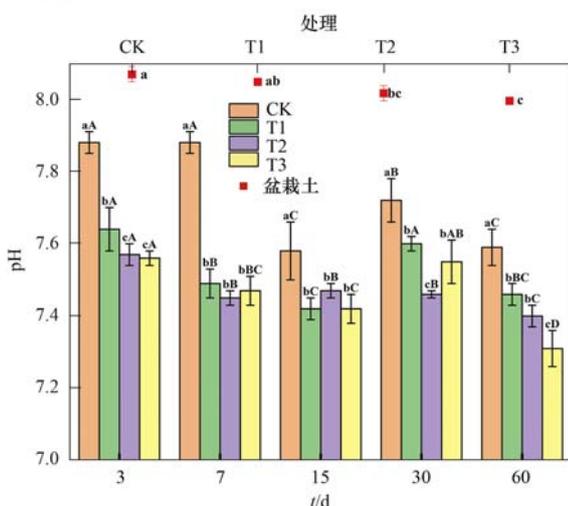
1.4 数据分析

所有原始数据采用 Microsoft Excel 2010 软件进行处理, 采用 IBM SPSS 19.0 软件在 $P < 0.05$ 水平对数据进行单因素方差分析, 检验各个处理间差异的显著性, 采用 Origin 2016 软件绘制图形.

2 结果与分析

2.1 巨大芽孢杆菌处理对土壤 pH 值的影响

图 1 为不同浓度巨大芽孢杆菌处理下土壤 pH



不同小写字母表示同一时间不同处理之间差异性显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一处理不同时间之间差异性显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同条件下 (室内培养和盆栽试验) 巨大芽孢杆菌对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effects of *Bacillus megaterium* on soil pH under the different conditions (indoor culture and pot experiment)

值变化情况. 在室内培养阶段, 在相同培养时期, 与 CK 相比, 不同浓度巨大芽孢杆菌处理土壤 pH 值均显著降低, 并且降低幅度与添加浓度正相关. 培养结束时 (第 60 d), 与 CK 相比, 土壤 pH 值最大降幅为 0.28 个单位, 在处理为 T3 时取得. 在接种菌液初期 (第 3 d), 土壤 pH 值变化显著, 对照土壤 pH 值则在第 15 d 显著降低. 随着培养时间的延长, 土壤 pH 值整体呈下降趋势, 但在第 4 次取样时 (第 30 d) pH 值与上一阶段相比显著升高 (T2 处理浓度除外). 盆栽试验条件下根际土壤 pH 值在添加浓度为 T2 和 T3 处理显著降低. 与 CK 相比, 不同浓度巨大芽孢杆菌处理下, 根际土壤的 pH 值降幅较小, 在 0.29%~0.83% 之间.

2.2 巨大芽孢杆菌对土壤有效态 Cd 和 Zn 含量的影响

与 CK 相比, 巨大芽孢杆菌均显著提高土壤有效态 Cd 和 Zn 含量, 且在 T3 处理最为显著 (图 2). 室内培养条件下, 在同一培养时期, 各接菌量之间对土壤有效态 Cd 和 Zn 含量差异不显著 (有效态 Cd

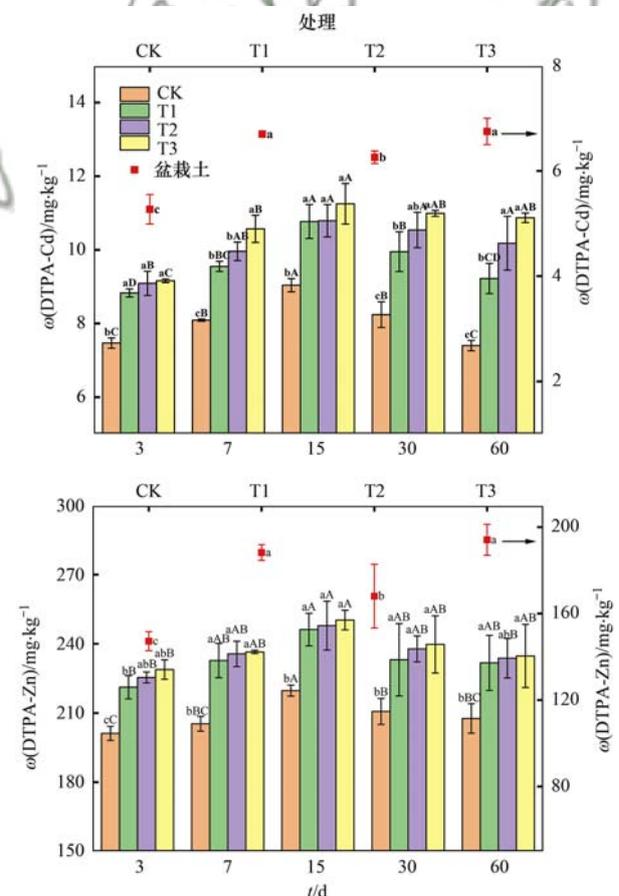


图 2 不同条件下 (室内培养和盆栽试验) 巨大芽孢杆菌对土壤有效态 Cd 和 Zn 含量的影响

Fig. 2 Effects of *Bacillus megaterium* on soil DTPA-Cd and DTPA-Zn under different conditions (indoor culture and pot experiment)

含量第 60 d 除外). 随着培养时间的延长, 各处理下土壤有效态 Cd 和 Zn 含量呈现出先上升后下降的趋势, 培养结束时 (第 60 d) 其含量值均高于各自的初始值. 不同处理下土壤有效态 Cd 和 Zn 含量在第 15 d 时达到最大. 与 CK 相比, 第 15 d 时, 不同浓度巨大芽孢杆菌处理下土壤有效态 Cd 和 Zn 含量分别增加了 19%~25% 和 13%~14%; 第 60 d 时, 土壤有效态 Cd 和 Zn 含量分别增加了 24%~47% 和 11%~13%. 盆栽条件下, 向土壤中加入巨大芽孢杆菌后, 土壤有效态 Cd 含量由 $5.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (CK) 升高至 $6.26 \sim 6.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增幅为 19%~28%, 最大增幅在浓度为 T3 处理取得; 有效态 Zn 含量由 $147.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (CK) 升高至 $167.21 \sim 194.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增幅为 14%~32%, 最大增幅同样在 T3 处理取得. 与室内培养条件下相比, 细菌-植物联合情

况下根际土壤有效态 Cd 和 Zn 含量增幅更大.

2.3 巨大芽孢杆菌处理对土壤酶活的影响

从图 3 可以看出, 在室内培养和盆栽试验中, 接菌处理均显著提高土壤碱性磷酸酶 (ALP)、脲酶 (UR) 和蔗糖酶 (SU) 含量 (室内培养条件下碱性磷酸酶和蔗糖酶的个别监测点除外). 在室内培养阶段, 土壤 ALP 整体呈先上升后下降的趋势, 且在培养至第 15 d 时含量达到最大值. 培养至第 15 d 和第 60 d 时, 接菌处理下土壤 ALP 含量分别为对照的 1.10~1.23 倍和 1.03~1.17 倍. 土壤 UR 含量随培养时间的延长不断增加, 在培养结束时达到最大值, 其含量增加至对照的 1.24~1.30 倍. 土壤 SU 含量随时间变化不断升高, 但与 UR 的增长趋势不同, 在第 30 d 之后增长幅度趋于平缓. 与 CK 相比, 培养结束时, 接菌处理下土壤 SU 含量增加了 1.21~1.26

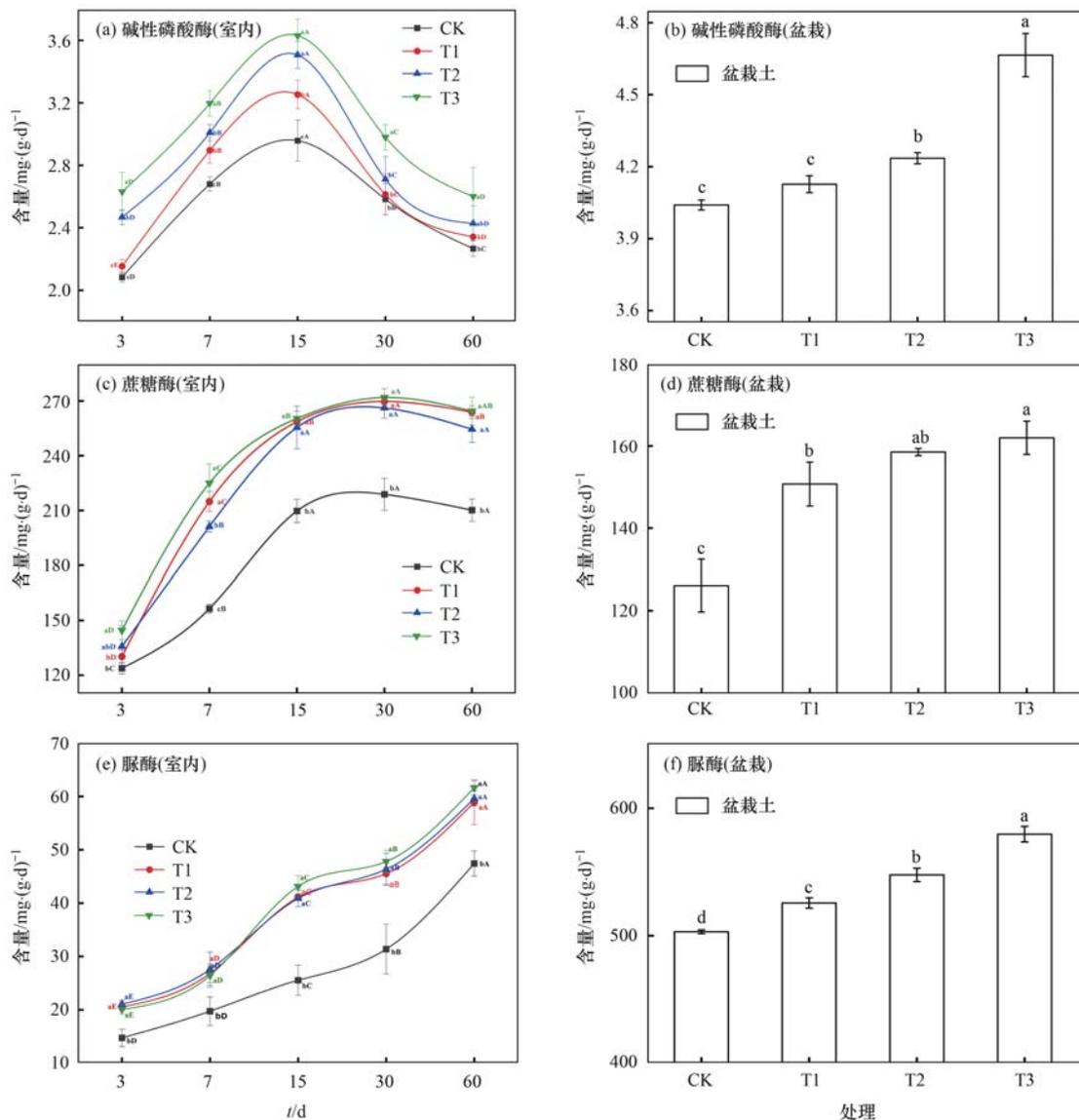


图 3 室内培养和盆栽试验条件下巨大芽孢杆菌对土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶含量的影响

Fig. 3 Effect of *Bacillus megaterium* on the activities of alkaline phosphatase, sucrase, and urease under the different conditions of indoor culture and pot experiment

倍.盆栽条件下,与对照相比,接菌处理土壤 ALP、UR 和 SU 的含量分别增加了 1.02 ~ 1.15、1.04 ~ 1.15 和 1.20 ~ 1.29 倍.

2.4 巨大芽孢杆菌处理对包心芥菜生物量及其富集 Cd 和 Zn 能力的影响

接菌后包心芥菜的生物量变化情况如表 2 所示.不同浓度巨大芽孢杆菌显著提高包心芥菜的生物量,并且不同接菌浓度之间差异显著.与 CK 相比,加入巨大芽孢杆菌后,包心芥菜的干重增加了 10.8% ~ 23.8%,在 T3 处理生物量取得最大值.由图 4 所示,施用巨大芽孢杆菌后,包心芥菜地上部分 Cd 含量显著增加,但不同接菌量之间差异不显著.与 Cd 不同,接菌处理均显著提高植物地上和

地下部分 Zn 含量.不同接菌处理使包心芥菜地上部分 Cd 富集浓度增加至对照的 1.61 ~ 1.70 倍,地下部分 Cd 富集浓度为对照的 1.05 ~ 1.15 倍;地上部分 Zn 富集浓度为对照的 1.38 ~ 1.61 倍,地下部分 Zn 富集浓度为对照的 1.47 ~ 1.53 倍.生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)反映了植物地上部分从土壤里面提取重金属的能力;而转运系数(translocation factor, TF)则表示植物将重金属从根系向地上部分转移的能力.进一步比较不同处理之间植物的富集系数和转运系数发现(表 3),接菌处理提高了包心芥菜的富集能力和转运能力,并且包心芥菜对 Cd 的富集能力要高于 Zn.

表 2 接种巨大芽孢杆菌对包心芥菜生理特性的影响¹⁾

Table 2 Addition effects of *Bacillus megaterium* on the physiological characteristics of mustard

处理	植物干重 /g	过氧化物酶 (POD) / $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$	超氧化物歧化酶 (SOD) / $\text{U}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	过氧化氢酶 (CAT) / $\text{U}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$	丙二醛 (MDA) / $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$	叶绿素含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$		
						叶绿素 a	叶绿素 b	总量
CK	3.98 ± 0.06d	34.9 ± 1.4b	312 ± 13c	677 ± 8d	8.02 ± 0.6a	1.53 ± 0.05c	0.573 ± 0.02c	2.10 ± 0.06c
T1	4.41 ± 0.04c	38.2 ± 1.1a	321 ± 6c	727 ± 12c	8.00 ± 0.1a	1.63 ± 0.04b	0.700 ± 0.09b	2.33 ± 0.12b
T2	4.73 ± 0.05b	40.6 ± 2.3a	383 ± 8a	810 ± 16b	7.96 ± 0.1a	1.71 ± 0.03ab	0.683 ± 0.04b	2.39 ± 0.03b
T3	4.93 ± 0.12a	38.8 ± 1.0a	345 ± 12b	895 ± 10a	6.22 ± 0.2b	1.79 ± 0.09a	0.823 ± 0.05a	2.61 ± 0.04a

1) 数据为平均值 ± 标准差; 同一列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$); 除了植物干重,其余含量均以鲜重计算

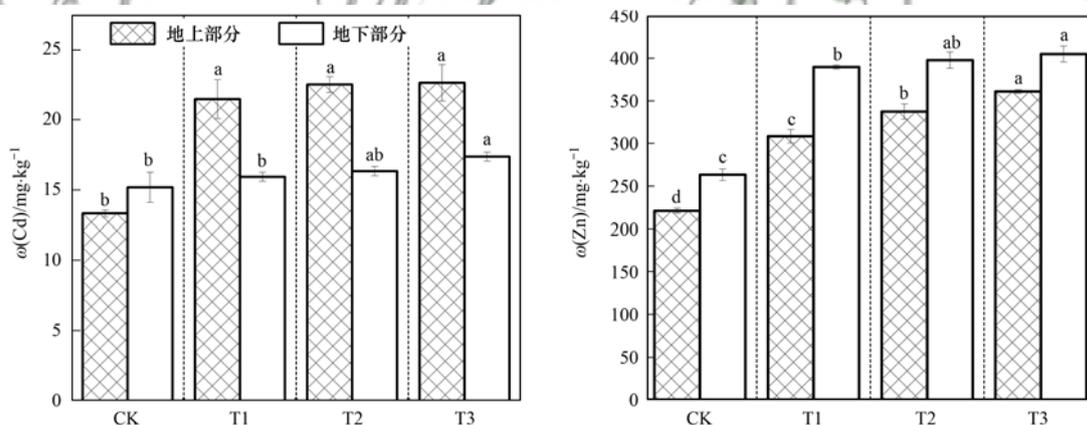


图 4 巨大芽孢杆菌对包心芥菜地上和地下部分 Cd 和 Zn 含量的影响

Fig. 4 Effects of *Bacillus megaterium* on the contents of Cd and Zn in above- and underground parts of mustard

表 3 巨大芽孢杆菌对包心芥菜富集和转运能力的影响

Table 3 Effects of *Bacillus megaterium* on the bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) of mustard

处理	BCF		TF	
	Cd	Zn	Cd	Zn
CK	0.92	0.36	0.88	0.75
T1	1.47	0.42	1.30	0.79
T2	1.51	0.46	1.38	0.85
T3	1.57	0.52	1.35	0.87

2.5 接种巨大芽孢杆菌对包心芥菜生理生化指标的影响

接菌对植物的过氧化物酶(POD)、超氧化物歧

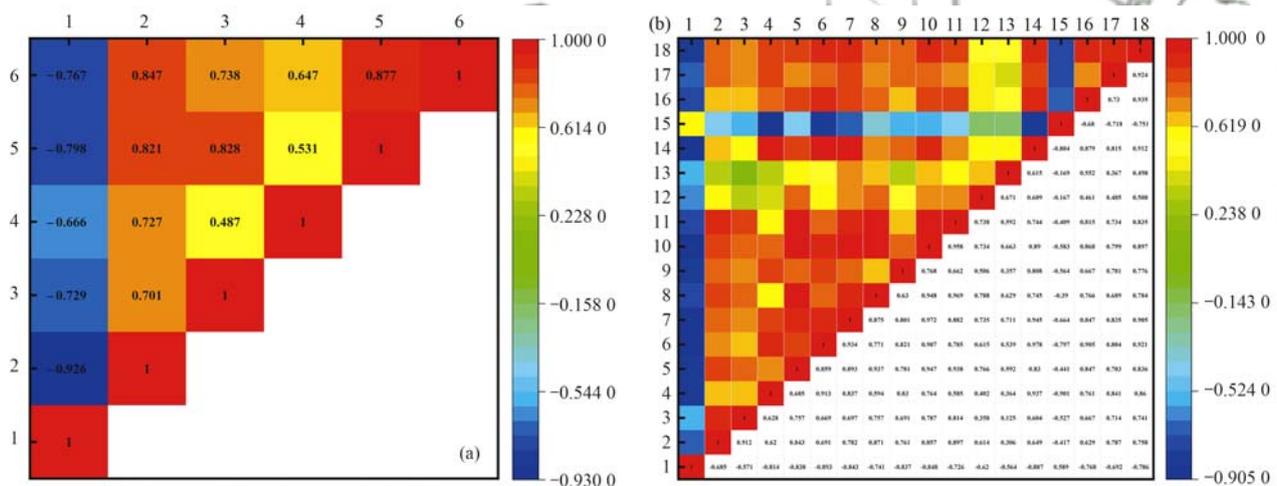
化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)和叶绿素含量影响见表 2.接菌处理显著增加了植物 POD 含量,但不同处理浓度之间差异不显著.与对照相比,植物 POD 活性增加了 1.11 ~ 1.16 倍,T2 处理 POD 活性达到最大值.加入巨大芽孢杆菌后,植物 SOD 含量增加至对照的 1.03 ~ 1.23 倍,在 T2 和 T3 处理下与对照之间差异显著.接菌显著提高了植物 CAT 含量,增加量与添加浓度成正比,并且不同浓度之间差异显著,在 T3 处理下植物 CAT 含量(以鲜重计)升高至最大为 895 $\text{U}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,为对照的 1.32 倍.接菌处理使植物 MDA 含量降低,仅在 T3

处理下差异显著,最大降幅为 22%。与对照相比,接菌处理使植物叶绿素 a、b 和全量均显著增加,增幅分别为 7%~17%、20%~44% 和 11%~24%。

2.6 相关性分析

图 5(a) 为室内培养条件下(60 d)接菌处理土壤各理化性质之间的相关性。结果表明,土壤重金属有效态含量、土壤各酶活性(ALP 除外, $P < 0.05$) 与土壤 pH 值均呈极显著负相关关系($P < 0.01$); 重金属有效态含量与土壤各酶含量之间存在显著相关性($P < 0.05$),其中有效态 Cd 含量(DTPA-Cd)与各酶含量呈极显著相关性($P < 0.01$); SU 和 UR 之间存在极显著相关性($P < 0.01$)。图 5(b) 反映了盆栽条件下接菌处理各测定指标之间的相关性。盆栽条件下土壤各理化性质之间相关性与室内培养条件基本一致,但也有变化,表现在有效态 Zn 含量(DTPA-Zn)与 pH 之间相关性减弱; 重金属有效态含

量与 SU 之间表现为极显著相关性($P < 0.01$); ALP 和 SU 与 UR 之间的相关性增强,为极显著($P < 0.01$)。值得关注的是,土壤 pH 值与植物各检测指标之间均呈现显著负相关性($P < 0.05$, SOD 除外,不显著)。植物生物量与抗氧化酶、叶绿素含量呈极显著相关性($P < 0.01$)。CAT 含量和叶绿素总量对植物地上、地下部分累积重金属 Cd 和 Zn 含量更为显著相关($P < 0.01$); 植物体内抗氧化酶之间相关性显著($P < 0.05$),并且只有 CAT 与 MDA 之间存在极显著负相关性($P < 0.01$); 同时 CAT 与叶绿素含量之间存在极显著相关性($P < 0.01$),而 MDA 与之呈现极显著负相关性($P < 0.01$)。综上,土壤 pH 值变化是引起土壤重金属有效态活性和酶活性改变的关键因素,在重金属胁迫情况下,接菌处理通过提高植物抗氧化酶活性及叶绿素含量提高植物抗逆性,促进其生长,其中表现最为显著的抗氧化酶类型为 CAT。



(a) 室内培养, (b) 盆栽试验; 1. pH, 2. DTPA-Cd, 3. DTPA-Zn, 4. ALP, 5. SU, 6. UR, 7. 生物量, 8. 地上部分 Cd 含量, 9. 地下部分 Cd 含量, 10. 地上部分 Zn 含量, 11. 地下部分 Zn 含量, 12. POD, 13. SOD, 14. CAT, 15. MDA, 16. 叶绿素 a 含量, 17. 叶绿素 b 含量, 18. 叶绿素总量

图 5 室内培养条件下土壤理化性质之间和盆栽试验下土壤理化性质与植物测定指标之间相关关系

Fig. 5 Correlations between soil physicochemical properties under indoor culture condition and soil physicochemical properties and plant indexes under pot experiment

3 讨论

3.1 接菌处理对土壤理化性质的影响

芽孢杆菌在自身新陈代谢过程中能够产生多种有机酸(如草酸和柠檬酸等),从而导致土壤 pH 降低^[26~28]。接菌处理后土壤 pH 值在第 3 d 时即发生显著变化,说明巨大芽孢杆菌能够在较短时间内适应土壤环境^[29],但在第 30 d 土壤 pH 值升高,说明在第 15 d 和第 30 d 这一培养阶段微生物的代谢活动减弱,这可能与外界环境条件发生了变化有关。微生物对环境变化敏感,为了维持物质能量平衡,会通过调节自身合成和分解有机酸的能力来适应环境的改变^[30]。在培养结束时(60 d),加菌处理下土壤 pH

值下降程度明显,表明巨大芽孢杆菌对土壤酸化作用具有良好的稳定性。此外,由于土壤样品中加入了堆肥,微生物可以分解堆肥中的有机质产生腐殖酸等酸性物质,导致土壤 pH 值进一步降低。这一点也解释了对照土壤 pH 值随着培养时间的延长显著降低的原因。与本研究的结果相似,郭堤^[31]通过向土壤中添加 0、2.5%、5% 和 10% 的堆肥样品发现,施加堆肥样品均显著降低了土壤 pH 值,并且降低幅度与堆肥添加量成正比。

土壤重金属有效态含量与土壤性质(如 pH、有机质、阳离子交换量、土质类型等)、污染物性质(如总量、元素种类)和生物因素等多方面因素有关^[32,33]。在众多因素中,pH 值是最值得首先关注的

影响因素. 对室内培养试验中土壤有效态 Cd 和 Zn 含量与土壤 pH 值进行回归分析, 将土壤有效态 Cd 和 Zn 含量设为 y , 土壤 pH 值设为 x , 得到的回归方程分别为: $y = 57.039 - 6.287x$, $R^2 = 0.622$ ($P < 0.01$) 和 $y = 826.195 - 79.142x$, $R^2 = 0.689$ ($P < 0.01$), 可见土壤有效态 Cd 和 Zn 含量值与 pH 值之间存在极显著负相关关系. 这与已有的研究结果相似^[30,34,35]. 结合图 1 中土壤 pH 值测定结果, 第 15 d 土壤 pH 值降至最低, 在 15 ~ 30 d 土壤 pH 值显著升高. 同样的, 土壤有效态 Cd 和 Zn 含量在第 15 d 升至最高, 在 15 ~ 30 d 降低, 表明土壤有效态 Cd 和 Zn 变化与土壤 pH 值变化存在同步性. 与本研究结果相似, 杨榕等^[30] 在土壤中接种胶质芽孢杆菌, 发现根际和非根际土壤有效态 Cd 含量的变化与 pH 值在时间上变化统一. 室内培养后期, 接菌处理土壤有效态 Cd 和 Zn 含量呈现下降趋势, 但变化不显著 (有效态 Cd 含量在 $1 \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ 处理下除外), 表明接菌处理可以稳定提高土壤重金属有效性. 邓月强等^[16] 通过盆栽试验的方法, 分析了浓度为 $5 \times 10^9 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ 巨大芽孢杆菌在不同接种量 (10 ~ 60 mL) 对伴矿景天修复 Cd 污染农田土壤效率的影响, 发现接种巨大芽孢杆菌后土壤有效态 Cd 含量较对照 (CK) 增加了 15% ~ 45%, 这与本研究结果相似. 与室内培养条件下相比, 细菌-植物联合情况下根际土壤有效态 Cd 和 Zn 含量增幅更大. 王小敏等^[17] 在试验中也证实巨大芽孢杆菌和包心芥菜联合作用与单施巨大芽孢杆菌对比, 土壤中更多的铁锰结合态 Cd 被活化为可交换态 Cd, 而可交换态含量是 DTPA 可提取出的重金属含量的一部分^[36]. 杨榕等^[30] 的试验结果表明, 接种胶质芽孢杆菌使得根际土壤有效态 Cd 含量要高于非根际土壤. 这可能是接菌使得根际微环境发生变化, 微生物的代谢产物会刺激植物根系分泌有机酸^[37], 使得根际土壤重金属有效态含量变化更加明显.

土壤酶活能够反映某一种土壤生态状况下的生物化学过程的相对强度, 测定其活性可以间接了解某种物质在土壤中的转化情况^[38,39]. 丁玲^[40] 的研究发现, 向铅锌复合污染土壤中加入不同浓度的巨大芽孢杆菌后, 土壤碱性磷酸酶的含量增加了 7.95% ~ 61.64%, 这与本研究结果相似. 姜宇^[41] 从污泥中筛选出两株对 Pb 具有耐性的菌株添加到不同浓度 Pb 胁迫土壤中发现, 土壤酶活性 (过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和磷酸酶) 有不同程度的提高. 需要指出的是, 已有的研究表明, 土壤微生物活性与重金属浓度之间存在负相关关系, 即高溶解性重金属含量会抑制微生物的活性, 导致土壤酶活性越

低^[42,43]. 本试验中接菌后土壤有效态 Cd 和 Zn 的含量升高, 酶活性没有降低反而升高. 这是因为本试验是将巨大芽孢杆菌直接加入到土壤中, 并且其对重金属具有一定的耐性, 极大地丰富了土壤中微生物的数量与活性. 同时, 酶对重金属胁迫敏感, 重金属可以通过与酶-底物复合物, 使酶蛋白变性或者与蛋白质活性基团相互作用降低酶活性; 但另一方面, 重金属离子可以酶的辅基形式参与反应, 提高酶的活性, 促进其与底物的配位结合^[44]. 碱性磷酸酶参与土壤磷素的生物转化过程, 由于巨大芽孢杆菌的溶磷作用, 能够降解有机磷化合物, 巨大芽孢杆菌的加入使得土壤中磷素转化过程增强, 从而磷酸酶的活性增强. 后期磷酸酶活性出现降低可能受土壤中较高的 Cd 和 Zn 有效态含量影响. 这可能使磷酸酶对重金属胁迫更为敏感. 曾路生等^[45] 在研究 Cd 污染对不同土壤酶活性影响时发现, 土壤酶活性对 Cd 的敏感程度表现为: 脱氢酶 > 磷酸酶 > 脲酶. 杨良静等^[46] 发现土壤酶对 Cd 的敏感程度依次表现为: 蔗糖酶 > 脲酶 > 过氧化氢酶. 吴春艳等^[47] 发现 Cd 和 Cu 等土壤酶的抑制作用表现为: 磷酸酶 > 脲酶 > 蔗糖酶 > 过氧化氢酶. 此外, 外源菌的加入和土壤理化性质的变化对土壤原始微生物的活性影响是十分微妙的. 杨良静等^[46] 发现在 Cd 胁迫下, 细菌的数量缓慢增加, 而真菌和放线菌的数量变化则为先增加后降低. 再者, 本试验中作为基肥加入的有机肥, 能够提高土壤肥力水平和有机质含量水平, 提高微生物的活性, 从而提高土壤酶活性^[42]. 除了重金属含量, 土壤理化性质 (pH、碳酸盐含量、有机质含量等) 和微生物群落的变化等都将造成土壤酶活性的改变^[48]. 整体而言, 巨大芽孢杆菌对土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性均有明显促进作用.

3.2 接菌处理对植物生理特性的影响

在土壤重金属植物修复领域中, 植物生长状况的好坏对修复效果起着决定性作用. 巨大芽孢杆菌是一种溶磷促钾细菌, 可以提高土壤中磷钾的有效态含量, 从而促进植物的生长^[16]. 另外, 有研究表明, 巨大芽孢杆菌还可以分泌促生激素 IAA、产铁载体等促进植物生长, 并提高植物的抗逆能力^[49]. 接种巨大芽孢杆菌能够促进植物的生长, 为后续进一步提高土壤的修复效率提供可能. 丁玲^[40] 在人为污染的土壤中接种巨大芽孢杆菌发现, 印度芥菜的生物量平均增量在 45%. 王小敏等^[17] 的研究表明接种巨大芽孢杆菌将印度芥菜的生物量提高 11.4% ~ 35.9%. 邓月强等^[16] 的研究发现接种巨大芽孢杆菌能够提高伴矿景天地上和地下部的生物量, 其增幅分别可以达到 8.7% ~ 66.7% 和 13.6% ~

81.8%。与本研究结果相似,张冰等^[50]向土壤中添加 10^8 、 10^9 和 10^{10} cfu·kg⁻¹ 巨大芽孢杆菌后青苜蓿地上部 Cd 积累量增加了 45.2%~63.1%。邓月强等^[16]在土壤中接种 10^{11} cfu·kg⁻¹ 巨大芽孢杆菌后伴矿景天地上部 Cd 含量与对照相比增加了 60.4%。孙宇靖^[51]的研究发现接种褐环乳牛肝菌 (*Suillus luteus*) 使马尾松根部对重金属 Pb、Zn、Cd、Cu 和 Mn 比对照的累积量提高了 1~5 倍。由于接菌处理显著提高了土壤重金属有效态含量,意味着重金属的生物有效性增大,同时植株的生物量增加,从而使植株各部分重金属含量增加。植物地上部分 Cd 增加量高于植物地上部分对 Zn 的提取,同时植物对 Cd 的富集系数和转运系数也高于 Zn。植物对重金属植物的积累过程包括土壤重金属的活化、根系的吸收、分离和保留、木质部的装载、地上部分的分布和叶片细胞的储存^[52], 重金属 Cd 的移动性比 Zn 的移动性要强^[53], 更容易被植物吸收。此外,Jun 等^[54]的研究发现,植物对 Cd 和 Zn 的积累之间具有拮抗作用。植物对 Cd 的富集系数和转运系数大于 1, 表明包心芥菜具有修复 Cd 污染土壤的潜力, 并且巨大芽孢杆菌的加入能够提高其富集能力。

逆境造成的植物衰老可能与逆境下活性氧 (active oxygen) 积累有关^[55]。植物在逆境环境中, 如重金属胁迫, 会导致植物体内氧代谢失调, 造成活性氧在植物体内累积, 进而会对植物造成一系列的损伤, 如抑制植物的生长。SOD、POD 和 CAT 构成了植物体内活性氧清除的保护酶系统, SOD 能够催化分子氧活化的第一个中间产物 $\cdot O_2^-$, 生成 O_2 和 H_2O_2 , POD 和 CAT 则进一步将 H_2O_2 分解清除, 生成 H_2O 和 O_2 ^[55]。三者相互协调, 形成保护体系, 维持植物体内活性氧在较低水平。本研究结果表明, 接菌对植物 SOD、POD 和 CAT 这 3 种酶均具有促进作用, 能够避免或减轻活性氧对植物的伤害, 从而提高植物的抗逆性。与本试验研究结果相似, 姜宇^[41]的研究发现, 低浓度和高浓度 Pb 胁迫处理下, 接菌处理均能够提高植物抗氧化酶活性, 减轻 Pb 对植物的胁迫。MDA 为膜脂过氧化中的产物, 其含量高低可以反映细胞膜脂过氧化程度^[56,57]。段成娇^[58]将根瘤菌接种到铜污染土壤中发现, 接菌处理下苜蓿植物的 MDA 含量与对照相比显著下降。本试验中, 接菌处理下植物体内 3 种抗氧化酶含量升高, 使重金属胁迫下植物体内产生的活性氧被快速清除, 减缓或抑制了膜脂过氧化过程的发生, 所以与对照相比, MDA 含量降低。添加巨大芽孢杆菌后, 包心芥菜叶绿素含量显著增加 ($P < 0.05$)。叶绿素含量的增加, 证明植物的光合作用增强, 可以促进机体合成更多的有机物质,

从而促进植物的生长, 这与本试验中包心芥菜生物量显著增加相吻合。

4 结论

(1) 巨大芽孢杆菌通过降低土壤 pH 值提高土壤有效态 Cd 和 Zn 含量, 能够提高土壤磷酸酶、脲酶和蔗糖酶的活性, 并且具有良好的稳定性。

(2) 巨大芽孢杆菌能够促进包心芥菜的生长并提高其富集 Cd 和 Zn 的含量, 在添加量为 1×10^9 cfu·mL⁻¹ (T3) 时效果最佳。巨大芽孢杆菌通过促进植物抗氧化酶活性增强植物抗逆性, 其中表现最为显著的抗氧化酶类型为 CAT。

(3) 综上, 巨大芽孢杆菌-包心芥菜联合具有修复 Cd 和 Zn 污染土壤的修复潜力。

参考文献:

- [1] Bai L, Jiang L, Yang D Y, et al. Quantifying the spatial heterogeneity influences of natural and socioeconomic factors and their interactions on air pollution using the geographical detector method: a case study of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **232**: 692-704.
- [2] Chen H R, Wang L, Hu B F, et al. Potential driving forces and probabilistic health risks of heavy metal accumulation in the soils from an e-waste area, Southeast China [J]. *Chemosphere*, 2022, **289**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133182.
- [3] 段桂兰, 崔慧灵, 杨雨萍, 等. 重金属污染土壤中生物间相互作用及其协同修复应用 [J]. *生物工程学报*, 2020, **36** (3): 455-470.
Duan G L, Cui H L, Yang Y P, et al. Interactions among soil biota and their applications in synergistic bioremediation of heavy-metal contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, **36** (3): 455-470.
- [4] Xie Y, Bu H S, Feng Q J, et al. Identification of Cd-resistant microorganisms from heavy metal-contaminated soil and its potential in promoting the growth and Cd accumulation of bermudagrass [J]. *Environmental Research*, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111730.
- [5] Chen X M, Zhao Y, Zhao X Y, et al. Selective pressures of heavy metals on microbial community determine microbial functional roles during composting: sensitive, resistant and actor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **398**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122858.
- [6] Tamariz-Angeles C, Huamán G D, Palacios-Robles E, et al. Characterization of siderophore-producing microorganisms associated to plants from high-Andean heavy metal polluted soil from Callejón de Huaylas (Ancash, Perú) [J]. *Microbiological Research*, 2021, **250**, doi: 10.1016/j.micres.2021.126811.
- [7] 张文兴, 岳晓岚, 邓强, 等. 抗性微生物强化重金属污染土壤植物修复的研究进展 [J]. *农学学报*, 2021, **11** (5): 46-50.
Zhang W X, Yue X L, Deng Q, et al. Enhancing phytoremediation of heavy metal contaminated soil by resistant microorganisms: research progress [J]. *Journal of Agriculture*, 2021, **11** (5): 46-50.
- [8] Cao S M, Wang W K, Wang F, et al. Drought-tolerant *Streptomyces pactum* Act12 assist phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Amaranthus hypochondriacus*: great potential

- application in arid/semi-arid areas [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(15): 14898-14907.
- [9] Ren C G, Kong C C, Wang S X, *et al.* Enhanced phytoremediation of uranium-contaminated soils by arbuscular mycorrhiza and rhizobium [J]. Chemosphere, 2019, **217**: 773-779.
- [10] Rufyikiri G, Huysmans L, Wannijn J, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi can decrease the uptake of uranium by subterranean clover grown at high levels of uranium in soil [J]. Environmental Pollution, 2004, **130**(3): 427-436.
- [11] 杨文玲, 杜志敏, 孙召华, 等. 芽孢杆菌在重金属污染土壤修复中的研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(6): 759-763.
- Yang W L, Du Z M, Sun Z H, *et al.* Research progress of Bacillus in remediation of heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Pollution and Control, 2021, **43**(6): 759-763.
- [12] Zhao Y N, Mao X X, Zhang M S, *et al.* The application of *Bacillus Megaterium* alters soil microbial community composition, bioavailability of soil phosphorus and potassium, and cucumber growth in the plastic shed system of North China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, **307**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107236.
- [13] 纪宏伟, 王小敏, 庞宏伟, 等. 枯草芽孢杆菌与巨大芽孢杆菌对土壤有效态 Cd 的影响研究 [J]. 水土保持学报, 2015, **29**(3): 325-329.
- Ji H W, Wang X M, Pang H W, *et al.* Effect of *Bacillus subtilis* and *Bacillus megaterium* on soil available Cd [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(3): 325-329.
- [14] 王小敏. 巨大芽孢杆菌对印度芥菜富集土壤的影响研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2016.
- [15] 赵树民, 李晓东, 虞方伯, 等. 巨大芽孢杆菌 LY02 对黑麦草修复重金属污染土壤的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, **31**(5): 340-344.
- Zhao S M, Li X D, Yu F B, *et al.* Effect of *Bacillus megaterium* LY02 on phytoremediation of heavy metal from contaminated soil by *Lolium perenne* L. [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(5): 340-344.
- [16] 邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 巨大芽孢杆菌对伴矿景天修复镉污染农田土壤的强化作用 [J]. 应用生态学报, 2020, **31**(9): 3111-3118.
- Deng Y Q, Cao X Y, Tan C Y, *et al.* Strengthening the effect of *Bacillus megaterium* on remediation of Cd-contaminated farmland soil by *Sedum plumbizincicola* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(9): 3111-3118.
- [17] 王小敏, 纪宏伟, 刘文菊, 等. 巨大芽孢杆菌与印度芥菜对 Cd 污染土壤的联合修复效果研究 [J]. 水土保持学报, 2014, **28**(4): 232-236.
- Wang X M, Ji H W, Liu W J, *et al.* Effect of *Bacillus megaterium* and *Brassica juncea* combination on phytoextraction of Cd from polluted Soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(4): 232-236.
- [18] Boomiraj K, Chakrabarti B, Aggarwal P K, *et al.* Assessing the vulnerability of Indian mustard to climate change [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **138**(3-4): 265-273.
- [19] 郭瞻宇, 张子杨, 蒋亚辉, 等. 不同品种芥菜对镉胁迫的敏感性分布及抗氧化特征 [J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(12): 2660-2668.
- Guo Z Y, Zhang Z Y, Jiang Y H, *et al.* Assessment of variation in sensitivity and antioxidant characteristics of different mustard cultivars under different Cd stress levels [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(12): 2660-2668.
- [20] 郭瞻宇. 镉、锌耐性芥菜品种筛选及其耐受机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] Zhang C S, Lin Y, Tian X Y, *et al.* Tobacco bacterial wilt suppression with biochar soil addition associates to improved soil physiochemical properties and increased rhizosphere bacteria abundance [J]. Applied Soil Ecology, 2017, **112**: 90-96.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [24] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [25] 刘文龙, 王凯荣, 王铭伦. 花生对镉胁迫的生理响应及品种间差异 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 451-459.
- Liu W L, Wang K R, Wang M L. Physiological responses of different peanut (*Arachis hypogaea* L.) varieties to cadmium stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(2): 451-459.
- [26] 杨卓, 王占利, 李博文, 等. 微生物对植物修复重金属污染土壤的促进效果 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(8): 2025-2031.
- Yang Z, Wang Z L, Li B W, *et al.* Promotion effects of microorganisms on phytoremediation of heavy metals-contaminated soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(8): 2025-2031.
- [27] Rajkumar M, Sandhya S, Prasad M N V, *et al.* Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation [J]. Biotechnology Advances, 2012, **30**(6): 1562-1574.
- [28] Han Y L, Zhang L L, Gu J G, *et al.* Citric acid and EDTA on the growth, photosynthetic properties and heavy metal accumulation of *Iris halophila* Pall. cultivated in Pb mine tailings [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, **128**: 15-21.
- [29] 柳晓光. 芽孢杆菌在植物-微生物联合修复技术中的应用研究进展 [J]. 南方农业, 2021, **15**(24): 11-12.
- Liu X G. Advances in the application of Bacillus in plant-microbe combined remediation technology [J]. South China Agriculture, 2021, **15**(24): 11-12.
- [30] 杨榕, 李博文, 刘微. 胶质芽孢杆菌对印度芥菜富集土壤 Cd 及土壤 pH 的影响 [J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1648-1654.
- Yang R, Li B W, Liu W. Effects of *Bacillus mucilaginosus* on soil pH and Cd accumulation by *Brassica juncea* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(6): 1648-1654.
- [31] 郭堤. 密旋链霉菌 Act12 强化雪里蕻修复 Cd、Zn 污染土壤及其机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [32] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 [J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2469-2479.
- Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2469-2479.
- [33] Wu L H, Zhou J W, Zhou T, *et al.* Estimating cadmium availability to the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in a wide range of soil types using a piecewise function [J]. Science of The Total Environment, 2018, **637-638**: 1342-1350.
- [34] 徐明岗, 李菊梅, 张青. pH 对黄棕壤重金属解吸特征的影响 [J]. 生态环境, 2004, **13**(3): 312-315.
- Xu M G, Li J M, Zhang Q. Effect of pH on desorption of heavy metals from yellow brown earth [J]. Ecology and Environment,

- 2004, **13**(3): 312-315.
- [35] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克, 等. 3 种改良剂对不同土壤-水稻系统中 Cd 行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(4): 834-840.
Zong L G, Zhang L N, Sun J K, *et al.* Effects of three amendments on behaviors of cadmium in different soil-rice system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, **25**(4): 834-840.
- [36] 王建乐, 谢仕斌, 王冠, 等. 不同提取剂提取土壤中重金属能力的对比研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, **52**(1): 55-62.
Wang J L, Xie S B, Wang G, *et al.* A comparative study of the capacity of different extractants to extract heavy metals in soil [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, **52**(1): 55-62.
- [37] Fischer K, Bipp H P. Removal of heavy metals from soil components and soils by natural chelating agents. Part II. Soil Extraction by Sugar Acids[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, **138**(1-4): 271-288.
- [38] 于寿娜, 廖敏, 黄昌勇. 镉、汞复合污染对土壤脲酶和酸性磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(8): 1841-1847.
Yu S N, Liao M, Huang C Y. Effects of cadmium and mercury combined pollution on soil urease and acid phosphatase activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(8): 1841-1847.
- [39] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 等. 自然地理学[M]. (第四版). 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [40] 丁玲. 巨大/胶质芽孢杆菌与柠檬酸联合强化植物修复铅镉污染的土壤[D]. 保定: 河北大学, 2017.
- [41] 姜宇. 耐铅微生物与景观植物协同修复铅污染土壤研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2019.
- [42] Liang Q, Gao R T, Xi B D, *et al.* Long-term effects of irrigation using water from the river receiving treated industrial wastewater on soil organic carbon fractions and enzyme activities [J]. Agricultural Water Management, 2014, **135**: 100-108.
- [43] Yang Z X, Liu S Q, Zheng D W, *et al.* Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(6): 1135-1141.
- [44] 刘娟, 张乃明, 于泓, 等. 重金属污染对水稻土微生物及酶活性影响研究进展[J]. 土壤, 2021, **53**(6): 1152-1159.
Liu J, Zhang N M, Yu H, *et al.* Effects of heavy metal pollution on microorganism and enzyme activity in paddy soil: a review [J]. Soils, 2021, **53**(6): 1152-1159.
- [45] 曾路生, 廖敏, 黄昌勇, 等. 镉污染对水稻土微生物量、酶活性及水稻生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2162-2167.
Zeng L S, Liao M, Huang C Y, *et al.* Effects of Cd contamination on paddy soil microbial biomass and enzyme activities and rice physiological indices [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(11): 2162-2167.
- [46] 杨良静, 何俊瑜, 任艳芳, 等. Cd 胁迫对水稻根际土壤酶活和微生物的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, **37**(3): 85-88.
Yang L J, He J Y, Ren Y F, *et al.* Effects of cadmium stress on microbes and enzyme activity in rice rhizosphere soil [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2009, **37**(3): 85-88.
- [47] 吴春艳, 陈义, 闵航, 等. Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 对水稻土微生物及酶活性的影响[J]. 浙江农业科学, 2006, (3): 303-307.
Wu C Y, Chen Y, Min H, *et al.* Effects of Cd²⁺ and Cu²⁺ on population size of microorganisms and activity of enzyme in paddy soil [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2006, (3): 303-307.
- [48] Chodak M, Gołębiewski M, Morawska-Płoskonka J, *et al.* Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals[J]. Applied Soil Ecology, 2013, **64**: 7-14.
- [49] 赵树民. 巨大芽孢杆菌 LY02 对黑麦草修复重金属污染土壤的强化作用[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [50] 张冰, 刘杰, 蒋萍萍, 等. 巨大芽孢杆菌与柠檬酸联合强化青箱修复镉污染土壤研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(3): 552-561.
Zhang B, Liu J, Jiang P P, *et al.* *Bacillus megaterium* and citric acid enhanced the remediation of Cd-contaminated soil by *Celosia argentea* Linn [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(3): 552-561.
- [51] 孙宇靖. 褐环乳牛肝菌(*suillus luteus*)对马尾松富集转移重金属的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- [52] Pasricha S, Mathur V, Garg A, *et al.* Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis: heavy metal tolerance in hyperaccumulators [J]. Environmental Challenges, 2021, **4**, doi: 10.1016/j.envc.2021.100197.
- [53] Lasat M M. Phytoextraction of metals from contaminated Soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues[J]. Journal of Hazardous Substance Research, 2000, **2**, doi: 10.4148/1090-7025.1015.
- [54] Jun L, Wei H, Aili M, *et al.* Effect of lychee biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil using sunflower: a field experiment[J]. Environmental Research, 2020, **188**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109886.
- [55] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [56] Chen J, Wang W H, Liu T W, *et al.* Photosynthetic and antioxidant responses of *Liquidambar formosana* and *Schima superba* seedlings to sulfuric-rich and nitric-rich simulated acid rain[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, **64**: 41-51.
- [57] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2002, **7**(9): 405-410.
- [58] 段成娇. 重金属胁迫下土壤酶活性空间分布特征的原位研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)