韦丽媛,刘莹儿,黄 静,等.伴矿景天套种密度联合微生物菌剂对镉污染土壤的修复效果研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6208-6217.
Wei L Y, Liu Y E, Huang J, et al. Study on the remediation effects of Sedum plumbizincicola intercropping density combined with microbial agents on cadmium-contaminated soil [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6208-6217.

伴矿景天套种密度联合微生物菌剂对镉污染土壤的修复效果研究

韦丽媛[1,2],刘莹儿[1,2],黄 静[1,2],庞 桢[1,2],陈 喆[1,2*] (1.广西师范大学,珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室,广西 桂林 541006；2.广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室,广西 桂林 541006)

摘要：利用田间小区试验开展伴矿景天-百香果套种模式研究,设置低(D1:30cm×30cm)、中(D2:25cm×25cm)、高(D3:15cm×15cm) 3 种伴矿景天种植密度,并在中密度(D2)基础上分别施加巨大芽孢杆菌(Bm)、胶质芽孢杆菌(Bmk) 2 种微生物菌剂.探究不同处理对伴矿景天地上部生物量、重金属 Cd 和 Zn 吸收量、土壤修复效果以及对百香果果肉中 Cd 含量的影响.结果表明,在套种模式下高密度种植(D3)显著提高了伴矿景天地上部生物量和对土壤 Cd、Zn 的吸收能力,其年均提取量分别比低密度种植(D1)提高了 62.5%和 72.7%(P<0.05).百香果果肉中 Cd 含量随着伴矿景天种植密度的增大而减少,并且 Cd 含量达到国家食品安全标准.此外,伴矿景天-百香果套种联合施加 Bmk 菌剂促进伴矿景天地上部生长和对 Cd、Zn 吸收能力的效果更佳.与 CK 相比,施加 Bmk 菌剂 30d 后伴矿景天地上部生物量增加了 43.2%,地上部对 Cd 和 Zn 吸收量分别提高了 7.02%和 20.9%.微生物菌剂的联合应用显著降低了根际和非根际土壤 pH 值,显著提高根际土壤和非根际土壤有效态 Cd 和 Zn 的含量(P<0.05).施加 2 种菌剂对伴矿景天的生长促进作用及镉污染土壤修复效果表现为 Bmk>Bm,为完善伴矿景天套种模式下土壤重金属修复提供了理论依据.

关键词：种植密度；伴矿景天；微生物菌剂；镉污染；土壤
中图分类号：X53 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6208-10

Study on the remediation effects of *Sedum plumbizincicola* intercropping density combined with microbial agents on cadmium-contaminated soil.

WEI Li-yuan[1,2], LIU Ying-er[1,2], HUANG Jing[1,2], PANG Zhen[1,2], CHEN Zhe[1,2*] (1.Key Laboratory of Ecology and Environmental Protection of Rare and Endangered Animals and Plants, Ministry of Education, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China；2.Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, Guilin 541006, Guangxi). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6208~6217

Abstract：Field plot experiments were conducted to study the intercropping systems of the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* and passion fruit. Three planting densities of *S. plumbizincicola* were tested: low (D1: 30cm×30cm), medium (D2: 25cm×25cm), and high (D3: 15cm×15cm). Additionally, two microbial agents, *Bacillus megaterium* (Bm) and *Bacillus mucilaginosus* (Bmk), were applied at the medium density (D2). The effects of different treatments on the plant growth, heavy metal accumulation, and phytoextraction efficiency were investigated. The results showed that under the intercropping system, high density planting (D3) significantly increased the aboveground biomass of *S. plumbizincicola* and its phytoextraction efficiency for soil Cd and Zn, with annual extraction rates increased by 62.5% and 72.7%, respectively, compared with low density planting (D1) (P<0.05). The Cd content in passion fruit pulps decreased with increasing planting density of *S. plumbizincicola* and met the national food safety standards. Moreover, the application of Bmk in the intercropping system had a better effect on the growth of *S. plumbizincicola* and its ability to absorb Cd and Zn. Compared with CK, the aboveground biomass of *S. plumbizincicola* in Bmk treatment increased by 43.2%, and the uptake of Cd and Zn in the aboveground parts increased by 7.02% and 20.9%, respectively. The microbial application significantly reduced the pH value and significantly increased the available Cd and Zn content in both rhizosphere and non-rhizosphere soils, while Bmk had better effect than Bm. In all, this study provides a theoretical basis for improving soil heavy metal remediation under the intercropping system of hyperaccumulators and fruits.

Key words：planting density；*Sedum plumbizincicola*；microbial agents；cadmium pollution；soil

随着工业化和城市化进程加速,农田土壤重金属污染已成为我国亟待解决的重大环境问题.其中,重金属镉(Cd)作为主要污染物之一,可通过食物链传递进而危害动物以及人体的健康[1].目前,镉已经被国际癌症研究机构列为第一类致癌物[2].然而,传统的物理和化学修复技术由于成本昂贵且可能对

收稿日期：2025-04-16
基金项目：广西自然科学基金(2025GXNSFAA069356);南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心开放课题(NFSS2023020);广西师范大学大学生创新创业训练计划项目(202410602054,S202410602162)
* 责任作者, 副教授, ldchenzhe@qq.com

土壤造成二次污染[3].相比之下,植物修复技术因其环境友好、可持续性强等显著优势逐渐成为重金属污染土壤修复领域的热门选择[4-5].植物修复技术不仅成本较低,还能通过植物的自然生长过程实现土壤修复,同时减少对化学修复剂的依赖,具有显著的生态效益.研究表明伴矿景天不仅能够在高重金属污染的土壤中良好生长,并且对 Cd 和 Zn 表现出极强的吸收能力[6],为利用植物修复技术治理重金属污染土壤提供了有力的实证支持.

超富集景天科植物均具备生物量高、适应性强以及可多次收割等显著优势.然而,单一栽培超积累植物往往面临着经济产出较低的问题,这在很大程度上限制了其在农用地以及大规模修复工程中的推广应用[7].作为一种有效的传统农艺强化措施,植物套种能够充分发挥超富集植物修复重金属污染土壤的潜力.它不仅能够有效治理环境污染,还能产出符合国家食品安全标准的农产品,从而显著提升经济效益,为实现“边生产边修复”的目标开辟了一条新的途径.植物套种可以充分利用生长季节,将传统的单季收获转变为双季甚至三季收获,显著提高土地利用率,并促进植物对养分、阳光和水分的高效利用[8-9].

微生物菌剂作为一种高效的微生物肥料,能够有效促进植物根系的生长,增强植物的代谢能力,并显著降低病害发生率[10-11],微生物菌剂不仅能够改善土壤的物理和化学性质,还能减少化肥和农药的使用量,从而降低对环境的污染[12].它是一种绿色、可持续的有机复合肥,具有显著的环境友好性和生态效益.微生物菌类通常表现出极强的耐重金属毒性能力,能够产生如铁载体、有机酸等物质,这些物质可以改变土壤中重金属的有效性,从而提高植物对重金属的耐受性.芽孢杆菌类菌群是当前应用最为广泛的一类微生物菌种,这类菌群的显著特点是能够产生孢子以抵御逆境,从而使其具备更强的耐热性、抗旱性和环境适应性.研究表明,在伴矿景天中接种 *Bacillus pumilus* E2S2 和 *Bacillus sp* E1S2 这 2 种芽孢杆菌后,伴矿景天体内 Cd 的含量分别从 125mg/kg 上升到 180mg/kg 和 165mg/kg[13].此外,菌根的分泌物能够促进植物对土壤中营养成分的吸收,进而提高植物的产量.这进一步证明了微生物菌剂在植物修复重金属污染土壤中的巨大潜力和应用价值.

尽管目前关于作物套种方法的研究已较为丰富,但在超富集植物与作物套种的背景下,针对伴矿景天不同种植密度以及套种联合微生物菌剂对土壤修复能力影响的研究仍较为匮乏.本文旨在通过田间小区试验,系统探究在伴矿景天−百香果套种模式下,伴矿景天的不同种植密度及添加微生物菌剂对其地上部生物量、地上部重金属 Cd 和 Zn 吸收能力的影响以及对土壤修复效果的影响,在此基础上筛选出适配当地条件的最优种植密度方案,丰富完善伴矿景天修复重金属污染土壤的理论体系,并为土壤修复的长期监测提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验田位于广西桂林市阳朔县兴坪镇思的村中轻度镉污染示范区.气候类型为亚热带季风性湿润气候,年平均气温 19℃左右.年平均降水量为 1500~1700mm,相对湿度 80%.前期对示范区进行调研,采集表层土壤(0~20cm 土层)样品,采用五点采样法混合成一个土壤样品,每个采样点标记经纬度.供试土壤的理化性质结果详见表 1.

1.2　供试材料

伴矿景天取自中国科学院南京土壤研究所广州韶关试验基地,百香果苗(嫁接苗)购买于桂林市五彩果蔬有限公司,巨大芽孢杆菌(100 亿 cru/g)、胶质芽孢杆菌(100 亿 cru/g)购买于河南新仰韶生物科技有限公司.

表 1　供试土壤的基本理化性质

Table 1　Basic physicochemical properties of tested soil

处理	pH 值	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (mg/kg)	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	总 Cd (mg/kg)	总 Zn (mg/kg)
不同套种密度	7.48	25.3	1.54	132	18.9	23.6	1.05	367
不同微生物菌剂	7.5	21.3	1.89	125	15.9	20.6	1.02	358

1.3 种植方案与设计

1.3.1 不同套种密度实验 百香果的移栽期为 2019 年 9 月中旬,伴矿景天的移栽期为 2019 年 10 月下旬(秋季种植),百香果苗选用嫁接苗,以移栽的方式种植,种植穴的大小为 60cm×60cm.百香果间株距 200cm,行距 300cm,垄两边各留宽 10cm.棚架搭设:棚架方式采用平顶棚水平式.棚高 160~200cm,棚面选用布条、铁丝均匀拉成网状,以高度为 250~280cm 的水泥柱作支柱,按行间距 2~3m 架设于试验区上,支柱上方用铁丝纵横连接成网状,并铺上尼龙网,形成棚架.种植密度:伴矿景天和百香果的种植密度分别为 11 万~44 万株/hm^2 和 1600~1700 株/hm^2.设置伴矿景天-百香果套种(D1 景天种植密度 30cm×30cm)、伴矿景天-百香果套种(D2 景天种植密度 25cm×25cm)、伴矿景天-百香果套种(D3 景天种植密度 15cm×15cm)3 个处理,4 次重复,12 个小区,每个小区面积为 24m^2(6m×4m).试验采用随机分布,小区间设置 1m 保护带.移栽前对土地进行翻耕、平整,伴矿景天垄上均覆地膜,膜上适量覆土压实.试验过程中,保持田间水分充足,梅雨季节保持沟渠疏通,每年施加复合肥 600kg/hm^2,百香果坐果后至成熟期,每株施复合肥(15-15-15) 0.1~0.2kg.辅以除草、浇水、松土等常规的田间管理措施.

1.3.2 添加微生物菌剂田间实验 添加微生物菌剂田间实验与伴矿景天不同套种密度实验的时间、种植模式均相同.设置伴矿景天-百香果套种(景天种植密度 25cm×25cm),添加巨大芽孢杆菌(Bm)、胶质芽孢杆菌(Bmk) 2 种不同处理,添加浓度均为中等浓度(0.1g/kg),在伴矿景天收获的前一个月(6 月)以水溶态形式淋于植物根部,同时以不添加菌剂作为对照组(CK).试验共分为 3 个处理,4 次重复,12 个小区,每个小区面积均为 24m^2(6m×4m).试验采用随机分布,小区间设置 1m 保护带,试验过程中常规的田间管理措施(浇水、除草、施肥)与不同套种密度实验一致.

1.4 样品的采集和处理

1.4.1 伴矿景天 不同种植密度田间实验分别于种植次年的 3 月上旬(第一茬)和 7 月上旬(第二茬)采集样品,添加微生物菌剂的田间实验于添加菌剂后的 15d、30d 采集样品.每个小区共设 3 个采样点,每个采样点选取 3 株具有代表性的伴矿景天,先用自来水将植物表面的浮土等杂质去除,随后用去离子水反复清洗 3 遍,再用吸水纸擦去表面水分,将伴矿景天地上部用烘箱 105℃杀青 2h,60℃烘干至恒重,称量干重,用于估算实验区伴矿景天地上部的生物量.烘干后的植物样品用研磨机粉碎后备用,用于测定重金属含量.

1.4.2 百香果 分别于种植次年的 3 月中旬(第一批)和次年的 11 月上旬(第二批)采集样品,每个采样点选取 3 棵代表性的百香果果肉,用于测定重金属含量.果重为每个小区随机抽取 50 个果实,使用天平测量的重量,重复 3 次取平均值;单株结果数量为每个小区内所有植株的果实数量,重复 3 次取平均值.

1.4.3 土壤 采集种植伴矿景天耕作层土壤样品,土壤样品自然风干后用研钵研磨,分别过 20 目和 100 目尼龙筛,置于自封袋中备用.

1.5 样品的测定

1.5.1 土壤理化性质 土壤基本理化性质测定方法参照鲍士旦的《土壤农化分析》[14]土壤 pH 值按水土比为 2.5:1,用 pH 计测定.土壤有机质(organic matter, OM)含量用稀释热法测定;土壤阳离子交换量(cation exchange capacity,CEC)用 NH_4Ac 交换法测定.

1.5.2 重金属含量 土壤样品(0.20g)采用 HNO_3:HF:$HClO_4$ (5:1:1,体积比)消解[15].植物样品(0.25g)用 HNO_3 +H_2O_2(1:1,体积比)消解[16].百香果果肉(鲜样 2.50g)采用 HNO_3+$HClO_4$(9:1,体积比)消解.土壤和植物消化液中重金属含量分别用 ICP-OES (Optima 5300DV, Perkin-Elmer,USA) 、 ICP-MS (Agilent 75000a, USA)测定.

1.6 数据处理

数据统计分析由 Microsoft Excel 2019 以及 SPSS20.0 软件完成,数据的绘图由 Origin 2025 完成.

相关计算公式:伴矿景天地上部镉提取量=伴矿景天地上部生物量×伴矿景天地上部镉含量

小区平均产量(kg)=(单果重×单株结果数量×小区株数)/1000

每 hm^2 产量(kg)=(小区平均产量/小区面积)×10000m^2

2 结果与分析

2.1 套种密度对伴矿景天地上部生物量的影响

不同套种密度对伴矿景天地上部的生物量有

显著影响(P<0.05).在伴矿景天-百香果套种模式下,伴矿景天的种植密度越大,其地上部生物量越高.具体而言,种植密度为 D3 伴矿景天地上部生物量在两茬种植中均显著高于其他密度.其中,第一茬和第二茬套种密度为 D3 的伴矿景天地上部生物量分别是密度 D1 和 D2 的 2.44 倍、1.94 倍以及 2.43 倍、1.92 倍.在 3 种不同套种密度下,第二茬伴矿景天的生物量均高于第一茬,分别提高了 4.33%、5.34%和 4.08%.这一结果表明,伴矿景天能够在中轻度 Cd 污染的土壤中正常生长,并且随着种植时间的延长和套种密度的增加其生长状况更为良好(图 1).

2.2　套种密度对伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量的影响

套种密度对伴矿景天地上部的 Cd、Zn 含量有显著影响.如图 2(a)、(b)所示,第一茬和第二茬伴矿景天地上部的 Cd 含量均以套种密度 D3 显著高于 D1 和 D2,地上部 Zn 含量则以套种密度 D2 和 D3 显著高于 D1(P<0.05).在相同批次中,套种密度为 D3 植物地上部 Cd 和 Zn 含量均高于 D1 和 D2.其中,第一茬种植密度 D3 的地上部 Cd 和 Zn 含量分别比 D1 和 D2 提高了 8.71%、32.6%和 5.60%、7.98%;第二茬分别提高了 8.74%、34.6%和 7.53%、8.92%.这表明在伴矿景天-百香果套种模式下,伴矿景天地上部对土壤中 Cd 和 Zn 的吸收能力随着套种密度增加而增强.此外,第二茬伴矿景天地上部的 Cd 和 Zn 含量较第一茬均呈下降趋势.在 3 种不同套种密度下,第二茬地上部 Cd 含量分别比第一茬降低了 4.48%、6.39%和 4.44%,Zn 含量分别下降了 8.75%、6.84%和 5.88%.这表明伴矿景天地上部对 Cd 和 Zn 的吸收能力会随着种植时间的延长而缓慢下降,但在高密度种植条件下,其吸收 Cd 和 Zn 能力的下降速度更为缓慢.

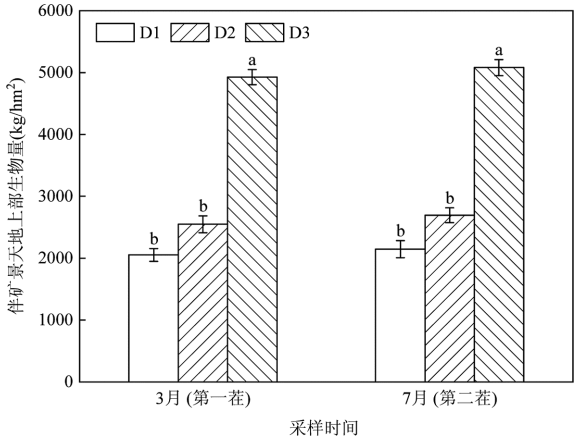


图 1　套种密度对不同采样时间伴矿景天地上部生物量的影响

Fig.1　Effect of intercropping density on aboveground biomass of *S. plumbizincicola* at different sampling times

不同小写字母表示不同处理间存在显著差异(P<0.05).下同

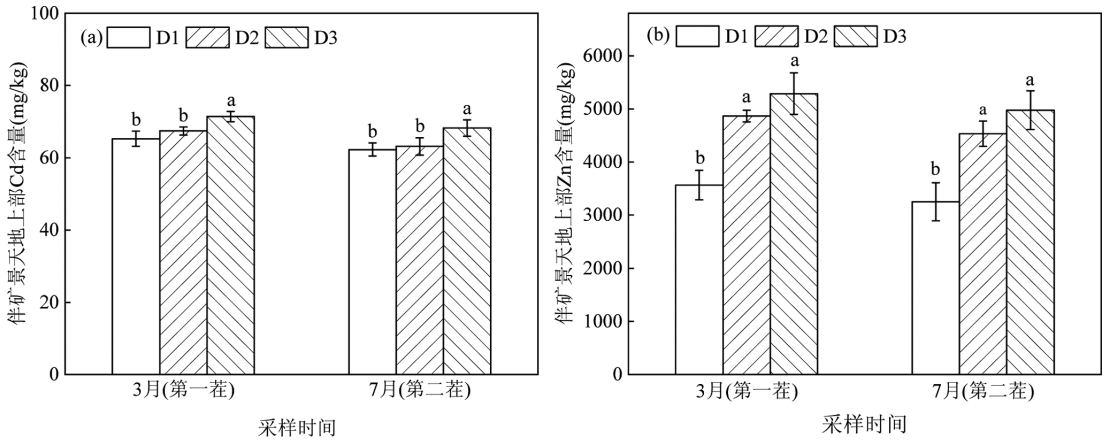


图 2　套种密度对不同采样时间伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量的影响

Fig.2　Effects of intercropping density on Cd and Zn contents in the aboveground parts of *S. plumbizincicola* at different sampling times

2.3　套种密度对伴矿景天地上部 Cd、Zn 提取量的影响

在伴矿景天和百香果套种模式下,伴矿景天种植密度为 D3 对 Cd、Zn 的年均提取量达到最大值,与种植密度 D1 和 D2 相比,Cd、Zn 的年均提取量分别提高了 62.5%、72.7%和 51.5%、52.5%,这表明不同密度对于伴矿景天的 Cd、Zn 年均提取量有较大的影响,并且以高密度 D3 伴矿景天地上部的 Cd、Zn 年均提取量最高(图 3).

由图 4(a)、(b)可知,经过伴矿景天修复后,土壤

中的 Cd 和 Zn 含量均有所降低.在伴矿景天种植密度分别为 D1、D2 和 D3 的条件下,种植 7 个月后,土壤中的 Cd 含量均显著低于种植前的初始水平,分别降低了 8.60%、12.4%和 26.7%.而在 3 种不同的种植密度下,种植伴矿景天前后土壤中 Zn 含量均未表现出显著性差异.当伴矿景天种植密度为 D3 时,土壤中的 Cd 和 Zn 含量均达到最低水平.与种植密度 D1 和 D2 相比,D3 密度下土壤中 Cd 和 Zn 的下降量分别提高了 19.8%、16.3%和 5.59%、3.15%.这表明种植密度显著影响伴矿景天对土壤 Cd 和 Zn 的修复能力,且高种植密度对土壤中重金属 Cd 的修复效果更为显著(P<0.05).

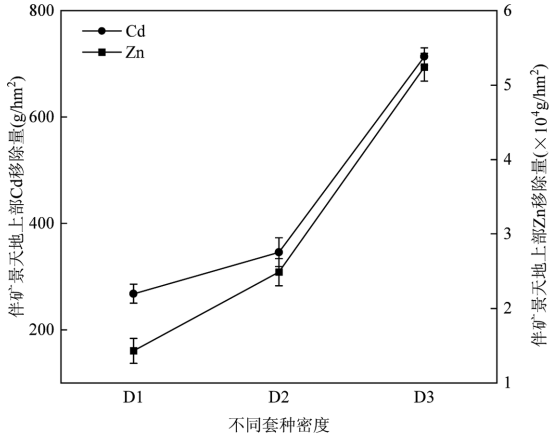


图 3 套种密度对伴矿景天地上部 Cd、Zn 提取量的影响

Fig.3 Effect of intercropping density on the extraction of Cd and Zn in the aboveground parts of *S. plumbizincicola*

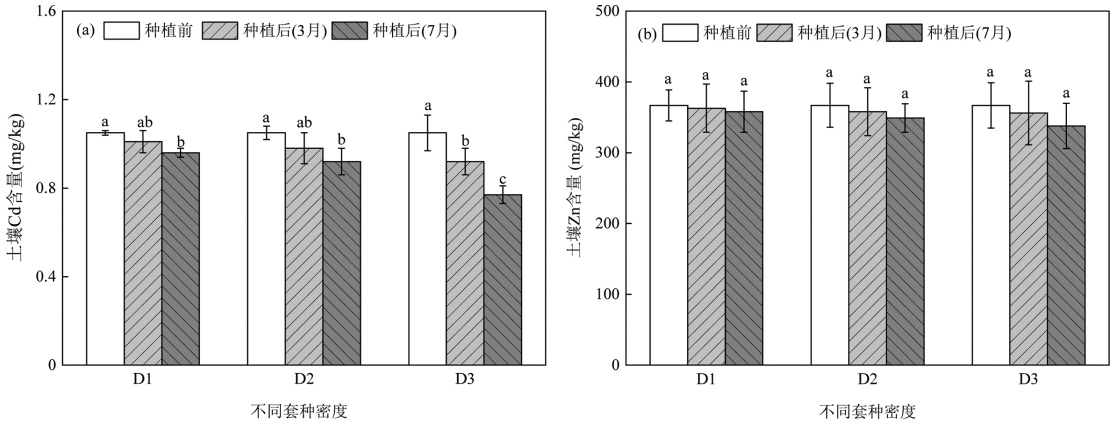


图 4 不同套种密度修复前后土壤 Cd、Zn 含量变化

Fig.4 Soil Cd and Zn contents before and after remediation at different intercropping densities

2.4 套种密度对百香果果肉 Cd、Zn 含量及产量的影响

如表 2 所示,随着植物修复时间的延长,百香果果肉中 Cd 和 Zn 含量呈持续下降趋势.在套种密度为 D1、D2 和 D3 条件下,次年 11 月(第二批)收获的百香果中 Cd 和 Zn 含量相较于 3 月(第一批)分别下降了 17.4%、22.2%、27.9%和 10.4%、8.70%、11.6%.此外,次年 11 月(第二批)在伴矿景天种植密度为 D3 时,百香果果肉中的 Cd 和 Zn 含量均显著低于其他两种密度(P<0.05).这一结果表明,伴矿景天的高密度种植更有利于减少土壤中重金属向百香果果肉的转移.并且 2 批收获百香果果肉中的 Cd 含量均低于《食品安全国家标准食品中污染物限量》的规定值(0.05mg/kg,GB 2762－2022).由表 3 可知,在伴矿景天–百香果套种模式下,在同一采样时间内,不同伴矿景天种植密度下百香果单果重、单株结果个数、小区平均产量以及总产量不存在显著性差异,但在次年 3 月与次 11 月均以伴矿景天种植密度为 D2 的百香果产量高于种植密度 D1、D3,分别提高了 8.94%、14.7%和 7.48%、7.94%.在不同采样时间以及不同伴矿景天种植密度下,次年 11 月份百香果的单果重、单株结果个数、小区平均产量以及总产量显著高于次年 3 月伴矿景天各种植密度下百香果的产量(P<0.05),其中以伴矿景天种植密度为 D2 时百香果产量最高.

表 2 不同套种密度对百香果果肉 Cd 和 Zn 含量的影响

Table 2 Effect of different intercropping densities on Cd and Zn contents of passion fruit pulp

采样时间	套种密度	Cd 含量(mg/kg)	Zn 含量(mg/kg)
3 月	D1	0.046±0.004a	4.8±0.03a
	D2	0.045±0.001a	4.6±0.02b
	D3	0.043±0.001a	4.3±0.03c
11 月	D1	0.038±0.002b	4.3±0.11c
	D2	0.035±0.001b	4.2±0.10c
	D3	0.031±0.001c	3.8±0.10d

注:同列小写字母表示不同处理间存在显著差异(P<0.05).下同.

表 3　不同套种密度对百香果产量的影响

Table 3　Effect of different intercropping densities on the yield of passion fruit

采样时间	套种密度	单果重(g)	单株结果个数	小区株数(株)	小区平均产量(kg)	产量(kg/hm^2)
3 月	D1	80.5±4.2abBC	43.6 ±3.1aC	9	31.6±3.9aC	13166.7aC
	D2	85.2±3.5aAB	45.3±2.3aBC	9	34.7±3.2aBC	14459.3aBC
	D3	74.8±4.8bC	43.9±2.6aC	9	29.6±3.6aC	12333.3aC
11 月	D1	88.6±4.9aA	49.6±1.6aAB	9	39.6±3.5aAB	165000aAB
	D2	89.3±1.9aA	53.4±2.3aA	9	42.8±2.8aA	17833.3aA
	D3	86.1±2.5aAB	50.8±4.4aA	9	39.4±4.6aAB	16416.7aAB

注:同列小写字母表示不同处理间存在显著差异,同列大写字母表示不同月份及不同处理间存在显著差异(P<0.05).

2.5　套种联合微生物菌剂对伴矿景天地上部生物量及 Cd、Zn 含量的影响

添加微生物菌剂显著影响伴矿景天地上部生物量.在添加两种菌剂后,伴矿景天地上部生物量均呈现明显上升趋势,其中添加 Bmk 菌剂处理对生物量的促进效果显著高于 CK 和添加 Bm 菌剂的处理(P<0.05).相比之下,未添加菌剂的对照组生物量变化较小,种植 30d 后仅上升了 4.30%.而添加 Bm 菌剂的处理在 30d 后伴矿景天生物量增加了 33.4%,与 CK 相比生物量增加了 29.8%.更为显著的是添加 Bmk 菌剂的处理在 30d 后使伴矿景天地上部生物量增加了 45.8%,与 CK 相比生物量增加了 43.2%(P<0.05).此外,添加 Bmk 菌剂 30d 后的伴矿景天生物量是添加 Bm 菌剂处理的 1.23 倍,是未添加菌剂处理的 1.76 倍.这表明在镉污染条件下,添加 Bmk 菌剂能够更有效地促进伴矿景天地上部生物量的积累(图 5).

未添加微生物菌剂(CK)伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量随种植时间的延长而下降.然而,添加微生物菌剂后伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量均随种植时间的增长呈现上升趋势.与 CK 相比,添加 Bm、Bmk 菌剂 30d 后伴矿景天地上部的 Cd 含量分别增加了 5.25%和 7.02%,Zn 含量分别增加了 14.6%和 20.9%.这一结果表明,在伴矿景天根际添加 Bm 和 Bmk 菌剂能够显著提高其地上部 Cd 和 Zn 的含量,并且这种提升效果随着种植时间的延长而愈发明显(P<0.05).此外,微生物菌剂对伴矿景天地上部重金属含量的影响效果表现为 Bmk>Bm.(图 6).

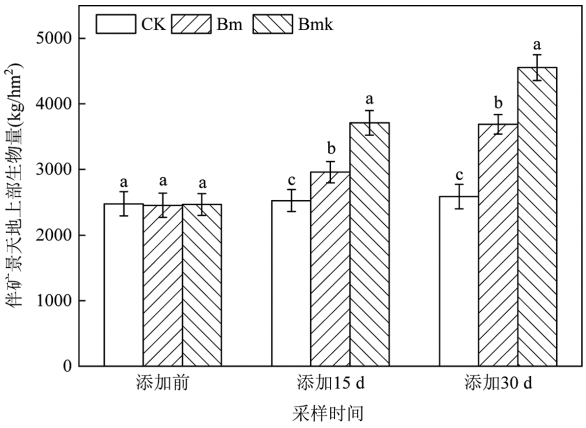


图 5　添加巨大、胶质芽孢杆菌对伴矿景天地上部生物量的影响

Fig.5　Effect of Bm and Bmk application on aboveground biomass accumulation of *S. plumbizincicola*

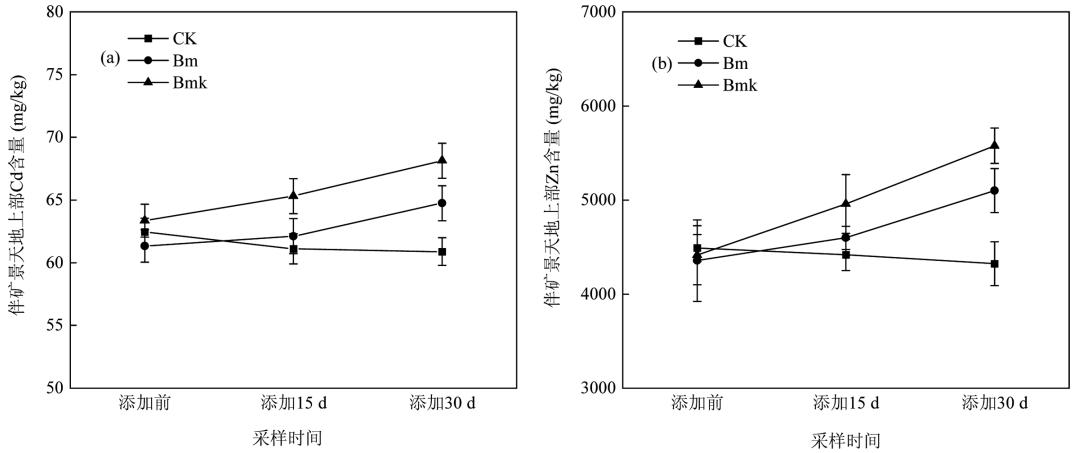


图 6　添加巨大、胶质芽孢杆菌对伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量的影响

Fig.6　Effects of Bm and Bmk application on the Cd and Zn contents in the aboveground parts of *S. plumbizincicola*

2.6 套种联合微生物菌剂对土壤 pH 值及 Cd、Zn 含量的影响

根际和非根际土壤的 pH 值随着种植时间的延长均呈现下降趋势.种植 30d 后,未添加菌剂(CK)、添加 Bm 和 Bmk 菌剂处理的根际土壤 pH 值分别降低了 5.32%、8.02%和 11.5%(图 7(a)),而非根际土壤的 pH 值分别降低了 1.45%、3.98%和 5.97%(图 7(b)).这表明在 Cd 的刺激下,伴矿景天根系能够分泌某种酸性物质,从而降低土壤的 pH 值,且添加微生物菌剂后,降低土壤 pH 值的效果更佳(P<0.05).此外,在不同处理中,根际土壤 pH 值的降低率均高于非根际土壤.

土壤中有效态重金属的含量是衡量超积累植物吸收土壤中重金属的标准之一.由表 4 所示,随着种植时间的延长,未添加菌剂的伴矿景天根际土壤中的有效态 Cd、Zn 含量均显著下降.未添加微生物菌剂的伴矿景天根际、非根际土壤有效态 Cd、Zn 含量分别从未添加前的 0.50、0.45mg/kg 和 46.8、44.5mg/kg 降低到第 30d 收获时的 0.38、0.31mg/kg 和 34.2、29.3mg/kg,土壤中的有效态 Cd、Zn 含量分别降低了 24.0%、31.1%和 26.9%、34.2%.添加 Bm、Bmk 菌剂后土壤有效态 Cd、Zn 含量均显著升高,且不同采样时间根际土壤中有效态 Cd、Zn 含量均高于非根际土壤,这与未添加菌剂的变化趋势相反.添加 Bm 菌剂 30d 后,根际、非根际土壤有效态 Cd、Zn 含量分别增加了 18.5%、8.81%和 27.0%、12.1%.添加 Bmk 菌剂 30d 后,根际、非根际土壤有效态 Cd、Zn 含量分别增加了 26.1%、13.6%和 30.8%、14.5%.添加 Bm、Bmk 菌剂后土壤中的有效态 Cd、Zn 含量均显著提高,表明添加 Bm、Bmk 菌剂可以提高土壤中的重金属有效态含量.此外,添加 Bmk 菌剂 30d 后伴矿景天的根际、非根际土壤 Cd、Zn 的提高量分别是添加 Bm 菌剂的 1.41、1.54 倍和 1.14、1.20 倍.

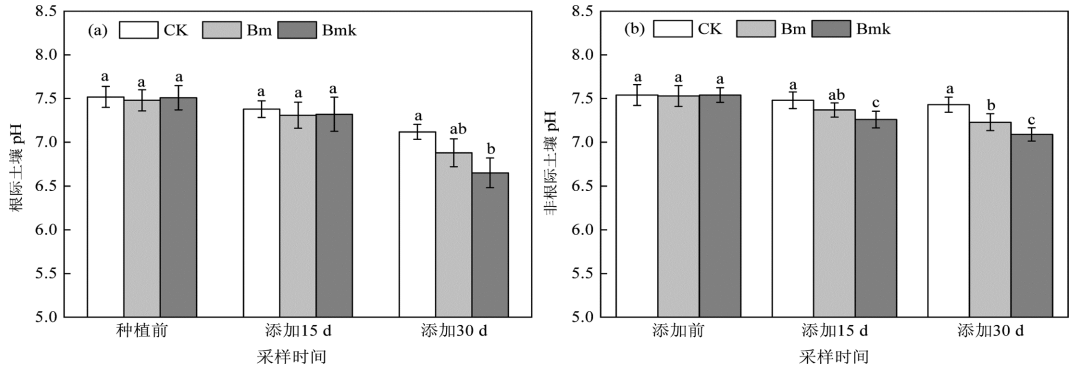


图 7 根际和非根际土壤 pH 随处理时间的变化

Fig.7 Rhizosphere and non-rhizosphere soil pH in different treatment time

表 4 不同时期土壤有效态 Cd、Zn 含量

Table 4 Content of available Cd and Zn in soil at different treatments

处理	土壤有效态	CK 根际土壤	CK 非根际土壤	添加 Bm 菌剂 根际土壤	添加 Bm 菌剂 非根际土壤	添加 Bmk 菌剂 根际土壤	添加 Bmk 菌剂 非根际土壤
添加前	Cd 含量(mg/kg)	0.50±0.010a	0.45±0.01a	0.53±0.006c	0.46±0.005c	0.51±0.006c	0.45±0.005c
15d		0.46±0.009b	0.36±0.01ab	0.58±0.009b	0.51±0.01b	0.57±0.009b	0.49±0.01b
30d		0.38±0.007c	0.31±0.007b	0.65±0.007a	0.63±0.007a	0.69±0.007a	0.65±0.007a
添加前	Zn 含量(mg/kg)	46.8±0.56a	44.5±1.78a	44.5±0.56b	42.1±0.78b	45.6±0.56c	44.1±0.45c
15d		42.3±0.89b	36.5±1.45b	44.9±0.89b	43.2±0.45ab	48.1±0.89b	45.4±0.55b
30d		34.2±1.20c	29.3±0.70c	48.8±0.75a	47.9±0.70a	52.8±0.34a	51.6±0.7a

3 讨论

3.1 套种密度及套种联合微生物菌剂对伴矿景天植株的影响

套种可提高土地利用率和产量[17-18].尽管套种过程中可能存在一定的竞争效应,但高种植密度仍能显著提升作物对重金属的吸收效率[19].在本研究中,伴矿景天-百香果的套种模式下高密度种植伴矿

景天表现出显著的生物量增长优势(P<0.05).具体而言,当伴矿景天种植密度为 D3 时其地上部生物量分别是 D1 和 D2 处理的 2.4 倍和 1.9 倍,与刘玲等[20]研究伴矿景天种植密度设置 44 万株/hm^2(景天密度 15cm×15cm)时,景天地上部生物量达到最大值 10.2t/hm^2 的研究结果一致.这可能是由于适当增加种植密度可以提高环境资源如光、水和热的利用率,从而可增加伴矿景天地上部生物量.添加 Bmk 菌剂 30d 后伴矿景天地上部生物量高于 CK 和添加 Bm 菌剂,这可能是由于 Bmk 能更有效地溶解含钾的长石、云母、磷灰石、磷矿粉等矿物的难溶性钾及磷[21-22],增强土壤肥力,为作物提供更多可吸收利用的营养元素,增加植物的生物量.此外,袁雅文等[23]研究表明微生物菌肥本身含有各类营养元素也能活化土壤中的养分,为作物生长提供所需的营养物质,加速土壤养分的分解转化和释放从而提高植物的生物量.

伴矿景天第二茬地上部的 Cd、Zn 含量较第一茬均呈现下降趋势,在相同批次伴矿景天种植密度为 D3 伴矿景天地上部 Cd、Zn 的含量均高于种植密度 D1、D2,表明高密度种植更有利于植物对重金属 Cd、Zn 的吸收,这可能是由于随着种植密度的适当增加,作物之间的竞争促进了根系的增殖,从而增加作物对重金属的吸收[24].Deng 等[25]研究表明,在玉米和伴矿景天间作的植株密度试验中,植物修复效率随伴矿景天植株种植的密度增大而增加.杨泉等[26]研究表明当种植密度为 16.50 万株/hm^2 处理的高粱镉吸收含量要高于种植密度为 9.00、12.8、10.9 万株/hm^2 时重金属的吸收总量.此外,伴矿景天地上部对 Cd、Zn 吸收量增加可能是由于其生物量的增加,本实验中随着伴矿景天地上部生物量的增加其地上部对重金属 Cd、Zn 的吸收量也得到了显著提高(P<0.05).

添加微生物菌剂后伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量均随种植时间的增长呈现明显上升趋势,且对于植物地上部重金属含量的影响表现为 Bmk>Bm>CK,这可能是由于微生物菌剂作为生物肥料可以分解矿物和生物絮凝等,提高植物对土壤中重金属的富集吸收能力[21].

3.2　套种密度及套种联合微生物菌剂对土壤环境的影响

植物种植密度影响植物对土壤重金属的吸收能力.在伴矿景天-百香果套种模式下,与种植密度 D1 和 D2 相比,D3 密度下土壤中 Cd 和 Zn 的下降量分别提高了 19.8%、16.3%和 5.59%、3.15%.这可能是由于伴矿景天具有 Cd 离子转运蛋白[27],可以防止植物镉毒害作用,而在高密度种植条件下又增加了植物对土壤营养元素的竞争,提高了重金属的吸收能力,从而降低土壤中的重金属含量.此外,伴矿景天根系分泌的有机酸可增加土壤有效态镉的含量.李侃麒等[28]研究表明有机酸不仅参与根系 Cd 的吸收,在对质膜上的离子通道也有激活作用.本研究中添加 Bm 和 Bmk 菌剂根际土壤和非根际土壤的 pH 值均随着种植时间的延长呈现下降趋势,并且均以添加 Bmk 菌剂土壤 pH 值下降程度高于添加 Bm 菌剂,这可能是由于微生物菌剂进入土壤后自身代谢活动增强,提高了其合成和分解有机酸的能力[29-30],而胶质芽孢杆菌中本身就含有草酸、柠檬酸等低分子量有机酸[31]使得土壤中的 pH 值降低更明显.有研究报道,微生物产生的酶也能转运重金属,分枝杆菌属和支原体属能够通过 P1B 型 ATP 酶将 Cd 和 Pb 转运到细胞内,从而降低土壤中 Cd 和 Pb 的浓度[32-33].随着种植时间的加长,未添加菌剂(CK)根际土壤中的有效态 Cd、Zn 含量均显著下降,非根际土壤 Cd、Zn 含量均低于根际土壤,而添加 Bm 和 Bmk 菌剂土壤有效态 Cd、Zn 含量均显著升高,且不同采样时间根际土壤中有效态 Cd、Zn 含量均高于非根际土壤,这可能是由于土壤自身的土著微生物、酶、电解质等并不能有效地活化土壤中的重金属因而对照组土壤中重金属有效态含量会随着时间的延长而降低,并且根际土壤中 Cd、Zn 含量均高于非根际土壤.添加微生物菌剂可通过降低土壤的 pH 值,使土壤碳酸盐结合态等难溶解的 Cd 溶解成为水溶态或可交换态的能力更强[34],土壤中有效态重金属含量增多,超富集植物伴矿景天能吸收更多的重金属,这就很好地解释了添加微生物菌剂植物地上部重金属含量增多的原因,植物将土壤的重金属吸收到体内,从而达到修复重金属污染土壤的效果.

3.3　套种密度对百香果果肉 Cd、Zn 含量及产量的影响

伴矿景天作为超富集植物,与其他作物相比,对土壤重金属 Cd、Zn 具有极大的吸附能力.经过伴矿

景天修复减少土壤 Cd 含量,从而可以降低农作物的对 Cd 的吸收量.本研究经过两茬不同种植密度伴矿景天修复,百香果果肉的 Cd 含量均不同程度减少,次年 11 月(第二批)在伴矿景天套种密度为 D3 时,百香果果肉中的 Cd 和 Zn 含量均显著低于 D1、D2(P<0.05),并且收获百香果果肉中的 Cd 含量均符合国家食品标准,这与居述云等[35]研究伴矿景天/小麦间作小麦籽粒中重金属含量较单作降低了 52.4%的结果一致.在同一采样时间内伴矿景天种植密度为 D2 时百香果小区平均产量高于 D1 和 D3 但不存在显著性差异,这可能是由于伴矿景天在生长过程中根部释放的氨基酸等有机物质,被土壤中的微生物利用后,促进土壤中养分的转化,从而提高作物的产量[36].但当种植数量过多时会吸收更多的土壤养分,与浅根细作物百香果形成养分竞争[37],从而导致百香果的产量减少.Mupangwa 等[38]研究发现玉米和豆科作物间作对生长资源(如土壤水分和植物养分)的竞争导致了玉米产量的下降.不同采样时间显著性差异分析显示 11 月(第二批)百香果产量高于 3 月(第一批)百香果产量,这可能是由于百香果属于热带水果对热量条件的要求较为严格,而 11 月的气候可能更接近这一温度范围,有利于果实成熟和产量增加.陈家辉等[39]研究表明 6~11 月份的气候环境更适合百香果生长.

4 结论

4.1 在伴矿景天-百香果套种模式下,高密度种植伴矿景天能够提高伴矿景天地上部的生物量和 Cd、Zn 的吸收量,有利于 Cd、Zn 污染农田土壤的修复.百香果果肉中 Cd 含量随着景天种植密度的增加而降低,并且均低于国家食品安全标准值.

4.2 伴矿景天-百香果套种模式下添加 Bm、Bmk 菌剂均能够提高伴矿景天地上部的生物量,显著降低土壤 pH 值(P<0.05).未添加微生物菌剂的土壤有效态 Cd、Zn 含量呈现明显的下降趋势,而添加 Bm、Bmk 菌剂后根际和非根际土壤有效态 Cd、Zn 含量均随着种植时间的延长有不同程度的提高,某种程度上这种提高更有利于植物修复,缩短修复年限.

4.3 在伴矿景天-百香果套种模式下添加 2 种菌剂对于伴矿景天的生长作用及土壤修复效果均表现为 Bmk>Bm.

参考文献:

[1] Beharry R, Joseph A, Gordon A, et al. Heavy metals in soils associated with fertilizers in Trinidad [J]. Journal of Geo science and Environment Protection, 2023,11(1):232-248.

[2] Dönmez-Altuntas H, Hamurcu Z, Liman N, et al. Increased micronucleus frequency after oral administration of cadmium in dogs [J]. Biological Trace Element Research, 2006,112:241-246.

[3] Tang X, Li Q, Wu M, et al. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China [J]. Journal of Environmental Management, 2016,181:646-662.

[4] Shah V, Daverey A. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020,18:100774.

[5] Wang C, Deng L, Zhang Y, et al. Farmland phytoremediation in bibliometric analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351:119971.

[6] Hu P, Wang Y, Przybyłowicz W J, et al. Elemental distribution by cryo-micro-PIXE in the zinc and cadmium hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* grown naturally [J]. Plant and Soil, 2014,388(1/2): 267-282.

[7] Kuppens T, Van Dael M, Vanreppelen K, et al. Techno-economic assessment of fast pyrolysis for the valorization of short rotation coppice cultivated for phytoextraction [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,88:36-344.

[8] Yin W, Chai Q, Zhao C, et al. Water utilization in intercropping: A review [J]. Agricultural Water Management, 2020,241:106335.

[9] Qiu Y, Li X, Tang Y, et al. Directly linking plant N, P and K nutrition to biomass production in cotton-based intercropping systems [J]. European Journal of Agronomy, 2023,151:126960.

[10] Nadeem S M, Zahir Z A, Naveed M, et al. Rhizobacteria capable of producing ACC - deaminase may mitigate salt stress in wheat [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(2):533-542.

[11] Liu Y M, Zheng F, Liu Z H, et al. Enhanced root and stem growth and physiological changes in *Pinus bungeana Zucc*. Seedlings by microbial inoculant application [J]. Forests, 2022,13(11):1836.

[12] Qi X, Xiao S, Chen X, et al. Biochar-based microbial agent reduces U and Cd accumulation in vegetables and improves rhizosphere microecology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,436:129147.

[13] Ma Y, Oliveira R S, Nai F, et al. The hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* harbors metal-resistant endophytic bacteria that improve its phytoextraction capacity in multi-metal contaminated soil [J]. Journal of Environmental Management, 2015,156:62-69.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[15] Mcgrath S P, Cunliffe C H. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1985,36(9):794-798.

[16] Allen S E, Grimshaw H, Parkinson J A, et al. Chemical analysis of ecological materials [M]. Oxford:Blackwell Scientific Publications, 1974.

[17] Bargaz A, Noyce G L, Fulthorpe R, et al. Species interactions enhance

root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency [J]. Applied Soil Ecology, 2017,120:179−188.

[18] Ma L, Liu Y, Wu Y, et al. The effects and health risk assessment of cauliflower co−cropping with *Sedum alfredii* in cadmium contaminated vegetable field [J]. Environmental Pollution, 2021,268:115869.

[19] Jacobs A, De Brabandere L, Drouet T, et al. Phytoextraction of Cd and Zn with *Noccaea caerulescens* for urban soil remediation: influence of nitrogen fertilization and planting density [J]. Ecological Engineering, 2018,116:78−187.

[20] 刘　玲,吴龙华,李　娜,等.种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响 [J]. 环境科学, 2009,30(11):3422−3426.
Liu L, Wu LH, Li N, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola* [J]. Environmental Science, 2009,30(11):3422–3426.

[21] 田　稼,吴小杰,孙　超,等.胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)的研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2017,(6):15−22.
Tian J, Wu X J, Sun C, et al. Research progress on *Bacillus mucilaginosus* [J]. Chinese Journal of Soil and Fertiliser, 2017,(6):15−22.

[22] Sun T, Liu Y, Wu S, et al. Effects of background fertilization followed by co−application of two kinds of bacteria on soil nutrient content and rice yield in northeast China [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(2):154−162.

[23] 袁雅文.有益微生物作用机理及微生物菌肥的应用前景 [J]. 杂交水稻, 2022,37(4):7−14.
Yuan Y W. Action mechanism of beneficial microorganisms and application prospect of microbial fertilizers [J]. Hybrid Rice, 2022, 37(4):7–14.

[24] Li H, Wang X, Brooker R W, et al. Root competition resulting from spatial variation in nutrient distribution elicits decreasing maize yield at high planting density [J]. Plant and Soil, 2018,439(1/2):219−232.

[25] Deng L, Li Z, Wang J, et al. Long−term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies [J]. International Journal of Phytoremediation, 2015,18(2):134−140.

[26] 杨　泉,王学华,敖和军,等.不同种植密度高粱对耕地重金属污染的修复效果 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018,44(3):234−239.
Yang Q, Wang X H, Ao H J, et al. Remediation effect on heavy metal pollution of sorghum planting density [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2018,44(3):234−239.

[27] Zhao X L, Liu J F, Xia X L, et al. The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bioconcentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2014,21(7):5076−5085.

[28] 李侃麒,吴佳玲,陈　喆,等.天然有机酸对伴矿景天吸取土壤镉的影响 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2413−2422.
Li K Q, Wu J L, Chen Z, et al. Effects of natural organic acids on cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola* from the soil [J]. Chinese Environmental Science, 2023,43(5):2413−2422.

[29] 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.

[30] 赖才星,林　华,刘泽蕙,等.巨大芽孢杆菌−青葙组合对镉污染土壤微生物群落演替的驱动作用 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):1036−1044.
Lai C X, Lin H, Liu Z H, et al. The driving effect of *Bacillus megaterium−Celosia argentea* L. combination on the succession of microbial communities in cadmium−contaminated soil [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):1036−1044.

[31] Yang X, Li Y, Lu A, et al. Effect of *Bacillus mucilaginosus* D4B1on the structure and soil−conservation−related properties of montmorillonite [J]. Applied Clay Science, 2016,119:141−145.

[32] Raimunda D, Long J E, Sassetti C M, et al. Role in metal homeostasis of CtpD, a Co^{2+} transporting $P1B^{4-}$ ATPase of *Mycobacterium smegmatis* [J]. Molecular Microbiology, 2012,84(6):1139−1149.

[33] López M, Quitian L V, Calderón M N, et al. The P−type ATPase CtpG preferentially transports Cd^{2+} across the *Mycobacterium tuberculosis* plasma membrane [J]. Archives of Microbiology, 2018,200(3):483−492.

[34] Xu X, Yue X, Wang D, et al. Prevention of cadmium contamination by microbial inoculant and its potential mechanism [J]. Agriculture, 2024,14(6):881.

[35] 居述云,汪　洁,宓彦彦,等.重金属污染土壤的伴矿景天/小麦−茄子间作和轮作修复 [J]. 生态学杂志, 2015,34(8):2181−2186.
Ju S Y, Wang J, Mi Y Y, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(8):2181−2186.

[36] 王京文,蔡　梅,郑洁敏,等.丝瓜与伴矿景天间作对土壤 Cd 形态及丝瓜 Cd 吸收的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016,35(12):2292−2298.
Wang J W, Cai M, Zheng J M, et al. Investigating the intercropping effects of *Sedum plumbizincicola* and *Luffa cylindrical* on soil cadmium fractions and cadmium uptake by *Luffa cylindrical* [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2016,35(12):2292−2298.

[37] 陈国皓,艳　群,湛方栋,等.钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019,38(9):2103−2110.
Chen G H, Yan Q, Zhan F D, et al. Effects of passivators on the growth and cadmium accumulation of intercropped *Maize* and *Sedum plumbizincicola* [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2019, 38(9):2103–2110.

[38] Mupangwa W, Nyagumbo I, Liben F, et al. Maize yields from rotation and intercroping systems with different legumes under conservation agriculture in contrasting agro−ecologies [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021,306:107170.

[39] 陈家辉,宋永炼,李圳坤,等.贵州省从江县百香果种植气候适宜性分析 [J]. 基层农技推广, 2025,13(2):38−41.
Chen J H, Song Y L, Li Z K, et al. Analysis of climatic suitability for *passion fruit* cultivation in Congjiang county, Guizhou province [J]. Primary Agricultural Technology Extension, 2025,13(2):38−41.

作者简介：韦丽媛(2000−),女,广西柳州人,广西师范大学硕士研究生,主要从事土壤修复与安全利用.发表论文 1 篇.2830669172@qq.com.