



# 核桃青皮在土壤重金属植物修复中的应用

朱晓丽<sup>1</sup>,赵锦绣<sup>1</sup>,程燕萍<sup>1</sup>,张 星<sup>1</sup>,寇 兵<sup>1</sup>,王军强<sup>2</sup>

(1. 西北大学 城市与环境学院,陕西 西安 710127;2. 西安金博瑞生态科技有限公司,陕西 西安 710065)

**摘要** 该研究以核桃青皮发酵产物配施生物炭为固定化载体,结合前期筛选的硫酸盐还原菌(SRB15-3-2),制备得到了核桃青皮固定化菌剂,用于重金属污染土壤修复。基于 pH、含水率、总养分、有机质、种子发芽指数和重金属含量等指标,评估了核桃青皮的发酵效果。通过配施生物炭并接种 SRB15-3-2 得到了改良后的固定化菌剂,考察了核桃青皮固定化菌剂对土壤重金属形态转化、植物生长及重金属富集能力的影响。结果表明,核桃青皮固定化菌剂促进了青菜生长并提高了生物量,与对照组(CK)相比,施加固定化菌剂的 Cu 和 Cd 污染土壤中青菜的株高分别增加了 12.62% 和 5.42%,地上部分干重分别增加了 95.05% 和 47.93%;固定化菌剂对土壤重金属表现出明显的钝化作用,促进了 Cu 和 Cd 从可交换态向残渣态转化,从而降低了重金属的迁移性及生物毒性,且青菜地下部分 Cu 和 Cd 的含量相比 CK 组降低了 92.92% 和 72.83%,地上部分含量降低了 34.00% 和 3.30%。研究结果为重金属污染土壤修复和核桃青皮的资源化利用提供了科学依据和理论支撑。

**关键词** 核桃青皮;固定化菌剂;重金属;土壤修复

**中图分类号:**X53 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbzr.2023-06-010

## The application of walnut green husk in soil heavy metal phytoremediation

ZHU Xiaoli<sup>1</sup>, ZHAO Jinxiu<sup>1</sup>, CHENG Yanping<sup>1</sup>, ZHANG Xing<sup>1</sup>,  
KOU Bing<sup>1</sup>, WANG Junqiang<sup>2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Xi'an Jinborui Ecological Technology Co., LTD, Xi'an 710065, China)

**Abstract** The study developed a walnut green husk immobilization bacterial agent using biochar and sulfate reducing bacteria, which was used to remediate heavy metal-contaminated soil. The fermentation effect of walnut green husk was evaluated based on pH, water content, total nutrients, organic matter, seed germination index and heavy metal content. An improved immobilized bacterial agent was obtained by dispensing biochar and inoculating with SRB15-3-2, and the effects of walnut green husk immobilized bacterial agent on the transformation of soil heavy metal fraction, plant growth and heavy metal enrichment capacity were investigated. The results showed that the immobilized bacterial agent of walnut green husk promoted the growth of green cabbage

收稿日期:2023-09-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1002404);陕西省重点研发计划项目(2019NY-200,2020ZDLNY06-06,2020ZDLNY07-10);西安市科技计划项目(2019-GXYD18.9,20193057YF045NS045)。

第一作者:朱晓丽,女,教授,博士生导师,从事污染土壤修复研究,xiaolizhu@nwu.edu.cn。

and increased the biomass. Compared with the control group (CK), the plant height of green cabbage in Cu and Cd contaminated soil with immobilized bacterial agent increased by 12.62% and 5.42%, respectively, and the dry weight of the aboveground part increased by 95.05% and 47.93%, respectively. In addition, the immobilized bacterial agent exhibited significant passivation of soil heavy metals and promoted the transformation of Cu and Cd from the exchangeable fraction to the residue fraction, thus reducing the mobility and biotoxicity of heavy metals. And the content of Cu and Cd in the underground part of the green cabbage was reduced by 92.92% and 72.82%, and the content of Cu and Cd in the aboveground part was reduced by 34.00% and 3.30% compared with that in the CK group. The results of this study provide scientific basis and theoretical support for the remediation of heavy metal contaminated soil and the resource utilization of walnut green husk.

**Keywords** walnut green husk; immobilized bacterial agent; heavy metal; soil remediation

核桃是我国第二大木本油料作物,年产量超过  $300 \times 10^4$  t,在核桃生产过程中会产生  $1\ 100 \times 10^4$  t 的核桃青皮<sup>[1]</sup>。然而,目前的研究大多关注核桃青皮中可利用物质的提取,无法有效满足大产量背景下核桃青皮的资源化利用。相关研究已发现<sup>[2-4]</sup>,核桃青皮在修复重金属污染土壤方面具有一定的潜力,同时作为有机肥可以改善土壤肥力、提高营养元素含量和生物多样性。但核桃青皮中存在大量难降解的木质纤维素,若不进行有效处理也会对土壤造成不良影响<sup>[5-6]</sup>。

土壤是地表生态系统维持植物生长、能量循环的基础,其中蕴含着多种物理、化学以及生物变化过程<sup>[7-8]</sup>。近年来,高强度的工农业发展导致重金属污染愈发严重<sup>[9-11]</sup>。据统计,截止2014年,我国土壤重金属总体超标率超过16%,其中镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍8种重金属点位超标率分别为7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%<sup>[12]</sup>。此外,由于土壤颗粒对重金属的强吸附作用,促使其污染具有持久性和隐蔽性等特点<sup>[13]</sup>,更易通过食物链传输对人体健康造成不可逆的伤害<sup>[14-15]</sup>。研究表明,长期暴露在重金属环境中会诱发心血管疾病、肺损伤、肾衰竭、胃痛、骨折、不孕不育和心理障碍等疾病<sup>[16-18]</sup>。因此,土壤重金属污染治理已迫在眉睫。

目前常用的修复方法中,微生物技术因其操作简单、成本低等独特优点,受到国内外学者的关注<sup>[19]</sup>,被广泛应用于污染土壤的改良<sup>[20-23]</sup>。相关研究表明,硫酸盐还原菌可以将环境中的硫酸根离子还原成硫离子,并与重金属离子结合生成沉淀物,从而达到钝化重金属的目的。研究显示,接种硫酸盐还原菌后,土壤中生物可利用Cu和Cd的含量分别下降了85%和31.26%<sup>[24-25]</sup>。然而,微生物修复存在周期长、存活率低等局限性<sup>[26]</sup>。

选择合适的载体固定功能微生物,能够有效改善微生物原有的栖息环境,提高其活性。因此,本研究以核桃青皮有机肥为对象,探讨了接种硫酸盐还原菌对土壤重金属固定化、植物生长及重金属富集能力的影响。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验原材料及培养基

核桃青皮来源于陕西省西安市,品种为香玲;供试土壤采自西北大学校园树林园地;供试植物为青菜,种子购置于北京奇新农业科技发展有限公司,品种为四月慢;实验所用木质纤维素及胡桃醌多功能降解菌(M2、M7、X1、X2)为核桃青皮发酵过程中筛选得到的优势菌株,其中M2为纺锤形赖氨酸芽孢杆菌,M7为微白黄链霉菌,X1为杂色曲霉,X2为球孢白僵菌;硫酸盐还原菌(SRB 15-3-2)为课题组前期从陕西省宝鸡市凤县铅锌矿周围土壤筛选并驯化的Cu和Cd耐受菌株,经鉴定为肠杆菌<sup>[27]</sup>。

碱木质素培养基(M7):硫酸铵2 g,七水合硫酸镁0.5 g,磷酸氢二钾1 g,氯化钠0.5 g,碱木质素5 g,蒸馏水1 000 mL。

LB培养基(M2、X1、X2):氯化钠10 g,蛋白胨10 g,酵母提取物5 g,蒸馏水1 000 mL。

硫酸盐还原菌培养基:磷酸氢二钾0.5 g,硫酸铵2.5 g,碳酸铵0.5 g,氯化钙0.2 g,硫酸镁1.0 g,酵母膏1.5 g,乳酸钠2 mL,在烧杯中用蒸馏水溶解至1 000 mL,调节pH为7.2,温度为121℃,灭菌30 min。使用前将L-半胱氨酸盐酸盐置于紫外灯下射杀4 h,用无菌水配制成溶液,再加入灭过菌的培养基中,使其浓度为0.5 g/L。

植物生长营养液:铁盐溶液,七水合硫酸亚铁

2.78 g,乙二胺四乙酸二钠 3.73 g,500 mL 蒸馏水,pH 为 5.5;微量元素液,碘化钾 0.83 mg,硼酸 6.2 mg,硫酸锰 22.3 mg,硫酸锌 8.6 mg,钼酸钠 0.25 mg,硫酸铜 0.025 mg,氯化钴 0.025 mg,定容至 1 000 mL;Holand 营养液,二水硝酸钙 0.95 g,硝酸钾 0.51 g,硝酸铵 0.08 g,磷酸二氢钾 0.136 g,硫酸锰 0.49 g,上述铁盐溶液 2.5 mL,上述微量元素液 5 mL,定容至 1 000 mL。

1.2 实验方法

1.2.1 核桃青皮发酵产物

将前期筛选出的菌株 X1、X2、M2、M7 分别置于碱木质素培养基和 LB 培养基中,在 25 ℃、120 r/min 培养箱中培养 1 d,成为菌剂。取粉碎至半固体状态的核桃青 100 g,分别皮置于 12 个 250 mL 锥形瓶中,高温灭菌后,将菌液(OD = 1)按照 5%的比例分别添加菌剂 X1、X2、M2、M7 于对应的锥形瓶中,在 25 ℃、120 r/min 培养箱中发酵 21 d,得到核桃青皮发酵产物(W)。

1.2.2 核桃青皮发酵产物性质及功能测定

含水率:称取鲜样 10 g,105 ℃烘干至恒重后测定干重,计算含水率。

pH:核桃青皮发酵产物风干后研磨并过 1 mm 筛,按照 1: 10(m/V)的比例加入去离子水混合,常温下静置 30 min,用 pH 计测定。

堆肥产物营养物质(N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O)参照有机肥料标准(NY/T 525—2021)<sup>[28]</sup>测定。

种子发芽指数和种子发芽率<sup>[28]</sup>:称取试样(鲜样)10 g,置于 250 mL 锥形瓶中,按照含水率折算后的固液比 1: 10(m/V)加入相应质量的水,在 25 ℃的恒温振荡器中浸提 1 h,取下静置 1 h 后,进行过滤收集浸提液,浸提液当天使用。在培养皿上放置 1 张定性滤纸,放入 50 粒大小一致、颗粒饱满的青菜种子,加入上述浸提液 10 mL,盖上培养皿盖,在 25 ℃培养箱中避光培养 48 h,统

计发芽种子的粒数,并用游标卡尺逐一测量主根长。通过公式(1)计算种子发芽指数(GI),通过公式(2)计算种子发芽率(GR)。

$$GI = \frac{A_1A_2}{B_1B_2} \times 100\%$$

$$GR = \frac{A}{50} \times 100\%$$

式中:A 为核桃青皮发酵产物中浸提液培养下的种子发芽粒数;A<sub>1</sub> 为核桃青皮发酵产物中浸提液培养下的种子中发芽粒数百分比(%);A<sub>2</sub> 为核桃青皮发酵产物中浸提液培养的种子的平均根长(mm);B<sub>1</sub> 为水培种子中发芽粒数百分比(%);B<sub>2</sub> 为水培种子的平均根长(mm)。

1.2.3 核桃青皮土壤改良剂的制备

有机肥(F):将核桃青皮冲洗,105 ℃烘干后粉碎,过 1 mm 筛,备用。核桃青皮置于马弗炉内,700 ℃条件下缺氧炭化 2 h,研磨过 1 mm 筛后制备得到生物炭<sup>[29]</sup>。将核桃青皮发酵产物与生物炭分别按照 0.8: 0.2、0.6: 0.4、0.4: 0.6、0.2: 0.8的比例混合均匀,制备有机肥(F)。以有机肥料标准(NY/T 525—2021)中对 pH、含水率要求作为考察指标,优选最佳核桃青皮发酵产物与生物炭配比。

固定化菌剂(XF):将 SRB15-3-2 接种于有机肥(F)共同发酵 7 d,得到固定化菌剂。以 1%的接种量分别向 Cu 和 Cd 污染的土壤中添加固定化菌剂。

1.2.4 盆栽实验

土壤风干、研磨过 2 mm 筛,按 1: 3 比例混合沙土作为盆栽供试土壤。分别添加有机肥(F)和固定化菌剂(XF),同时以不添加物料作为对照组(CK),探究 F 和 XF 对土壤肥力提升、重金属钝化及植物生长的影响,具体见表 1。

表 1 盆栽土壤处理方式及修复方法

Tab.1 Potted soil treatment methods and remediation methods

| 实验组别    | 土壤处理方式         | 改良剂类型              |
|---------|----------------|--------------------|
| CK      | 不处理            | 无                  |
| 有机肥(F)  | 不处理            | 有机肥 F              |
| Cu CK 组 | 含 Cu 100 mg/kg | 无                  |
| Cu XF 组 | 含 Cu 100 mg/kg | 有机肥 F + 15-3-2 菌液  |
| Cd CK 组 | 含 Cd 1 mg/kg   | 无                  |
| Cd XF 组 | 含 Cd 1 mg/kg   | 有机肥 F + 15-3-2 菌液。 |

选用籽粒饱满、大小均匀的青菜(四月慢)种子,经5%过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )溶液消毒5 min后,用去离子水冲洗3~5次,用吸水纸吸干种子表面水分,置于育苗盘中育苗,待长出3~4片叶子后,挑选长势一致的幼苗移植至盆中。幼苗移栽后保持土壤含水量为田间最大持水量的60%,并定期施用 Holand 营养液。生长45 d后收获青菜植株,测量其株高,并分别记录地上和地下的鲜重和干重<sup>[30]</sup>。

1.2.5 重金属分析方法

将待测样品烘干,磨碎过1 mm筛,称0.5 g加入适量 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ ,采用微波消解仪消解,通风橱赶酸后稀释,以空白消解液为对照,ICP-OES

测定重金属含量<sup>[26]</sup>。采用 Tessier 连续提取法分析土壤样品中 Cu 和 Cd 的赋存形态。

2 结果与分析

2.1 发酵过程中核桃青皮性质的变化

2.1.1 pH 和含水率

pH 和含水率是影响发酵效果的重要参数。图1(a)是接种不同菌株后核桃青皮发酵21 d的pH变化情况,发酵产物pH呈弱酸性,范围为4.23~4.86。主要原因在于微生物通过矿化或腐解作用将核桃青皮中的有机物转化为有机酸、腐殖质类物质<sup>[31]</sup>。

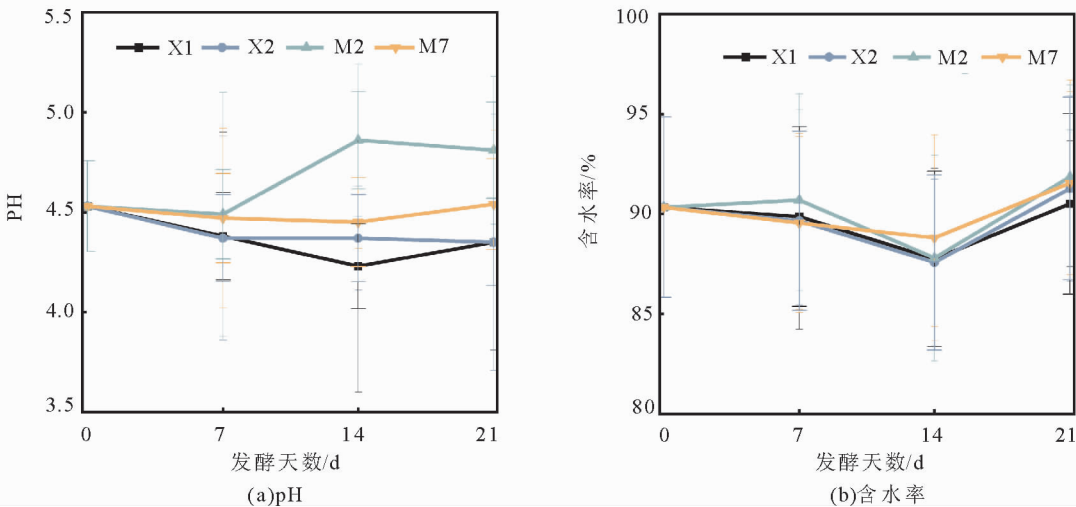


图1 发酵过程中 pH 和含水率的变化

Fig.1 Changes in pH and moisture content during fermentation

核桃青皮发酵产物的含水率变化情况如图1(b)所示,发酵过程中含水率维持在85%以上,且随着发酵过程进行,产物含水率变化不显著。本研究在室内锥形瓶中进行堆肥,微生物在分解核桃青皮有机组分过程中会产生水等产物,而锥形瓶通风效果差,水分无法扩散,这与常规堆体发酵过程中含水率下降趋势不同<sup>[32-34]</sup>。

2.1.2 营养元素含量

氮、磷、钾和有机质是维持微生物生存的基本物质条件。如图2(a)所示,发酵后的核桃青皮中的总氮含量均增加,产生此现象的原因可能为接种菌剂后促进了核桃青皮发酵过程中的氨化和硝化反应<sup>[35]</sup>。此外,与CK组相比,M7发酵前后总氮含量没有显著性差异,且总钾+总氮+总磷含量大于4%,符合有机肥料标准(NY/T 525—2021)要求。如图2(b)所示,添加菌剂后,由于微

生物分解蛋白质、糖类等营养物质,使得发酵产物中有机质含量均出现下降<sup>[36]</sup>。与CK组相比,接种M7和X2的核桃青皮发酵产物无显著性差异,仍保持了较高的有机质含量,分别为56.09%和61.37%。综上可知,经M7发酵后的核桃青皮更适合开展后续的研究。

2.1.3 腐熟度

发芽率及发芽指数(GI)是判断堆肥腐熟度的重要指标<sup>[37]</sup>。相关研究表明,GI达50%以上时,可认为该堆肥产物对种子无害;GI大于70%时,将满足有机肥标准对肥料腐熟度的要求<sup>[38]</sup>。随着发酵过程的进行,种子发芽指数和发芽率均显著提高(见图3)。这主要是由于发酵初期堆肥样品中含有高浓度的酚酸等生长抑制物质<sup>[39]</sup>,这些物质在发酵过程中会逐渐被微生物转化或降解<sup>[40]</sup>。当发酵到第21 d时,接种菌剂M7的核桃

青皮发酵效果最好,GI 值最高,相比于 CK 组,接种 M7 菌剂使发酵产物 GI 提高了 15%。

综合上述,M7 菌株在营养元素提升和核桃青

皮腐熟过程中均具有较好的效果,因此,选取木质纤维素及胡桃醌多功能降解菌 M7 作为核桃青皮发酵菌株。

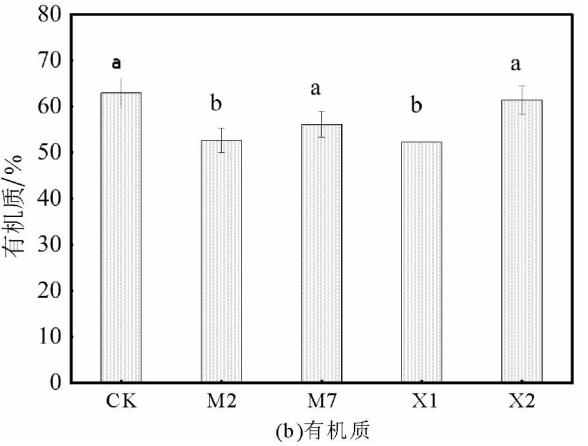
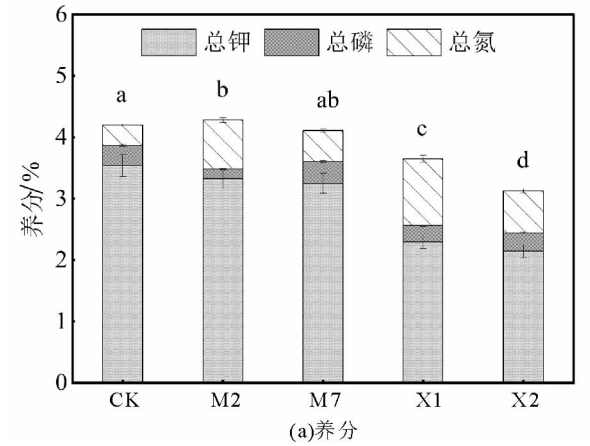


图 2 发酵过程中总养分和有机质的变化

Fig. 2 Changes in total nutrients and organic matter during fermentation

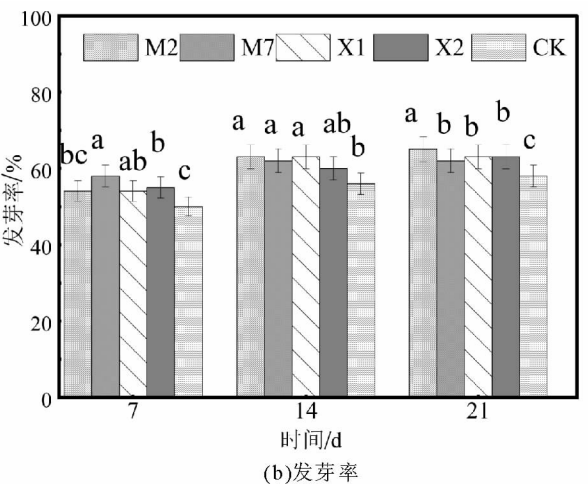
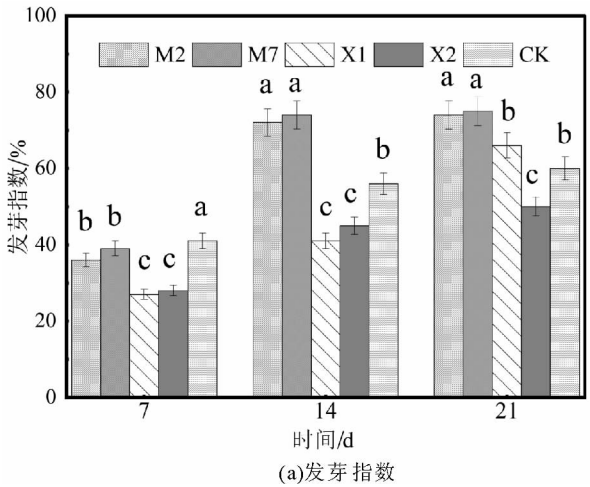


图 3 种子发芽指数和种子发芽率

Fig. 3 Seed germination index and seed germination rate

2.2 核桃青皮发酵产物与生物炭配施

上述发酵实验结果表明,核桃青皮发酵产物(W)的 pH 低、含水率高,不符合土壤有机肥的施用标准。生物炭(B)是一种在缺氧环境下由生物质热化学转化而来的碱性固体材料,具有丰富的微孔结构和保水性,与核桃青皮发酵产物配施能够改良其特性<sup>[41-42]</sup>。如表 2 所示,当生物炭配施比例从 20% 提升至 80% 时,核桃青皮发酵产物的 pH 从 5.46 增加至 9.28,含水率从 70.41% 降低至 16.41%。其中,在生物炭配施比例为 60% 时,制备的有机肥(F)满足土壤有机肥施用标准要求(pH 为 5.5~8.5,含水率≤30%)。

表 2 发酵产物和生物炭的配比

Tab. 2 Proportion of fermentation products and biochar

| W:B     | pH   | 含水率/% |
|---------|------|-------|
| 0.8:0.2 | 5.46 | 70.41 |
| 0.6:0.4 | 7.15 | 52.19 |
| 0.4:0.6 | 8.41 | 29.92 |
| 0.2:0.8 | 9.28 | 16.41 |

2.3 固定化菌剂对青菜生长的影响

硫酸盐还原菌是一类具有还原特性的厌氧微生物,将 SRB15-3-2 接种于有机肥(F)共同发酵 7 d,得到固定化菌剂(XF)。株高和生物量是反应植物对环境耐受性的重要指标<sup>[43]</sup>。固定化菌剂对植物生长的影响如图 4 所示,相比于对照处

理(CK),施加有机肥(F)提高了青菜的株高及地上部分生物量,分别增加了0.18%和6.74%。研究表明,有机肥能够改善土壤理化性状,加强土壤有益微生物的活动,促进有机物分解转化,产生多种营养物质和刺激性物质,这又反过来刺激微生物的生长发育,促进作物生长<sup>[44-46]</sup>。因此,有机肥为青菜生长及生物量累积提供了必要的营养源。

重金属在进入作物体内后,会产生氧化应激反应,从而对作物生长产生抑制作用<sup>[47-48]</sup>。与CK组相比,Cu CK和Cd CK处理组中青菜的株高分别降低了13.24%和14.40%,鲜重分别降低

了31.22%和10.52%,地下干重分别降低了50.39%和37.64%,均表现为显著的抑制作用。相较之下,施加XF后,Cu XF和Cd XF处理组青菜的株高和生物量均有所提升,该结果表明固定化菌剂抑制了Cu和Cd对青菜的毒性作用,并对青菜生长产生显著的促进作用。Li等人研究发现,硫酸盐还原菌可以通过产生的硫化物形成沉淀使重金属 $\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{Cd}^{2+}$ 离子转化为高稳定性的硫化物<sup>[49]</sup>,从而降低了 $\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{Cd}^{2+}$ 对植物的抑制作用。表明接种SRB15-3-2后的有机肥对植物生长及缓解土壤重金属毒性具有良好的作用。

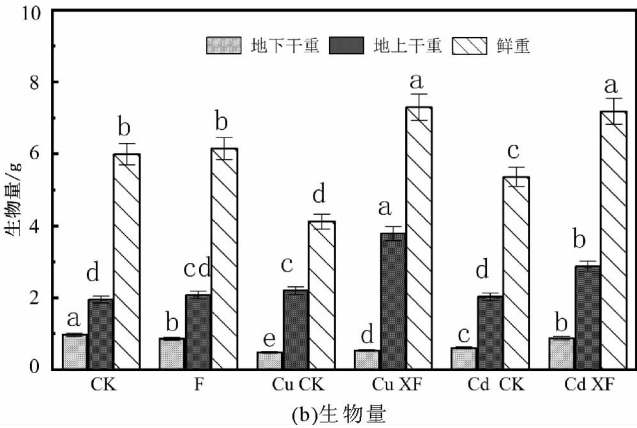
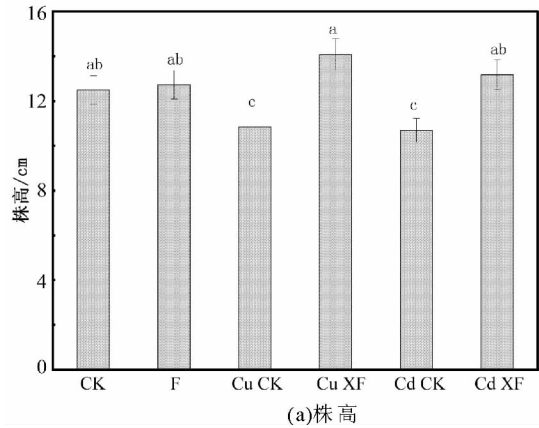


图 4 植物生理指标的变化  
Fig. 4 Changes in plant physiological indicators

2.4 固定化菌剂对土壤 Cu 和 Cd 形态的影响

各处理组土壤中 Cu 和 Cd 的形态分布结果如图 5 所示。添加固定化菌剂后,土壤中 Cu 和 Cd 的可交换态占比均出现下降,残渣态占比均出现提升,这与王晓宇等的研究结果一致<sup>[50]</sup>。相比于 CK 组,Cu XF 处理组可交换态 Cu 含量下降了 26.67%,残渣态 Cu 含量升高了 74.23%;Cd XF 处理组可交换态含量下降 0.68%,残渣态含量升高 21.74%。因此,有机肥的高比表面积和多孔特性可能在 Cd 的钝化过程中起着更重要的作用<sup>[51-52]</sup>。与常规研究不同,本研究发现固定化菌剂处理导致重金属碳酸盐结合态升高,这可能是由于生物炭材料的加入使得 pH 值升高,使土壤中部分无机碳向  $\text{CO}_3^{2-}$  转化<sup>[53-54]</sup>。此外,固定化菌剂处理对不同种类重金属的形态转化能力存在差异,相比于 Cd, Cu 可交换态及残渣态含量变化幅度更为显著。Cu XF 处理组中未检出可交换态含量,残渣态含量从 48.02% 升高至 83.67%。综上所述,添加固定化菌剂后促进了重金属向更

稳定的形态转化,从而降低了土壤 Cu 和 Cd 的可利用性。

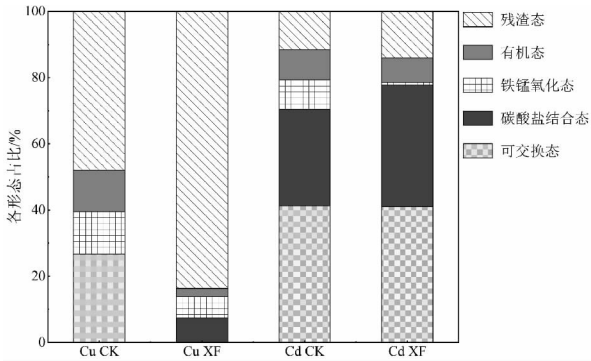


图 5 土壤重金属形态的变化  
Fig. 5 Changes of heavy metal forms in soil

2.5 固定化菌剂对青菜富集 Cu 和 Cd 能力的影响

2.5.1 固定化菌剂对青菜 Cu 和 Cd 含量的影响

施加固定化菌剂后,青菜地上和地下部分重金属含量变化结果如图 6 所示。Cu XF 和 Cd XF 处理组青菜的地上与地下部分的重金属含量均出现降低。相比于 CK 处理组,施加固定化菌剂

(XF)后,青菜地下部的 Cu 和 Cd 含量分别降低了 92.9% 和 72.8%,表明固定化菌剂对重金属有显著的固定作用;地上部的 Cu 含量降低了 34.0%,而 Cd 含量降低了 3.3%,表明固定化菌剂对 Cu 的固定作用比 Cd 显著。产生此现象的主要原因有 2 个:①固定化菌剂处理改变了土壤中重金属的赋存形态,促使 Cu 和 Cd 从可交换态向碳酸盐结合态和残渣态转化(见图 5),降低了 Cu 和 Cd 的生物可利用性;②微生物群落在植物富集重金属过程中也扮演着重要作用,发酵过程接种的微白黄链霉菌株(M7)及核桃青皮本身赋存的肠杆菌株(M2)均属于典型的根际促生细菌<sup>[55]</sup>,它们能够通过分泌有机酸、氨基酸和固醇等小分子有机物,缓解重金属对植物的毒性胁迫,降低植物对重金属的吸收、富集和迁移能力,协助植物在劣势环境中生长,最终提高植物修复效率<sup>[56]</sup>。

2.5.2 固定化菌剂对青菜中转运系数的影响

生物富集系数(bioaccumulation facto, BCF)是植物体内重金属含量和土壤重金属含量的比值<sup>[57]</sup>,代表植物对土壤中重金属 Cu 和 Cd 的富集程度<sup>[58]</sup>。固定化菌剂处理后的青菜地上可食用部分 Cu 和 Cd 富集系数如表 3 所示,添加固定

化菌剂后,生物密集系数均低于 CK 组,这表明 SRB15-3-2 抑制了青菜对重金属的富集。青菜对土壤中不同重金属的富集能力也存在差异,青菜对 Cu 和 Cd 的富集系数分别为 0.49 和 2.62,表明相比于 Cu,对 Cd 的富集能力更强。转运系数(translocation factor, TF)<sup>[59]</sup>是植物地上部分和地下部分重金属含量的比值,反映了植物对重金属的移位能力<sup>[60]</sup>。实验结果表明(见表 3),添加固定化菌剂后,青菜对 Cu 和 Cd 的转运系数均低于 CK 组,进一步证明本研究的固定化菌剂抑制了重金属从地下部向地上部的转运。

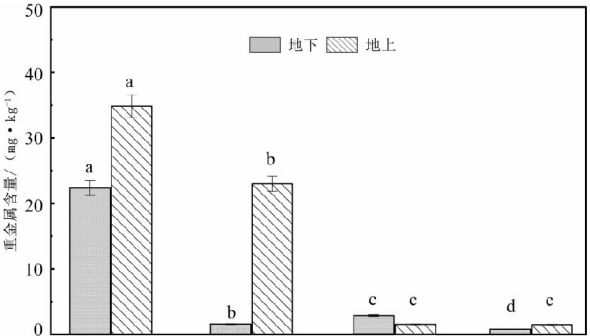


图 6 固定化菌剂对青菜重金属含量的影响

Fig. 6 Effect of restorative on heavy metal content in Chinese cabbage

表 3 青菜对重金属的富集系数和转运系数

Tab. 3 Bioaccumulation factors and translocation factor of Cu and Cd in Chinese cabbage

| 组别          | Cu CK | Cu XF | Cd CK | Cd XF |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 地上富集系数(BCF) | 0.49  | 0.31  | 2.62  | 2.58  |
| 转运系数(TF)    | 1.56  | 1.45  | 1.72  | 1.71  |

3 结论

1)接种 4 种菌剂后的核桃青皮发酵产物中,氮、磷、钾的总含量均大于 4%,满足有机肥料标准(NY/T 525-2021)中对营养元素含量的要求。4 种菌剂中 M7 对总养分和有机质含量的综合提升效果最佳,发酵效果最好,GI 值最高。因此,优选出 M7 作为核桃青皮发酵菌株,并与生物炭按照 0.4: 0.6 的比例配施制备成有机肥(F)。

2)当土壤中 Cu 和 Cd 含量分别达到 100 mg/kg和 1 mg/kg 时,青菜生长受到重金属胁迫的抑制。固定化菌剂施加促进了青菜生长及生物量

累积,并且缓解了 Cu 和 Cd 对青菜的毒性作用。与 CK 组相比,Cu XF 和 Cd XF 处理组中青菜的株高分别增加了 12.62% 和 5.42%,地上部分干重分别增加了 95.05% 和 47.93%。

3)施加固定化菌剂后,土壤中 Cu 和 Cd 的可交换态占比均出现下降,残渣态占比出现提升。固定化菌剂降低了土壤中 Cu 和 Cd 的生物活性,缓解了重金属对植物的毒性作用。同时固定化菌剂在重金属的稳定化过程中起到了核心作用。相比于 CK 组,施加固定化菌剂后青菜根部的 Cu 和 Cd 含量分别降低了 92.92% 和 72.83%,叶部的 Cu 和 Cd 含量分别降低了 34.00% 和 3.30%。

综上,固定化菌剂促进了青菜生长,提高了生物量。有效降低了土壤重金属的生态风险,并抑

制了青菜对重金属的富集作用。本研究结果为重金属污染土壤修复和蔬菜作物安全生产提供了理论支撑及科学依据。

参考文献

[1] 张有林,原双进,王小纪,等. 基于中国核桃发展战略的核桃加工业的分析与思考[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 1-8.  
ZHANG Y L, YUAN S J, WANG X J, et al. Analysis and reflection on development strategy of walnut processing industry in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 1-8.

[2] 朱佳敏,杨霞,赵玉雪. 核桃青皮生物有机肥的制备及其在百香果上的应用初探[J]. 中国果树, 2023(4): 63-67.  
ZHU J M, YANG X, ZHAO Y X. Preparation of bio-organic fertilizer from walnut peel and its application on passion fruit[J]. China Fruits, 2023(4): 63-67.

[3] MERILA P, MALMIVAARA-LAMSA M, SPETZ P, et al. Soil organic matter quality as a link between microbial community structure and vegetation composition along a successional gradient in a boreal forest[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(2): 259-267.

[4] 马红叶,潘学军,张文娥,等. 不同条件下核桃青皮腐解物对土壤肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 88-98.  
MA H Y, PAN X J, ZHANG W E, et al. Effects of walnut (*Juglans sigillata*) husk decomposition on soil fertility under various conditions[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016, 44(12): 88-98.

[5] 王婷. 核桃青皮化感活性及作用机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.

[6] 赵国建,王向东,王焕. 提取方法对核桃青皮多酚提取效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增1): 351-355.  
ZHAO G J, WANG X D, WANG H. Effects of different methods on polyphenols extraction from walnut green husk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(S1): 351-355.

[7] 朱永官,李刚,张甘霖,等. 土壤安全:从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报, 2015, 70(12): 1859-1869.  
ZHU Y G, LI G, ZHANG G L, et al. Soil security: From earth's critical zone to ecosystem services[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(12): 1859-1869.

[8] 王泽强,张冬有,徐夕博,等. 基于遥感时-空-谱特征

及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测[J/OL]. 环境科学, 1-17[2023-08-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202301103>.

WANG Z Q, ZHANG D Y, XU X B, et al. Distribution prediction of soil heavy metals based on remote sensing temporal-spatial-spectra features and random forest mode environmental science[J/OL]. Environmental Science, 1-17[2023-08-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202301103>.

[9] PALANSOORIYA K N, SHAHEEN S M, CHEN S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. Environment International, 2020, 134:105046.

[10] PIERART A, SHAHID M, SEJALON-DELMAS N, et al. Antimony bioavailability: Knowledge and research perspectives for sustainable agricultures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 289: 219-234.

[11] LIU L W, LI W, SONG W P, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 206-219.

[12] 中华人民共和国环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. (2014-04-17)[2023-05-17]. [https://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content\\_2661765](https://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm).

[13] MANSOUR S A, SIDKY M M. Ecotoxicological Studies. 3. heavy metals contaminating water and fish from Fayoum Governorate, Egypt[J]. Food Chemistry, 2002, 78(1): 15-22.

[14] RAFATI RAHIMZADEH M, RAFATI RAHIMZADEH M, KAZEMI S, et al. Cadmium toxicity and treatment: An update[J]. Caspian Journal of Internal Medicine, 2017, 8(3): 135-145.

[15] 尚相春,金倩,杨可明,等. 基于污染种类判别特征的作物 Pb、Cu 污染种类判别[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 46-54.  
SHANG X C, JIN Q, YANG K M, et al. Discrimination of Pb and Cu pollution types in crops based on the discrimination feature of lead-copper pollution type[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1): 46-54.

[16] NEGAHDARI S, SABAGHAMN M, PIRHADI M, et al. Potential harmful effects of heavy metals as a toxic and carcinogenic agent in marine food: An overview[J]. Egyptian Journal of Veterinary Science, 2021, 52(3): 379-386.

[17] LI P X, ZHONG L, GUO R. Potential mechanism and treatment of heavy metal cadmium-induced cardiovas-

- cular disease [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2021, 51 (9): 1241-1253.
- [18] JAISHANKAR M, TSETEN T, ANBALAGAN N, et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals[J]. *Interdisciplinary toxicology*, 2014, 7 (2): 60-72.
- [19] JEZEQUEL K, LEBEAU T. Soil bioaugmentation by free and immobilized bacteria to reduce potentially phytoavailable cadmium[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(4): 690-698.
- [20] 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 等. 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发[J]. *环境科学*, 2020, 41 (10): 4711-4718.
- YANG Y H, XUE L X, SUN B, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* biofertilizer mitigating soil ammonia volatilization[J]. *Environmental Science*, 2020, 41 (10): 4711-4718.
- [21] 张昌伟, 彭胜, 张琳杰, 等. 杜仲叶渣固态发酵制备有机肥的工艺研究[J]. *林产化学与工业*, 2014, 34(6): 141-145.
- ZHANG C W, PENG S, ZHANG L J, et al. Process of producing organic fertilizer by solid-state fermentation of leaves residual of eucommiaulmoidesoliv[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2014, 34 (6): 141-145.
- [22] GIOVANELLA P, CABRAL L, COSTA A P, et al. Metal resistance mechanisms in Gram-negative bacteria and their potential to remove Hg in the presence of other metals [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 140: 162-169.
- [23] 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 等. 农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展[J]. *环境科学*, 2023, 44(4): 2384-2394.
- HU F Y, AN J, WANG B Y, et al. Research progress on the remediation technology of herbicide contamination in agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2384-2394.
- [24] 朱煜. 硫酸盐还原菌对重金属污染土壤的处理研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(8): 952-955.
- ZHU Y. Treatment of heavy metal contaminated soil using sulfate-reducing bacteria[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(8): 952-955.
- [25] 朱晓丽, 张婵娟, 张星, 等. 生物炭固定化硫酸盐还原菌对镉污染土壤的钝化修复[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(5): 421-429.
- ZHU X L, ZHANG C J, ZHANG X, et al. Remediation of  $Cd^{2+}$  contaminated soil by biochar immobilized sulfate reducing bacteria[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(5): 421-429.
- [26] 聂麦茜. 环境监测与分析实践教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [27] 朱晓丽, 寇志健, 王军强, 等. 生物炭固定化硫酸盐还原菌对  $Cd^{2+}$  吸附及作用机制分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(7): 2682-2690.
- ZHU X L, KOU Z J, WANG J Q, et al. Adsorption of  $Cd^{2+}$  by sulfate reducing bacteria immobilized biochar [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(7): 2682-2690.
- [28] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T 525-2021[S/OL]. (2021-06-29)[2023-05-17]. [http://www.jgj.moa.gov.cn/nybz/202106/t20210629\\_6370533](http://www.jgj.moa.gov.cn/nybz/202106/t20210629_6370533).
- [29] 朱晓丽, 程燕萍, 申烨华, 等. 核桃青皮生物炭对重金属的吸附效应分析[J]. *环境科学*, 2023, 44 (10): 5599-5609.
- ZHU X L, CHENG Y P, SHEN Y H, et al. Adsorption performance of walnut green husk biochar for heavy metals [J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (10): 5599-5609.
- [30] YANG Y J, CHEN R J, FU G F, et al. Phosphate deprivation decreases cadmium (Cd) uptake but enhances sensitivity to Cd by increasing iron (Fe) uptake and inhibiting phytochelatin synthesis in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38(1): 28.
- [31] 陈胜男, 谷洁, 高华, 等. 微生物菌剂对小麦秸秆和尿素静态堆腐过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 198-201.
- CHEN S N, GU J, GAO H, et al. Effects of microbial inoculants on wheat straw and urea during composting at static state[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(3): 198-201.
- [32] 高剑平, 黄建峰, 张梁. 污泥与菌渣混合好氧快速堆肥协同发酵研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32 (9): 127-130.
- GAO J P, HUANG J F, ZHANG L. Cooperative fermentation for aerobic co-composting of edible fungi residue and sewage sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(9): 127-130.
- [33] 徐鹏翔, 王越, 杨军香, 等. 好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (11): 2403-2408.
- XU P X, WANG Y, YANG J X, et al. Advances in ventilation systems and parameter choices during aerobic composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2403-2408.
- [34] 栾润宇, 徐应明, 高珊, 等. 不同发酵方式对鸡粪

- 重金属及有机质影响[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3486-3494.
- LUAN R Y, XU Y M, GAO S, et al. Heavy metal and organic matters in the chicken manure under different types of composting[J]. China Environmental Science, 2020, 40(8): 3486-3494.
- [35] 席北斗, 赵越, 魏自民, 等. 三阶段温度控制堆肥接种法对有机氮变化规律的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 220-224.
- XI B D, ZHAO Y, WEI Z M, et al. Variations of organic nitrogen forms during composting process using three stages controlled by temperature[J]. Environmental Science, 2007, 28(1): 220-224.
- [36] WU D, WEI Z M, QU F T, et al. Effect of fenton pretreatment combined with bacteria inoculation on humic substances formation during lignocellulosic biomass composting derived from rice straw[J]. Biore-source Technology, 2020, 303: 122849.
- [37] 韩聪颖, 王星怡, 马永杰, 等. 气化滤饼对枸杞枝条堆肥进程、品质和碳氮损失的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(9): 1445-1455.
- HAN C Y, WANG X Y, MA Y J, et al. Effect of gasification filter cake on composting process, quality, and carbon and nitrogen loss of lyciumbarbarum branches[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(9): 1445-1455.
- [38] SAIDI N, KOUKI S, HIRI F, et al. Microbiological parameters and maturity degree during composting of *Posidonia oceanica* residues mixed with vegetable wastes in semi-arid pedo-climatic condition[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(10): 1452-1458.
- [39] 钱晓雍, 沈根祥, 黄丽华, 等. 畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 549-554.
- QIAN X Y, SHEN G Y, HUANG L H, et al. An index system for evaluating the maturity of animal manure composting[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(3): 549-554.
- [40] 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 等. 畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群演替及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 997-1004.
- CAI H B, FENG W W, DONG Y H, et al. Microbial community succession in industrial composting with livestock manure and peach branches and relations with environmental factors[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 997-1004.
- [41] SINGH P, RAWAT S, JAIN N, et al. A review on biochar composites for soil remediation applications: Comprehensive solution to contemporary challenges[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5): 110635.
- [42] QIAN Z Z, TANG L Z, ZHUANG S Y, et al. Effects of biochar amendments on soil water retention characteristics of red soil at south China[J]. Biochar, 2020, 2(4): 479-488.
- [43] 程海宽, 张彪, 景鑫鑫, 等. 玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1468-1473.
- CHENG H K, ZHANG B, JING X X, et al. Response of maize to lead stress and relevant chemical forms of lead[J]. Environmental Science, 2015, 36(4): 1468-1473.
- [44] 步磊, 史巍. 不同类型有机肥配施氮肥对优质小麦产量与品质的影响探究[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(14): 25-27.
- BU L, SHI W. Effects of different types of organic fertilizer combined with nitrogen fertilizer on yield and quality of high-quality wheat[J]. Journal of Smart Agriculture, 2022, 2(14): 25-27.
- [45] 王星琳. 化肥有机替代对小麦根际区系的影响[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [46] 杨利, 颜安, 宁松瑞, 等. 生物有机肥对盐胁迫小麦幼苗生长和土壤培肥的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2021, 44(4): 291-299.
- YANG L, YAN A, NING S R, et al. Effects of bio-organic fertilizer on wheat seedling growth and soil fertility improvement under salt stress[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2021, 44(4): 291-299.
- [47] LIN L, ZHOU W H, DAI H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235/236(2): 343-351.
- [48] WU Z C, WANG F H, LIU S, et al. Comparative responses to silicon and selenium in relation to cadmium uptake, compartmentation in roots, and xylem transport in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress[J]. Environmental & Experimental Botany, 2016, 131: 173-180.
- [49] LI X, LAN S M, ZHU Z P, et al. The bioenergetics mechanisms and applications of sulfate-reducing bacteria in remediation of pollutants in drainage: A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 158: 162-170.
- [50] 王晓宇, 韩辉. 重金属固定细菌调控土壤铁氧化物

- 阻控小麦 Cd 吸收效应[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5160-5167.
- WANG X Y, HAN H. Effects of heavy metal-immobilizing bacteria on reducing wheat uptake Cd by regulation soil iron oxides [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5160-5167.
- [51] ZHANG C, SHAN B Q, ZHU Y Y, et al. Remediation effectiveness of *Phyllostachys pubescens* biochar in reducing the bioavailability and bioaccumulation of metals in sediments [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 1768-1776.
- [52] 许妍哲, 方战强. 生物炭修复土壤重金属的研究进展[J]. 环境工程, 2015, 33(2): 156-159.
- XU Y Z, FANG Z Q. Advances on remediation of heavy metal in the soil by biochar[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(2): 156-159.
- [53] 李治梅. 不同功能化蒙脱土对镉污染土壤的钝化修复及稳定性研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2023.
- [54] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3562-3574.
- YANG L, LI B, WANG C Q, et al. Effect of modified biochars on soil cadmium stabilization in paddy soil suffered from original or exogenous contamination[J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3562-3574.
- [55] 韩烁, 夏冬亮, 李潞滨, 等. 毛竹根部解磷细菌的筛选及多样性研究[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(2): 26-31.
- HAN S, XIA D L, LI L B, et al. Diversity of the phosphate solubilizing bacteria isolated from the root of *Phyllostachys pubescens*[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2010, 33(2): 26-31.
- [56] 马莹, 王玥, 石孝均, 等. 植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4911-4922.
- MA Y, WANG Y, SHI X J, et al. Mechanism and application of plant growth-promoting bacteria in heavy metal bioremediation [J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4911-4922.
- [57] 刘文英, 吴刚, 胡红青. EDDS 对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响 [J/OL]. 环境科学, 1-13 [2023-08-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202304007>.
- LIU W Y, WU G, HU H Q. Effect of EDDS application on soil Cu/Cd availability and uptake/transport by castor[J/OL]. Environmental Science, 1-13 [2023-08-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202304007>.
- [58] 冉文静, 傅大放. 黑麦草修复模拟重金属污染土壤的化学强化及其潜在风险[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(4): 793-798.
- RAN W J, FU D F. Effects and risk of chemical enhancement measures to phytoremediation using lolium L. for artificially polluted soil with heavy metals[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(4): 793-798.
- [59] 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 等. 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5629-5639.
- CHEN J Y, LIU G B, CUI J L, et al. Mobilization of heavy metals in a soil-plant system and risk assessment in the Dabaoshan mine area, Guangdong Province, China[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5629-5639.
- [60] 卞建林, 郭俊婷, 王学东, 等. 两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 970-978.
- BIAN J L, GUO J M, WANG X D, et al. Tolerance mechanism and cadmium enrichment abilities in two brassica napus. cultivars[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 970-978.

(编辑 李波)

作者简介:



朱晓丽,女,博士,教授,博士生导师,第十四届全国人大代表,陕西省三八红旗手,陕西省科技创新创业人才。现任西北大学土壤污染控制与修复工程技术中心主任,陕西省生态文明促进会副会长,陕西省人大常委会资源与环境保护咨询专家,陕西省耕地及建设用地污染防治体系专家,陕西省秦岭保护专家委员会专家。从事重金属污染土壤治理与修复、煤矸石/粉煤灰等大宗固废处理及资源化利用等方面的研究与教学工作。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划项目课题和专题、国家科技部惠民项目专题、陕西省重点产业创新链、陕西省“13115”重大科技创新专项、陕西省农业创新驱动项目、榆林市产学研计划项目、陕西省教育厅科技项目、西安市科技计划项目等多项科研项目;参与陕西省重点实验室、国家发改委高技术产业化示范工程等多项重大科研项目。曾在意大利萨兰托大学、美国堪萨斯州立大学作访问学者。在行业领域 Top 期刊 *Geoderma*、*Science of the Total Environment*、《环境科学学报》等国内外刊物发表学术论文 50 余篇,授权国家发明专利 14 项。响应国家号召,进行专利成果的落地转化,创新创业,成立西安全博瑞生态科技有限公司,开发了系列土壤污染绿色修复和改良技术,并在陕北神木县、宝鸡凤县、汉中市勉县、渭南市潼关县等完成大面积应用示范,实现了耕地等的安全利用,提高了农作物产量和安全性,获得了良好的社会和环境效益,在环保、乡村振兴和创新创业等领域做出了突出贡献。2022 年获得陕西省科技创新创业人才称号、陕西省“三八红旗手”称号。获得多项省部级成果奖,以第一完成人获得 2021 年陕西省农业技术推广成果二等奖 1 项,2020 年获得陕西省科技工作者创新创业大赛一等奖 1 项,2019 年获得中国创新创业大赛陕西赛区三等奖 1 项,陕西省环境保护科学技术一等奖 1 项,2018 年获得陕西省科技工作者创新创业大赛三等奖 1 项,2011 年参与获得陕西省科技进步一等奖 1 项。