

## 解有机磷细菌对滇重楼根茎、须根及根际土壤重金属元素的影响

李卓蔚,袁林,叶明燕,兰国新\*,周浓\*

重庆三峡学院生物与食品工程学院,重庆 404120

**摘要:**探究接种不同解有机磷细菌后滇重楼根茎、须根及根际土壤中重金属残留量的变化规律,为滇重楼人工种植过程中重金属污染修复提供参考。通过室内盆栽接种试验,研究了在灭菌土壤接种不同解有机磷细菌对滇重楼根茎、须根及根际土壤中汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)、砷(As)5种重金属残留量的影响。与对照组(CK组)相比,接种不同解有机磷细菌对滇重楼根茎及须根中5种重金属残留量影响各不相同,对重金属Pb的修复效果最明显,其中三种菌(*Bacillus mycoides*, *B. wiedmannii*, *B. proteolyticus*)混合处理组(S7组)对滇重楼重金属的修复效果最佳。此外,单项污染指数和内梅罗污染指数表明,除*B. mycoides*处理组的土壤存在污染风险以外,其余处理组均达到清洁水平。同时,5种重金属元素在滇重楼根茎和须根中的富集能力各不相同,富集系数最大为Cd,最小为Cr,S7组滇重楼根茎中的富集能力相对较小。相关性分析表明,滇重楼根茎和须根中的Hg和Pb元素呈显著正相关( $P < 0.05$ ),相关系数分别为0.761、0.811。综上,接种解有机磷细菌能够有效降低滇重楼根茎及须根中Hg、Pb和Cr元素的含量,其中S7组接种处理的效果最佳。

**关键词:**滇重楼;解有机磷细菌;重金属;富集系数

中图分类号:R282.2

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2022)11-1930-09

DOI:10.16333/j.1001-6880.2022.11.014

## Effects of organophosphate-degradation bacteria on heavy metal elements in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* rhizomes, fibrous roots and rhizosphere soils

LI Zhuo-wei, YUAN Lin, YE Ming-yan, LAN Guo-xin\*, ZHOU Nong\*

College of Food and Biology Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120, China

**Abstract:** To explore the change rule of heavy metal residues in rhizomes, fibrous roots and rhizosphere soils of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* inoculated with different organophosphate-degradation bacteria (OPDB), which provides a reference for heavy metal pollution remediation during artificial planting of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. Through indoor pot plant inoculation experiments, the effects of residues of inoculating different OPDB on mercury (Hg), cadmium (Cd), lead (Pb), chromium (Cr), and arsenic (As) heavy metals in rhizomes, fibrous roots and rhizosphere soils of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* were studied. Compared with the control group, inoculation with different OPDB had different differences in the residues of five heavy metals in rhizomes and fibrous roots of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, and the restoration effect on the heavy metal Pb was the most obvious. The S7 group (*Bacillus mycoides*, *B. wiedmannii*, *B. proteolyticus*) has the most obvious repair effect on heavy metals. In addition, the Single pollution index and the Nemerow pollution index showed that, except for the soil in the *B. mycoides* treatment group, which had a risk of contamination, the rest of the treatment groups reached a clean level. At the same time, the enrichment abilities of the five heavy metal elements in rhizomes and fibrous roots of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* were different, with the maximum enrichment coefficient was Cd, and the minimum was Cr. The enrichment capacity in the rhizomes of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* in S7 group was relatively small. The correlation analysis showed that Hg and Pb elements in rhizomes and fibrous roots of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* were significantly

收稿日期:2022-07-14 接受日期:2022-09-21

基金项目:重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0267);重庆三峡学院研究生科研创新项目(YJSKY22028)

\* 通信作者 Tel:86-018223968684; E-mail:feman7122@163.com, erhaizn@126.com

positively correlated ( $P < 0.05$ ), and the correlation coefficients were 0.761 and 0.811, respectively. It can be seen that the content of Hg, Pb and Cr in the rhizomes and fibrous roots of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* can be effectively reduced by inoculation with OPDB, and the S7 group has the best effect.

**Key words:** *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; organophosphate-degradation bacteria; heavy metal; enrichment coefficients

滇重楼 (*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*) 为百合科重楼属多年生草本药用植物, 根茎作为其主要药用部位, 具有解毒止血、抗菌消炎、免疫调节、抗肿瘤等功效<sup>[1]</sup>。近些年来, 为了缓解市场供应需求, 滇重楼的人工种植面积被不断扩增, 然而, 由于种植技术的不成熟及化肥的大量施用, 严重破坏了滇重楼的生长环境, 导致种植的滇重楼品质不佳, 产量也逐渐降低。因此, 找到合理的施肥手段来增加滇重楼的可利用价值, 是滇重楼规范种植体系的热点领域<sup>[2,3]</sup>。

近些年来, 随着中药产业的迅速发展, 因环境污染引发的中药材重金属含量超标等问题也获得了广泛的关注。重金属元素具有高隐蔽、难降解、易富集等特点, 容易富集在人体内且不易排出体外, 当人体内重金属含量达到一定量时, 就会产生脏器功能性病变, 从而诱发一系列疾病<sup>[4]</sup>。当体内汞元素含量超标时, 会损伤脑组织, 引起神经系统失常; 过量镉元素和铬元素会诱发肾脏等器官致癌; 过量铅元素会影响人的消化和记忆功能<sup>[5]</sup>; 过量砷元素会对人体的肌肉、血液、免疫系统等多种组织器官产生不利影响<sup>[6]</sup>。解有机磷细菌作为一种新型的微生物肥料, 能矿化有机磷化合物, 使土壤中难溶性的有机磷化合物转化为能被植物直接吸收利用的磷元素<sup>[7]</sup>, 增加土壤有效磷含量, 从而缓解植物生长缺磷的现象。此外, 有大量研究表明, 解有机磷菌还能钝化铅、镉、铜等重金属, 即将土壤有机磷中释放出的磷酸根与重金属结合形成磷酸盐沉淀, 降低重金属在土壤环境中的移动性和生物可利用性, 起到固定或钝化的作用, 从而减轻重金属造成的危害<sup>[8]</sup>。解有机磷菌主要包含细菌、真菌和放线菌, 其中细菌的种类和数量最多, 研究发现芽孢杆菌属、假单胞菌属、节杆菌属中的一些菌株的溶磷能力较强<sup>[9,10]</sup>, 在农业上常被作为磷素菌肥使用。据报道, 解有机磷细菌对玉米<sup>[11]</sup>、花生<sup>[12]</sup>等经济作物的有效成分和生长发育影响具有确切效果并推广应用, 不同种类或不同产地滇重楼药材及土壤重金属含量等方面的研究结论已十分成熟<sup>[4,13]</sup>, Yang 等<sup>[2]</sup>也探究了丛枝菌根真菌对滇重楼根茎及土壤重金属元素的影响, 但接种解有机磷细菌对滇重楼药材及土壤重金属含

量的影响还未见报道。

因此本研究采取单因素室内盆栽的方式, 将筛选出的3株解有机磷细菌优势种为菌种<sup>[14]</sup>, 分别接种和组合接种于栽培基质中, 以滇重楼根茎、须根和根际土壤为研究对象, 采用电感耦合等离子体质谱法 (inductively coupled plasma mass, ICP-MS) 对汞 (Hg)、镉 (Cd)、铅 (Pb)、铬 (Cr)、砷 (As) 5种重金属元素进行检测, 探讨解有机磷细菌及其组合对滇重楼根茎、须根及根际土壤重金属元素含量的影响, 以为滇重楼人工规范化种植与发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试种苗为同一批长势良好, 且无病虫害的四年生滇重楼实生苗, 由云南省大理州永平县杉阳镇普棚村规范化种植基地 (25° 39' 13.56'' N, 99° 33' 58.38'' E) 提供, 将滇重楼实生苗根系附带土壤清理干净后, 采用单株低温干燥保存, 以保证种质资源的稳定性和均一性, 并经保山中医药高等专科学校杨发建副教授鉴定; 栽培基质为普通黄壤土、沙土和有机土按 2:1:1 的比例配制而成, 过 2 mm 筛, 采用高压蒸汽灭菌锅 121 °C 高温灭菌 30 min, 取出冷却密封放置待用; 供试菌株为课题组前期从滇重楼根际土壤中分离筛选出的3株溶磷效果最佳的解有机磷细菌, 分别为运动芽孢杆菌 (*Bacillus mycoides*)、维德曼芽孢杆菌 (*Bacillus wiedmannii*)、蛋白水解芽孢杆菌 (*Bacillus proteolyticus*), 活化后, 用移液枪取少量菌液接种于装有牛肉膏蛋白胨液培养基的三角瓶中培养, 培养菌悬液密度至  $1 \times 10^6$  CFU/mL, 每种解有机磷细菌菌悬液培养约 4 L。

### 1.2 仪器和试剂

SPX-80 型生化培养箱 (上海跃进医疗器械有限公司); 金牛 4010 型微波消解仪 (南京瑞尼克科技开发有限公司); EXPEC 7000 型电感耦合等离子体质谱仪 (杭州聚光科技股份有限公司)。Hg (GSB04-1729-2004, 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、Cd (GSB04-1721-2004, 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、Pb (GSB04-1742-2004, 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、Cr (GSB04-1723-2004, 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )、As (GSB04-1714-2004, 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ), 购自国家有色金属及电

子材料分析测试中心。实验试剂为优级纯,水为纯净水。所有玻璃器皿采用 15% 硝酸浸泡 24 h,蒸馏水冲洗干净后烘干备用。

### 1.3 试验设计

试验采用室内盆栽的方法,于 2020 年 12 月在贵州省安顺市安顺学院(26° 24'95. 21''N, 105°90' 75. 95''E)的试验种植基地进行种植。试验共分为 8 组,包括 7 个试验处理组(S1 ~ S7)和 1 个对照组(CK),实验对 3 株解有机磷细菌优势种采取单株接种、两两组合接种以及三种菌混合接种的方式分组培养,处理方式:处理组 S1 接种菌株 *B. mycoides*、处理组 S2 接种菌株 *B. wiedmannii*、处理组 S3 接种菌株 *B. proteolyticus*、处理组 S4 接种菌株 *B. mycoides* 和 *B. wiedmannii*、处理组 S5 接种菌株 *B. mycoides* 和 *B. proteolyticus*、处理组 S6 接种菌株 *B. wiedmannii* 和 *B. proteolyticus*、处理组 S7 接种菌株 *B. mycoides*、*B. wiedmannii* 和 *B. proteolyticus*,CK 组不接种处理。每组重复 10 次,每盆种植 5 株生长状况良好的滇重楼实生苗,菌悬液接种量为 150 mL/盆,栽培期间按照滇重楼植株室内栽培标准进行管理。一年后采收滇重楼药材,将根茎和须根于 45 °C 烘箱中烘干,粉碎后过 80 目筛,密封干燥保存;通过抖根法取其根际土壤,室温自然风干,密封干燥保存备用。

### 1.4 测定指标及方法

#### 1.4.1 滇重楼根茎及须根消解

精密称取 0.2 g 滇重楼药材样品于消解罐中,平行 3 次,加入浓 HNO<sub>3</sub> 8 mL 密封,浸泡过夜,采用同法不加样品制备空白溶液。次日采用 Li 等<sup>[4]</sup>方法进行微波消解。

#### 1.4.2 滇重楼根际土壤消解

精密称取 0.2 g 根际土壤样品于消解罐中,平行 3 次,加入浓 HNO<sub>3</sub> 7 mL、HF 2 mL 和 HClO<sub>4</sub> 0.6 mL 密封,浸泡过夜,采用同法不加样品制备空白溶液。次日采用 Lan 等<sup>[15]</sup>方法进行微波消解。

#### 1.4.3 标准工作液的制备

精密称取适量混合对照品储备液,采用 2% 的稀硝酸逐级稀释,具体配置浓度参照 Huang 等<sup>[16]</sup>方法进行。

#### 1.4.4 元素含量测定

参照 Li 等<sup>[4]</sup>方法进行。

#### 1.4.5 药材重金属限量标准

药材限量标准参照《中国药典》(2020 年版)<sup>[17]</sup>和《食品安全国家标准食品中污染物限量》

(GB2762-2017) 规定<sup>[18]</sup>: Hg ≤ 0.2 mg/kg, Cd ≤ 1.0 mg/kg, Pb ≤ 5.0 mg/kg, Cr ≤ 2.0 mg/kg, As ≤ 2.0 mg/kg。

#### 1.4.6 土壤污染现状评价方法

已测得 CK、S4 和 S5 组 pH 值大于 7.5, S1 ~ S3、S6、S7 组 pH 值介于 6.5 ~ 7.5 之间。参考《土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018)<sup>[19]</sup>对 5 种重金属元素的限量:当 6.5 < pH ≤ 7.5 时, Hg ≤ 2.4 mg/kg, Cd ≤ 0.3 mg/kg, Pb ≤ 120 mg/kg, Cr ≤ 200 mg/kg, As ≤ 30 mg/kg; 当 pH > 7.5 时, Hg ≤ 3.4 mg/kg, Cd ≤ 0.6 mg/kg, Pb ≤ 170 mg/kg, Cr ≤ 250 mg/kg, As ≤ 25 mg/kg。参照《土壤环境检测技术规范》(HJ/T166-2004),采用单项污染指数法和内梅罗污染指数评价标准对滇重楼根际土壤污染情况进行评价<sup>[20]</sup>,土壤内梅罗污染指数评价标准分级见表 1。其中:

土壤单项污染指数( $P_i$ ) =

土壤污染物实测值( $C_i$ )/土壤污染物质量标准( $S_i$ )

内梅罗污染指数( $P_n$ ) =

$\{[(P_i \text{均} 2) + (P_i \text{最大} 2)]/2\}^{1/2}$

表 1 土壤内梅罗污染指数评价标准

Table 1 Evaluation standard of soil Nemer pollution index

等级 Grade	内梅罗污染指数 Nemer pollution index	污染等级 Pollution level
I	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	尚清洁(警戒线)
III	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染
V	$P_{\text{综}} > 3.0$	重污染

### 1.5 数据处理

原始数据处理采用 Excel 2003 软件,方差分析及相关性分析采用 SPSS 22.0 软件,绘图采用 Origin 9.0 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 解有机磷细菌对滇重楼根茎和须根重金属元素含量的影响

不同解有机磷细菌接种处理后,滇重楼根茎 5 种重金属元素含量见图 1。由图可知,7 个处理组中 Pb 元素的含量均显著低于 CK 组( $P < 0.05$ ),表明接种解有机磷细菌能够降低滇重楼根茎对 Pb 元素的吸收能力,其中含量最低的为 S5 组,其含量为 0.723 mg/kg,仅是 CK 组含量的 12.86%。此外,S5

组的 Hg 和 Cd 元素含量为最低值,显著低于 CK 组,表明 S5 组的接种处理能有效降低滇重楼根茎对 Hg、Cd 和 Pb 3 种重金属元素的吸收力。Cr 和 As 元素含量最低均为 S7 组,且都显著低于 CK 组,表明 3 种菌混合处理能有效降低滇重楼根茎对重金属元素 Cr 和 As 的吸收能力。总体上来看,接种解有机磷细菌后对滇重楼根茎中 Hg、Cd、Pb 和 Cr 元素含量均有所改善,但对 As 元素含量的改善效果不明显,其中,接种效果较好为 S5、S6 和 S7 组。参考《中国药典》(2020 年版)和《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762-2017)可知,在已获得的根茎重金属元素含量中,除 CK 和 S2 组的 Pb、Cr 元素含量以及 S5 组的 Cr 元素含量略有超标以外,其余组中的重金属元素含量均已达标。

滇重楼须根中 5 种重金属元素含量如图 2 所示。由图可知,接种处理后须根中 Hg 元素的含量

较 CK 组均有所降低,表明接种解有机磷细菌能够降低滇重楼须根对 Hg 元素的吸收能力,其中含量最低的为 S4 组,为 0.116 mg/kg,仅占 CK 组含量的 12.86%。此外,Cd 和 Pb 元素含量最低的为 S4 组,且均显著低于 CK 组,表明 S4 组的接种处理方式能有效降低滇重楼须根对 Hg、Cd 和 Pb 3 种重金属元素的吸收力。S7 组的 Cr 和 As 元素含量均显著低于 CK 组,且达到最低,此结果与根茎中 Cr 和 As 元素含量所得相同,表明 3 种菌混合处理能有效降低滇重楼根茎和须根对 Cr 和 As 的吸收能力。总的来看,接种解有机磷细菌后对滇重楼须根中 Hg、Pb、Cr 和 As 元素含量均有较大改善,而对 Cd 元素含量的改善效果不明显,其中,S4 和 S7 组的接种效果表现良好。由对药材重金属限量标准规定可知,除 As 元素外,其余元素都有一些组超,除 S2 组的 Pb 元素外,其余超标均不过 2 倍。

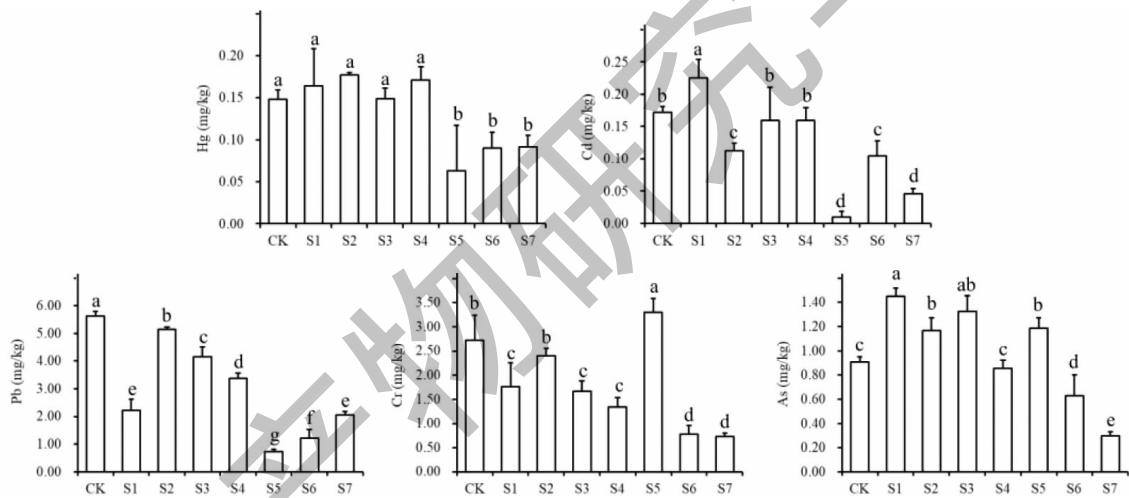


图 1 接种解有机磷细菌对滇重楼根茎 5 种重金属含量的影响

Fig. 1 Effects of inoculation with organophosphate-degradation bacteria on the contents of five heavy metals in the rhizomes of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

注:图中不同小写字母代表不同处理组间的差异显著( $P < 0.05$ ),下同。Note: Different lowercase letters in the figure represent significant differences among different treatment groups ( $P < 0.05$ ), the same below.

## 2.2 解有机磷细菌对滇重楼根际土壤重金属元素含量的影响及重金属污染评价

滇重楼根际土壤 5 种重金属元素含量变化见图 3,由图可知,与 CK 组相比,接种解有机磷细菌后,滇重楼根际土壤中的重金属含量变化不明显且无规律性,表明接种处理对滇重楼根际土壤中的重金属元素含量不会造成影响,而各组中重金属含量的微小变化可能是由混土不匀或者实验过程中的人为误差造成。由《土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018)对农田土壤重金属限量标准

规定可知,所有处理组中的重金属含量均达标。单项污染指数和内梅罗污染指数的评价结果见表 2。由表可知,所有重金属元素的单项污染指数均  $< 1$ ,除 S1 组的内梅罗污染指数介于 0.7 ~ 1.0 之间,土壤处于尚清洁水平,存在被污染的风险以外,其余处理组的内梅罗污染指数均  $< 0.7$ ,为清洁土壤水平。

## 2.3 滇重楼根茎和须根重金属元素富集系数

植物体中重金属元素的富集系数(BCF)( $BCF = \text{元素在植物中的含量} / \text{元素在其植物所生长土壤中的含量}$ )能侧面反映植物对其根际土壤中重金属

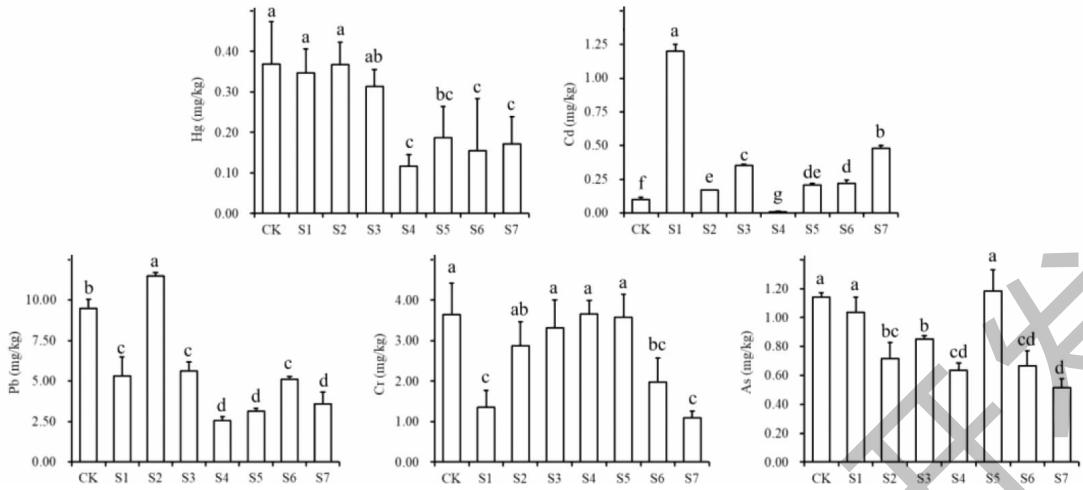


图2 接种解有机磷细菌对滇重楼须根5种重金属含量的影响

Fig. 2 Effects of inoculation with organophosphate-degradation bacteria on the contents of five heavy metals in fibrous roots of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

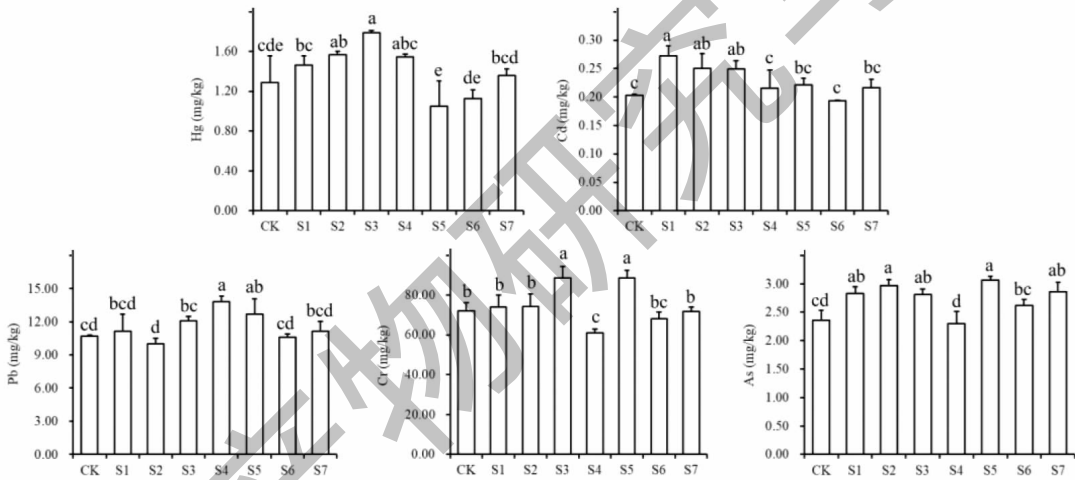


图3 接种解有机磷细菌对滇重楼根际土壤5种重金属含量的影响

Fig. 3 Effects of inoculation with organophosphate-degradation bacteria on the contents of five heavy metals in the rhizosphere soil of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

表2 滇重楼根际土壤重金属污染评价

Table 2 Evaluation of heavy metal pollution in the rhizosphere soil of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

组别 Group	<i>Pi</i>						污染等级 Pollution level
	Hg	Cd	Pb	Cr	As	<i>Pn</i>	
CK	0.379	0.338	0.063	0.288	0.094	0.315	清洁
S1	0.609	0.910	0.093	0.370	0.094	0.707	尚清洁
S2	0.653	0.834	0.083	0.372	0.099	0.656	清洁
S3	0.746	0.831	0.101	0.443	0.094	0.666	清洁
S4	0.456	0.359	0.081	0.245	0.092	0.366	清洁
S5	0.309	0.368	0.075	0.355	0.123	0.313	清洁
S6	0.469	0.645	0.088	0.342	0.087	0.511	清洁
S7	0.566	0.723	0.093	0.359	0.096	0.573	清洁

的富集能力<sup>[2]</sup>, BCF < 0.1 表示绝对贫化, 0.1 < BCF < 0.5 表示相对贫化, 0.5 < BCF < 1.5 表示土壤与植物中的元素含量相当, 1.5 < BCF < 3.0 表示相对富集, BCF > 3.0 表示绝对富集<sup>[21]</sup>。滇重楼根茎和须根重金属元素的富集系数见表 3。

由表可知, 在滇重楼根茎中, S5 组的 Hg、Cd 和 Pb 元素 BCF 最低, S7 组的 Cr 和 As 元素 BCF 最低, 而 CK 组的 Hg、Cd、Pb 和 Cr 元素的 BCF 均为最高值, 表明接种解有机磷细菌后, 能一定程度上降低滇重楼根茎对重金属元素的吸附。其中, Cd 元素的 BCF 相对较高, CK、S1、S3、S4 和 S6 组的富集能力 > 0.5, 表明滇重楼根茎对 Cd 元素的吸附能力较强。此外, 除 CK 和 S2 组的 Pb 元素以及 S1 组的 As 元素的 BCF 大于 0.5 以外, 其余根茎中的重金属元

素富集能力均偏小, 富集能力最小的为 Cr 元素, 表明滇重楼根茎对重金属 Cr 的吸附能力较弱。在滇重楼须根 BCF 中, S4 组的 Hg、Cd 和 Pb 元素 BCF 最低, S7 组的 Cr 和 As 元素 BCF 最低, CK 组的 Hg 和 As 元素的 BCF 最高, 表明接种解有机磷细菌后, 能缓解滇重楼须根对重金属元素的吸附能力。其中, 在须根中 Cd 元素的 BCF 相对较高, S1 组的富集能力大于 3.0, S7 组的富集能力大于 1.5, 表明滇重楼根茎对 Cd 元素的吸附能力较强。此外, 除 CK 和 S2 组中的 Pb 元素以外, 其余须根中的重金属元素 BCF 均小于 0.5, 其中 Cr 元素的 BCF 最小, 均小于 0.1, 表明滇重楼须根对 Cr 的吸附能力较弱, 此结果与根茎的富集系数结果相似。

表 3 滇重楼根茎和须根富集系数

Table 3 Enrichment coefficients of rhizomes and fibrous roots of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

组别 Group	根茎/土壤 Rhizome/soil					须根/土壤 Fibrous root/soil				
	Hg	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Cd	Pb	Cr	As
CK	0.115	0.845	0.527	0.038	0.384	0.286	0.501	0.889	0.051	0.484
S1	0.112	0.824	0.200	0.024	0.512	0.238	4.395	0.477	0.018	0.366
S2	0.113	0.448	0.514	0.032	0.394	0.234	0.677	1.149	0.039	0.241
S3	0.083	0.640	0.344	0.019	0.472	0.175	1.414	0.465	0.037	0.303
S4	0.110	0.740	0.245	0.022	0.371	0.075	0.045	0.185	0.060	0.275
S5	0.060	0.043	0.057	0.037	0.387	0.177	0.940	0.249	0.040	0.386
S6	0.080	0.540	0.114	0.011	0.239	0.138	1.138	0.483	0.029	0.254
S7	0.067	0.212	0.185	0.010	0.103	0.126	2.212	0.322	0.015	0.179

## 2.4 相关性分析

滇重楼根茎、须根及根际土壤中 5 种重金属元素相关性分析如表 4 所示。由表可知, 根茎与须根中的 Hg 元素呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数为 0.771; Pb 元素中, 须根与根茎呈显著正相关, 与土壤呈显著负相关, 相关系数分别为 0.758 和 -0.750; 根茎及须根中的 Hg 和 Pb 元素呈显著正相关, 相关系数分别为 0.761 和 0.811; 根茎中的 Hg 和 Cd 元素之间呈显著正相关, 相关系数为 0.807; 根茎中的 Cr 元素与须根中的 As 元素呈显著正相关, 相关系数为 0.822; 根茎中的 As 元素与土壤中的 Cd 元素呈显著正相关, 相关系数为 0.747。

## 3 讨论与结论

解有机磷细菌可以通过矿化有机磷化合物, 将土壤中难溶性的有机磷化合物转化为植物能直接吸

收利用的有效磷, 促进滇重楼的生长发育, 进而获得高产优质的中药材<sup>[22,23]</sup>, 同时解有机磷细菌还能固定和钝化土壤中重金属元素<sup>[8]</sup>, 使其难以被药用植物直接吸收, 从而减轻中药材中重金属元素残留。在本研究中, 与不接种的 CK 组相比, 接种解有机磷细菌后, 总体上能降低滇重楼根茎和须根中的重金属含量, 对 Pb 元素含量的降低程度最为显著, 其原因是解有机磷细菌可以钝化土壤中的 Pb 元素, 使重金属 Pb 由活性高的形态转化为活性低的形态, 降低其生物有效性<sup>[24,25]</sup>, 从而减少了滇重楼对 Pb 元素的吸收利用。对 Hg 和 Cr 元素含量也有较大改善, 且混合接种处理优于单接种处理, S6 和 S7 组的接种处理方式对滇重楼的影响效果最佳。参考《中国药典》(2020 年版) 和《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762-2017) 作为滇重楼药材限量标

表4 滇重楼根茎、须根及根际土壤中重金属含量相关性分析

Table 4 Correlation analysis of heavy metal contents in rhizomes, fibrous roots and rhizosphere soils of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

指标 Index	根茎 Rhizome					须根 Fibrous root					土壤 soil				
	Hg	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Cd	Pb	Cr	As	Hg	Cd	Pb	Cr	As
根茎 Rhizome	Hg	1.000													
	Cd	0.807 * 1.000													
	Pb	0.761 * 0.503 1.000													
	Cr	0.012 -0.123 0.242 1.000													
	As	0.0443 0.457 0.208 0.585 1.000													
须根 Fibrous root	Hg	0.550 0.519 0.672 0.461 0.604 1.000													
	Cd	0.103 0.394 -0.292 -0.182 0.350 0.319 1.000													
	Pb	0.491 0.275 0.758 * 0.370 0.252 0.811 * -0.131 1.000													
	Cr	0.197 0.007 0.430 0.629 0.338 0.066 -0.707 0.154 1.000													
	As	-0.070 0.153 0.044 0.822 * 0.639 0.478 0.178 0.163 0.404 1.000													
土壤 Soil	Hg	0.771 * 0.553 0.602 -0.208 0.360 0.379 0.123 0.216 0.100 -0.298 1.000													
	Cd	0.518 0.430 0.162 0.164 0.747 * 0.582 0.689 0.195 -0.213 0.183 0.604 1.000													
	Pb	-0.059 -0.077 -0.273 0.037 0.096 -0.585 -0.216 -0.750 * 0.459 0.033 0.109 -0.080 1.000													
	Cr	-0.330 -0.302 -0.119 0.531 0.527 0.313 0.132 0.018 0.216 0.534 0.034 0.363 0.039 1.000													
	As	-0.375 -0.509 -0.376 0.259 0.291 0.165 0.364 0.030 -0.316 0.121 -0.084 0.499 -0.232 0.696 1.000													

准,根茎中仅一些处理组中的 Pb 和 Cr 略有超出标准,而须根中大部分重金属已超出限量标准,其原因可能是由于须根表面存在大量根毛,不仅能直接吸收土壤中的各种有害物质,还能有效增大与土壤的接触面积,从而增大对土壤元素的吸收能力<sup>[26]</sup>。在滇重楼根际土壤中,接种解有机磷细菌后,土壤中的重金属含量没有改变。以《土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018)为参考,所有处理组土壤均未超出国家限定标准;而以《土壤环境检测技术规范》(HJ/T166-2004)为评价标准,所有处理组中的单项污染指数均 < 1,除 S1 组的内梅罗指数大于 0.7,土壤属于尚清洁水平,存在污染风险以外,其余处理组的土壤均达到清洁水平。表明本试验所用的栽培基质中的重金属含量完全符合种植标准,且接种解有机磷细菌后并没有对土壤造成较大的重金属污染风险,因此对滇重楼植株接种解有机磷细菌的试验安全有效。

重金属富集系数是描述重金属在生物体内累积趋势的重要指标,侧面反映了植物对其根际土壤中重金属的富集能力。一般来说,作物对重金属的富集系数越小,则表明其吸收重金属的能力越差,对于土壤重金属的抗逆性则越强<sup>[27]</sup>。水稻对 Cd 的富集作用较强,在种植水稻过程中则需要注意土壤及环

境中 Cd 的残留量,避免对 Cd 的过度富集导致大米中 Cd 含量超标,从而危害人类健康<sup>[28]</sup>。本研究中,接种不同解有机磷细菌,滇重楼根茎和须根对 Hg、Cd、Pb、Cr、As 5 种重金属元素的富集能力各不相同,其中,Cr 元素的富集能力属于强烈贫化,而对 Cd 元素生物累积作用则较大,但均显著低于超富集植物临界含量标准(1 000 mg/kg),须根的富集系数大于根茎,混合接种处理组的富集能力弱于单接种处理组。因此,不考虑将滇重楼须根作为药用部位,可考虑将效果最佳的两种接种处理方式作为生物菌肥的参考,应用于滇重楼人工种植过程中,从而降低滇重楼药材的重金属污染风险,而在今后对解有机磷细菌和滇重楼大田推广栽培实验中,应优先对 Cd 元素进行调控。

相关性分析表明,接种解有机磷细菌后,Hg 和 Pb 元素之间的相关性较大,其他元素的相关程度则较小,表明接种解有机磷细菌后,滇重楼对根际土壤中 Hg 和 Pb 元素的吸收具有显著的协同作用;此外,根茎与须根的相关性强于根际土壤,表明根茎之间、须根之间以及根茎与须根之间的重金属元素含量相互影响能力较强。因此,在今后的大田栽培中,应同时考虑根茎与须根之间以及 Hg 和 Pb 元素之间的协同影响作用。

综上所述,接种不同解有机磷细菌或复合菌,能有效降低滇重楼根茎、须根中 Hg、Pb 和 Cr 元素含量,从而降低滇重楼药材重金属含量超标风险,还能有效控制滇重楼根际土壤重金属污染风险。同时,本研究结果也表明,3 种菌混合接种以及混合接种菌株 *B. wiedmannii* 和 *B. proteolyticus* 这两种方式对滇重楼的影响效果最佳,因此,可将这两种解有机磷细菌的接种方式推广应用到滇重楼人工种植过程中,从而为滇重楼人工种植过程中重金属污染修复提供参考。

#### 参考文献

- Gu WC, Zhao SX, Yang M, et al. Simultaneous determination of amino acids in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* fibril from different habitats by UPLC [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2020, 32:1562-1575.
- Yang M, Zhang J, Shen YX, et al. Effects of symbiosis of *Paris Polyphylla* var. *yunnanensis* with arbuscular mycorrhizal fungi on absorption of heavy metals (Cd, Hg, As, Cu, Pb) [J]. Environ Chem (环境化学), 2018, 37:860-870.
- Zhou N, Xu LF, Yang M, et al. Effect of different dosage of potassium-dissolving bacteria on growth and development of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2021, 33:1548-1557.
- Li HL, Gu WC, Zhao SX, et al. Comparison of 6 heavy metal contents in *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* medicine and their rhizosphere soils from different geographical areas [J]. Environ Chem (环境化学), 2021, 40:2179-2192.
- Wang C, Liu C, Hu Q, et al. Pollution status of heavy metals in herbal medicine and their traceability & control in the whole chain production process [J]. Chin J Environ Eng (环境工程学报), 2021, 15:3789-3800.
- Zuo TT. Refined assessment of heavy metal-associated health risk due to the consumption of traditional animal medicines in humans. [J]. Environ Monit Assess, 2019, 191:171.
- Qin LJ, Yang YZ, Yang XY. Advances in mechanisms of soil phosphorus solubilization and dissolution by phosphate solubilizing microorganisms [J]. Life Sci Res (生命科学研究), 2019, 23:59-64.
- Li YB. Application of phosphorus resolving bacteria in improving typical heavy metal contaminated soil [D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals (北京有色金属研究总院), 2018.
- Chi JL, Hao M, Wang ZX, et al. Advances in research and application of phosphorus-solubilizing microorganism [J]. J Microbiol (微生物学杂志), 2021, 41:1-7.
- Shen JJ, Hou XG, Wang EQ, et al. Organic phosphate-solubilizing bacteria screening in the rhizosphere of *Paeonia ostii* and study on their phosphate-solubilizing capabilities [J]. Biotechnol Bull (生物技术通报), 2022, 38:157-165.
- Shen MC, Li JG, Dong YH, et al. Profiling of plant growth-promoting metabolites by phosphate-solubilizing bacteria in maize rhizosphere [J]. Plants (Basel), 2021, 10:1071-1071.
- Wang YM, Peng S, Hua QQ, et al. The long-term effects of using phosphate-solubilizing bacteria and photosynthetic bacteria as biofertilizers on peanut yield and soil bacteria community [J]. Front Microbiol, 2021, 12:693535-693535.
- Li RS, Yuan HQ, Zhao FY, et al. Determination and analysis of heavy metals of *Paridis Rhizoma* from different localities and pieces [J]. Chin J Exp Tradit Med Form (中国实验方剂学杂志), 2019, 25:30-36.
- Du HH, Zhu FR, Yang M, et al. Isolation and identification of phosphatolytic bacteria in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. China J Chin Mater Med (中国中药杂志), 2021, 46:915-922.
- Lan QJ. Study on the migration and transformation mechanism of typical heavy metals in the sediments of the fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir area [D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University (重庆三峡学院), 2019.
- Huang XL, He XF, Zhou XD, et al. Determination and analysis of 22 elements in *Lycopus lucidus* var. *hirtus* Regel from different habitats [J]. Food Ferment Ind (食品与发酵工业), 2020, 46:229-235.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Vol I (中华人民共和国药典:第一部) [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020:260.
- GB 2762—2017, National food safety standard-limit of contaminants in food (食品安全国家标准食品中污染物限量) [S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- GB15618—2018, Soil environmental quality agricultural soil pollution risk control standard (土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准) [S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- Mu MJ, Zhou XQ, Guo DQ, et al. Effect of growth years to the soil enzyme activities and heavy metal residue of *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li [J]. Environ Chem (环境化学), 2019, 38:1966-1972.
- Mei GL, Wang XX, Sun YZ, et al. Determination and correlation analysis of selenium and heavy metal elements in *Polygonum cuspidatum* and its rhizosphere soil in Shitai County, China [J]. J Anhui Univ Chin Med (安徽中医药大学学



- 报), 2017, 36:81-85.
- 22 Li ZW, Luo LZ, Lang JQ, et al. Effect of organophosphate-solubilizing bacteria on photosynthesis, physiology, and biochemistry of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Chin J Exp Tradit Med Form(中国实验方剂学杂志), 2022, 28: 165-171.
- 23 Li ZW, Lang JQ, Meng Q, et al. Effect of inoculation with organophosphate solubilizing bacteria on quality and soil fertility of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Chin J Exp Tradit Med Form(中国实验方剂学杂志), 2022, 28: 156-164.
- 24 Yao Q. Study on the passivation effect and mechanism of phosphorus-solubilizing bacteria on soil lead pollution [D]. Shanxi: Northwest University(西北大学), 2017.
- 25 Teng ZD. Study on the remediation effect and mechanism of phosphorus-solubilizing bacteria and iron-based materials on lead-contaminated soil [D]. Beijing: Beijing Forestry University(北京林业大学), 2020.
- 26 Li ZW, Gu WC, Xu LF, et al. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium contents in the rhizome, fibrous root and rhizospheric soil of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* from different regions [J]. Chin J Soil Sci(土壤通报), 2022, 53: 445-455.
- 27 Zeng LP, Qin JH, Dong SY, et al. Accumulation of heavy metals copper, zinc, and cadmium in cassava varieties and the associated human health risk [J]. J Agro-Environ Sci(农业环境科学学报), 2017, 36: 1044-1052.
- 28 Chen C, Chen XH, Shen GX, et al. Accumulation characteristics and food safety of five heavy metals in rice [J]. Asian J Ecotoxicol(生态毒理学报), 2021, 16: 347-357.

## 《天然产物研究与开发》青年编委会

青年编委(以姓氏笔划为序)

Members

王红兵	戈惠明	尹文兵	尹胜	吕兆林	刘相国
WANG Hongbing	GE Huiming	YIN Wenbing	YIN Sheng	LYU Zhaolin	LIU Xiangguo
孙昊鹏	孙桂波	李良成	李国友	邱莉	汪海波
SUN Haopeng	SUN Guibo	LI Liangcheng	LI Guoyou	QIU Li	WANG Haibo
沐万孟	张炳火	张德武	陈益华	林昌俊	欧阳杰
MU Wanmeng	ZHANG Binghuo	ZHANG Dewu	CHEN Yihua	LIN Changjun	OUYANG Jie
易华西	罗应刚	周文	胡友财	袁涛	夏永刚
YI Huaxi	LUO Yinggang	ZHOU Wen	HU Youcai	YUAN Tao	XIA Yonggang
高慧敏	唐金山	黄胜雄	韩秀珍	韩淑燕	曾克武
GAO Huimin	TANG Jinshan	HUANG Shengxiong	HAN Xiuzhen	HAN Shuyan	ZENG Kewu
蓝蔚青	廖晨钟	薛永波			
LAN Weiqing	LIAO Chenzhong	XUE Yongbo			