

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020093003

魏祖晨, 潘兴娇, 黄小兰, 等. 太白贝母接种促生菌对根际土壤无机元素的影响[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1254-1262.

WEI Zuchen, PAN Xingjiao, HUANG Xiaolan, et al. Effects of inoculation of *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li with growth-promoting bacteria on inorganic elements in rhizosphere soil[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(4): 1254-1262.

太白贝母接种促生菌对根际土壤无机元素的影响*

魏祖晨¹ 潘兴娇² 黄小兰¹ 黎海灵² 郭冬琴^{1**} 周 浓^{1**}

(1. 重庆三峡学院 生物与食品工程学院, 三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室, 重庆, 404000;

2. 大理大学 药学院, 大理, 671000)

摘 要 采集接种 5 种不同微生物促生菌的太白贝母根茎及其土壤, 分析太白贝母根茎及其土壤中 10 种无机元素的含量及变化规律, 揭示接种不同促生菌对其产生的影响. 结果表明, 接种外源有益微生物对太白贝母根际内 AM 真菌的侵染强度具有调控(促进)作用. 不同促生菌处理的样品中, 根茎及土壤中均未检出 As、Hg 元素, 其余 8 种无机元素含量存在显著性差异($P < 0.05$), Cc 处理组 K、Ca 元素根茎中含量达到根际土含量的 3 倍, Mn 与 Zn 元素最大差异达到近 5 倍. 富集系数分析表明, 根茎中 K、Ca、Mg 和微量元素 Mn、Zn 均有高于土壤的趋势; 有害元素 Cu、Pb、Cd 有低于土壤的趋势. 根际土壤中的金属元素含量较低, 处于未污染范围内. 相关性分析可知, 药材、根际土壤、药材与根际土壤元素之间既有协同作用又拮抗作用.

关键词 太白贝母, 土壤, 有害元素, 污染评价, 促生菌.

Effects of inoculation of *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li with growth-promoting bacteria on inorganic elements in rhizosphere soil

WEI Zuchen¹ PAN Xingjiao² HUANG Xiaolan¹ LI Hailing²
GUO Dongqin^{1**} ZHOU Nong^{1**}

(1. Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of Three Gorges Reservoir Area's Medicinal Herbs, College of Life Science & Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing, 404000, China;

2. College of Pharmacy, Dali University, Dali, 671000, China)

Abstract: We collected bulbs and soils of *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li inoculated with 5 different growth-promoting bacteria to analyze the content and change rules of 10 inorganic elements in *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li and soils, revealing the effects of inoculation with different growth-promoting bacteria. The results showed that the inoculation of beneficial microorganisms from the exogenous can regulate (promote) the infection intensity of AM fungi in the roots of *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li. Hg and As elements were not detected both in rhizomes and soil, and all other 8 inorganic elements were detected. There were significant differences ($P < 0.05$) in the contents of the remaining 8 inorganic elements, and the the content of K and Ca in the bulb of the Cc treatment group reached 3 times than the rhizosphere soil, and the biggest difference between Mn and Zn reached nearly 5 times. The analysis of the enrichment coefficient showed that the K, Ca, and Mg in the bulbs tended to be higher than those in the soil; the trace elements Mn, and Zn also tended to be higher than the soil; the harmful elements Cu, Pb, and Cd were lower than the soil. The metal elements in the rhizosphere soil were low and in the unpolluted range. Correlation analysis showed that there are synergistic and antagonistic effects among medicinal materials, rhizosphere soil,

2019 年 9 月 30 日收稿 (Received: September 30, 2019).

* 国家自然科学基金 (81260622) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (81260622).

** 通讯联系人 Corresponding author, E-mail: guodongqin1997@163.com, erhaizn@126.com.

medicinal materials and rhizosphere soil elements.

Keywords: *Fritillaria Taipaiensis* P. Y. Li, soil, harmful metal, pollution evaluation, promoting bacteria.

太白贝母(*Fritillaria Taipaiensis* P. Y. Li)是川贝母的基源植物之一,具有清热润肺,化痰止咳之疗效^[1].随着对川贝母药用价值认识的深入及市场需求,野生川贝母采挖严重,资源匮乏,现已列入国家三级保护植物名单^[2].因此,川贝母的人工栽培再生成为其产业化发展的必由之路.太白贝母作为川贝母最成功的人工培育品之一,具有适应性强、生产技术成熟、产量高、品质佳、低海拔可栽培等自然优势,且在川陕渝一带已形成小规模化种植^[3-4].随着人工种植技术的不断成熟,随之而来的对太白贝母品质及安全性的要求也在逐步提高.在药材栽培过程中,化肥的大量使用引起土壤中的营养成分严重失衡,造成微量元素缺乏,重金属元素超标,药材品质下降,这已严重影响收获高品质的太白贝母药材^[5].

促生菌是指经加工而成的含有活菌的生物制品,能够通过微生物代谢而改善土壤环境,增强土壤肥力从而改善宿主植物品质^[6-7].林英等发现解钾菌能有效增加土壤中速效钾含量^[8].张艺灿等^[9]从矿质元素等方面阐明了溶磷微生物对植株的促生长作用.近年来,促生菌作为一种环境友好型肥料^[10],因其能显著改善根际土壤微生物种群密度和种群结构^[11-12],已被广泛应用于名贵中药材的人工栽培^[13],这对实现中药材绿色安全、优质高产起到重要的促进作用^[14-15].

董天旺等^[16]发现氮磷肥与微生物肥料能提高太白贝母栽培土壤中微生物数量.谷文超等^[17]探究了不同年限太白贝母品质与根际土壤因子的相关性.而将促生菌接种运用于太白贝母栽种中,以土壤无机元素评价太白贝母品质的研究鲜有报道.实验室前期研究表明,接种丛枝菌根能降低滇重楼重金属元素的富集,保证其安全性^[18].因此,本文拟用 5 种不同组合的促生菌,研究 3 年生太白贝母鳞茎不灭菌时,接种外源性 AM 真菌、解钾菌、溶磷菌.探究太白贝母根部菌根侵染率和药材、土壤无机元素含量的变化,旨在探讨根际土壤有益微生物是否提高太白贝母有益元素含量,降低有害元素的积累,从而提高太白贝母药材品质及安全性的可行性.

1 材料和方法 (Materials and methods)

1.1 促生菌来源

AM 真菌通过美国国际丛枝菌根真菌种质资源保藏中心 (INVAM) 购得相应 AM 真菌纯净菌剂,自行扩繁,接种菌剂为带有孢子、菌丝及侵染后根段的栽培基质, *Claroideoglossomus claroideum*、*Racocetra coralloidea*;解钾菌(有效活菌数 $\geq 2 \times 10^{10}$ cfu $\cdot$ g⁻¹)、溶磷菌(有效活菌数 $\geq 2 \times 10^{10}$ cfu $\cdot$ g⁻¹)由广州市微元生物科技有限公司提供.

1.2 样品信息

太白贝母新鲜鳞茎采自重庆市巫溪县红池坝风景区栽培基地的 3 年生植株,本实验采样区域位于 31°32'32.09"/109°4'55.81",海拔约 1800—2630 m,属典型的立体高寒山区气候,夏季平均气温 17℃ 以下,林草覆盖面积在 85% 以上.采集样品经三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室(重庆三峡学院)周浓教授鉴定为百合科植物太白贝母(*Fritillaria Taipaiensis* P. Y. Li)的新鲜鳞茎.

1.3 栽培管理及样品采集

栽培基质为重庆市万州区铁峰山国家森林公园的腐殖土,土壤采集区域位于 30°55'20.40"/108°20'52.80",海拔 530—1355 m.腐殖土经风干过筛,置于 121℃ 高压灭菌锅内灭菌 2 h.采用室温盆栽(栽培筐)方法,将栽培筐用 10% 次氯酸钠溶液消毒 15 min 后,纯净水冲洗干净,备用.2017 年 8 月 26 日按行距 16—18 cm,株距 3—4 cm,栽后覆土 5—6 cm.微生物菌剂均匀层施于表土下太白贝母须根部,设接种 Cc 处理组(接种剂量为每盆约 1360 个 *Claroideoglossomus claroideum* 孢子)、Rco 处理组(接种剂量为每盆约 1430 个 *Racocetra coralloidea* 孢子)、Prb 处理组(接种剂量为每盆 35 g 解钾菌)、Psb 处理组(接种剂量为每盆 35 g 溶磷菌)、Mi 处理组(*Claroideoglossomus claroideum*、*Racocetra coralloidea*、解钾菌、溶磷菌的混合接种,接种剂量分别为 4 种微生物单个接种剂量的 1/4)组和 CK(对照)组共 6 种处理,每处理 5 个

重复,每重复 1 筐,栽种太白贝母 10 株,生长期按常规管理.2018 年 5 月 29 日收获太白贝母植株的鳞茎,鳞茎洗净后在 45℃ 烘箱烘干,用于品质分析;须根按要求保存,用于菌根侵染率和侵染强度的分析;根际土壤采用多点混合法收集,轻轻地去掉枯枝落叶层,用小木铲轻轻挖掉表面的浮土,运用抖根法收集根际土壤,抖去鳞茎上的大颗粒土,余下部分即为试验所用根际土壤.每个土壤样本平行采集 3 份,并记录采样信息,非根际土壤采集根部周围 1—2 cm 处土壤,平行采集 3 份,记录样品信息.

1.4 指标测定

1.4.1 样品元素测定

K、Ca、Mg、Mn、Zn、Cu、Pb、Cd 元素采用陈碧华等^[19]的方法测定,即称取样品 0.2000 g 于聚四氟乙烯烧杯中,加入 8 mL 硝酸,微波消解仪消解处理.待消解完全后,冷却转移至 50 mL 量瓶中,用 1% 硝酸溶液定容至刻度.空白样品同理,采用原子吸收分光光度法测定.Hg、As 元素采用母茂君等^[20]的方法测定,即称取木香样品 0.2000 g 于消解管中,在微波消解仪上进行消解,消解完全后,Hg 测定时,无需挥酸,直接转移定容至 25 mL 后进行测定;As 测定时,加入 5% 硫脲和 5% 抗坏血酸各 2.5 mL,50% 盐酸 2.5 mL,定容至 25 mL 后反应 30 min.空白样品同理,采用原子荧光分光光度计测定.

1.4.2 太白贝母根茎无机元素富集系数评价

元素的富集系数(C)= 营养元素在植物体中的量/营养元素在其植物所生长土壤中的量^[21].

1.4.3 太白贝母药材与根际土壤重金属污染评价

根据《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》^[22]及《土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准》^[23]进行污染现状评价(见表 1).

表 1 太白贝母药材及土壤重金属评价标准限量参考

Table 1 <i>Fritillaria Taipaiensis</i> P.Y.Li medicinal plant and soil heavy metal evaluation standard limit reference					
污染物项目 Pollution project	Cd	Hg	As	Cu	Pb
药用植物及制剂外经贸绿色行业标准限量/(mg·kg ⁻¹) Medicinal Plants and Preparations Foreign Economic and Trade Green Industry Standards Heavy metal content	0.3	0.2	2.0	20	5.0
土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准限量/(mg·kg ⁻¹) Environmental Quality Agricultural Soil Pollution Risk Control Standard Heavy metal content	0.3	2.4	30	100	120

1.5 数据分析

全文数据均使用 SPSS 20.0 统计软件和 Excel 2010 进行处理分析.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 不同促生菌处理对太白贝母根系侵染率的影响

每组随机选取太白贝母根系 30 条,剪成长约 1.0 cm 的根段,采用曲利本蓝染色法对太白贝母根系侵染率进行测定^[24].由图 1 可见,不同促生菌处理组的太白贝母根系均被 AM 真菌侵染,侵染率达 100%,形成了丛枝菌根结构,但侵染强度却有较大差异.同时,对照 CK 组也形成了菌根结构,且侵染率达 100%,与周浓等^[25]对百合科植物滇重楼的研究结果一致.对照 CK 组,5 种不同促生菌处理组太白贝母根系侵染强度均有所增强,均达到显著性差异($P<0.05$).由此可见,接种外源根际土壤有益微生物对太白贝母根内 AM 真菌的侵染强度具有调控(促进)作用.

2.2 不同促生菌处理对太白贝母栽培土壤中无机元素含量的影响

5 种不同促生菌处理的太白贝母及 CK 组的土壤中 10 种元素含量测定见表 2.10 种元素中除 As、Hg 元素未检出外,其余测定结果显示不同促生菌处理的太白贝母土壤中元素含量存在显著性差异($P<0.05$).根际土壤中,与 CK 组相比,Psb 处理组 K 元素的含量升高了 5 倍多,的 Rco 处理组 K 元素含量提高最低,也达到 CK 组 2 倍;而相同的非根际土壤中 K 元素的含量普遍呈下降趋势.说明促生菌处理提高了根际土壤对周围土壤的 K 元素的富集能力.而根际土壤处理组中,Cc、Rco、Mi 处理组 Ca 元素的含量

比起 CK 组明显升高,其余 2 组降低,对应的非根际土壤中 Ca 元素的含量相应的增加或减少.证明接种不同促生菌的太白贝母,其对应土壤对 Ca 元素的吸收能力存在差异性.太白贝母根际土壤中的微量元素 Mg、Mn、Zn 元素的含量比起 CK 组有所上升,同时在非根际土壤中的 Mg、Mn、Zn 元素含量也有所增加.证明促生菌处理后,整体上增加了土壤中微量元素的含量.

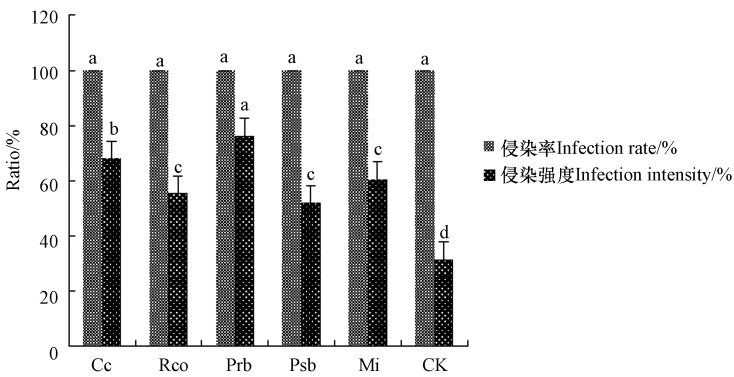


图 1 接种不同促生菌对太白贝母根系侵染率的影响($\bar{x} \pm s, n=5$)

Fig.1 Effect of inoculation with different growth-promoting bacteria on the root infection rate of *Fritillaria taipaiensis*

有害元素 Cu、Pb、Cd、As、Hg,除 As、Hg 低于检出限未检出外,其余元素含量均在 CK 组对应元素含量上下浮动,变化不显著,但含量均在安全范围以内.证明促生菌没有影响到太白贝母土壤的安全性.10 种无机元素在根际土壤中按平均含量排序为:K>Ca>Mg>Zn>Mn>Pb>Cu>Cd;10 种无机元素在非根际土壤中按平均含量排序为:K>Mg>Ca>Mn>Zn>Pb>Cu>Cd.

总体来看,无论在根际土壤或非根际土壤中,大量元素 K、Ca、Mg 的含量都非常高.非根际土中的各种元素含量大都高于根际土,这可能与药材根茎对元素的吸收有关.其中,有害元素含量都比较低,处于安全范围内,这保证了太白药材的安全性.与 CK 处理组对比,不同接种处理条件下,各种元素的含量变化略有不同,呈现不同的差异性;证明接种不同的促生菌对太白贝母土壤中元素的含量是有影响的,这体现在药材对土壤中各种元素吸收能力的差异上.

2.3 不同促生菌处理对太白贝母药材中无机元素含量的影响

5 种不同促生菌处理的太白贝母及 CK 组的太白贝母鳞茎中 10 种元素含量测定见表 2.10 种元素中,除 As、Hg 未检出外,其余测定结果显示不同促生菌处理太白贝母鳞茎中元素含量存在显著性差异($P<0.05$).鳞茎测定元素中,与 CK 组相比,Cc 和 Rco 处理组大量元素 K、Ca、Mg 元素的含量提升显著,均在 CK 组的 2 倍以上.证明促生菌处理显著提高了太白贝母根茎对大量元素的吸收.其余处理组含量变化不大.同样的,Cc 和 Rco 处理组微量元素的含量也有显著提升,其余 3 组变化不大.有害元素 Cu、Pb、Cd、As、Hg 元素的含量变化均在正常范围内,远低于安全标准.

在太白贝母药材测定元素中,K 元素含量最高,Cd 元素含量最低;有害元素中,Cu 元素含量最高.与 CK 处理组比较,不同促生菌处理的太白贝母根茎的无机元素含量,既有升高也有降低;这意味着试验组的不同接种处理会影响太白贝母根茎中无机元素含量的变化,这可能是由于接种促生菌的不同导致鳞茎对土壤中不同元素的吸收能力产生差异.

2.4 不同促生菌处理对太白贝母药材的无机元素吸收能力的影响

太白贝母通过根茎吸收土壤中的营养成分供给生长,同时也会吸收土壤中的无机元素.太白贝母鳞茎中各无机元素富集系数见表 3.在不同促生菌处理组中,除未检出的 As、Hg 元素外,其余 8 种无机元素的富集系数各不相同.CK 处理组中,K、Ca、Mg、Cu、Cd 元素的富集系数大于 1,表明根茎对这 5 种元素的吸收较好.Cc 处理组中,K、Ca、Cu、Cd 元素的富集系数大于 1,表明根茎对这 4 种元素吸收较好.Rco 处理组中,K、Ca、Mn、Zn、Cu 元素的富集系数大于 1,表明根茎对这 5 种元素的吸收较好.Mi 处理组中,仅有 Cu 元素的富集系数大于 1.Psb 处理组中,Ca、Cu 元素的富集系数大于 1,表明根茎对这 2 种元素吸收较好.Prb 处理组中,K、Mn、Zn、Cu、Cd 元素的富集系数大于 1,表明根茎对这 5 种元素的吸收较好.

表 2 处理组无机元素含量的比较

处理组 Treatment group	K/ (mg·g ⁻¹)	Ca/ (mg·g ⁻¹)	Mg/ (mg·g ⁻¹)	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Pb/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	As/ (mg·kg ⁻¹)	Hg/ (mg·kg ⁻¹)
根际土壤 Rhizosphere soil	CK	6.604±0.03f	3.300±0.02d	3.198±0.01f	0.218±0.01f	0.116±0.01f	0.076±0.01d	0.004±0.01b	—	—
	Cc	16.133±0.04d	13.534±0.07b	8.724±0.02b	0.452±0.01c	0.645±0.01c	0.208±0.03bc	0.007±0.01b	—	—
	Rco	13.380±0.06e	10.947±0.04c	7.759±0.02c	0.259±0.01e	0.298±0.01d	0.242±0.01ab	0.012±0.01a	—	—
	Mi	18.182±0.05b	14.074±0.06a	9.353±0.02a	0.362±0.01d	0.658±0.01b	0.154±0.01c	0.013±0.01a	—	—
	Psb	32.637±0.09a	2.793±0.04e	7.139±0.03d	0.520±0.01a	0.704±0.01a	0.291±0.01a	0.013±0.01a	—	—
	Prb	16.349±0.04c	10.864±0.05c	6.868±0.03e	0.472±0.01b	0.226±0.01e	0.264±0.06ab	0.012±0.01a	—	—
非根际土壤 Non-rhizosphere soil	CK	21.872±0.05c	4.276±0.02c	5.902±0.01f	0.240±0.01e	0.262±0.01d	0.128±0.03c	0.004±0.01bc	—	—
	Cc	7.846±0.04f	1.650±0.04c	13.801±0.03b	0.018±0.01f	0.068±0.01e	0.297±0.07ab	0.011±0.01a	—	—
	Rco	24.262±0.06a	17.536±0.04a	14.041±0.03a	0.556±0.01c	0.878±0.01a	0.055±0.02ab	0.010±0.01a	—	—
	Mi	14.775±0.02e	9.405±0.08b	13.482±0.03c	0.458±0.01d	0.295±0.01c	0.256±0.03bc	0.013±0.01a	—	—
	Psb	20.169±0.04d	15.691±0.07a	12.761±0.03d	0.611±0.01a	0.697±0.01b	0.303±0.08ab	0.001±0.01c	—	—
	CK	14.207±0.01d	11.660±0.03c	3.731±0.02f	0.026±0.01b	0.107±0.01d	0.056±0.02b	0.011±0.01b	—	—
药材 Plant	Cc	47.624±0.01a	39.264±0.15a	8.289±0.02a	0.082±0.01b	0.302±0.01c	0.159±0.01a	0.021±0.01a	—	—
	Rco	44.465±0.01b	32.627±0.08b	7.246±0.04b	0.995±0.16a	1.280±0.01b	0.160±0.01a	0.002±0.01c	—	—
	Mi	12.472±0.01f	7.375±0.13e	5.842±0.05c	0.025±0.01b	0.110±0.01d	0.139±0.09ab	—	—	—
	Psb	13.845±0.01e	9.910±0.11d	4.548±0.04e	0.026±0.01b	0.051±0.01e	0.059±0.01b	0.010±0.01b	—	—
	Prb	38.116±0.01c	5.964±0.10f	5.020±0.09d	0.854±0.01a	1.389±0.01a	0.136±0.01ab	0.013±0.01b	—	—

注:不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), “—”表示未检出,下同.

Note: Different lowercase letters indicated significant difference ($P < 0.05$), “—” means not detected, same as below.

总体来看,Cu 元素在所有处理组的富集系数都大于 1,证明太白贝母根茎对 Cu 的吸收作用较强,但 Cu 是有害元素,过多的富集会影响其安全性;与 CK 比较发现,Cc、Rco、Mi、Psb 处理组 Cu 元素的富集系数均低于 CK 组(7.546),表明经过接种促生菌处理能有效降低鳞茎对土壤中 Cu 的吸收.太白贝母鳞茎对有害元素的富集能力弱,这能有效地保证太白贝母药材的安全性.

表 3 太白贝母根茎各无机元素的富集系数分析

Table 3 Analysis on the Enrichment Coefficient of Inorganic Elements in the Rhizome of <i>Fritillaria taipaiensis</i>										
处理组 Treatment group	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Hg
CK	2.151	3.533	1.166	0.118	0.922	7.546	0.746	2.753	—	—
Cc	2.952	2.901	0.950	0.180	0.469	2.506	0.763	3.008	—	—
Rco	3.323	2.981	0.934	3.835	4.300	3.629	0.661	0.167	—	—
Mi	0.686	0.524	0.625	0.069	0.168	5.091	0.903	—	—	—
Psb	0.424	3.548	0.637	0.050	0.072	2.853	0.202	0.763	—	—
Prb	2.331	0.549	0.731	1.808	6.142	7.557	0.513	1.076	—	—

2.5 不同促生菌处理对太白贝母药材及土壤重金属污染评价

参照中华人民共和国《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》,与表 2 中太白贝母药材中测定的 5 种有害元素含量比较.太白贝母药材中 Cu、Pb、Cd、As 及 Hg 含量均未超标.

参照《土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准》,比较表 2 中非根际土壤及根际土壤中 5 种有害元素.土壤中 Cu、Pb、Cd、As 及 Hg 含量均未超标.表明经试验组不同菌剂接种处理后,太白贝母药材的安全性并未受到威胁.

2.6 药材中无机元素含量间的相关性

利用 SPSS 20.0 对不同促生菌处理的太白贝母鳞茎元素含量进行相关性分析,结果见表 4.其中,Mn 和 Zn 两元素间存在极显著正相关;Ca 元素和 Mg 元素、Mg 元素和 Pb 元素两组元素存在显著正相关,表明这些元素之间存在着协同作用.不同元素间都存在着一定的协同或拮抗作用,合理的搭配接种不同促生菌以升高或降低鳞茎中元素含量水平,能提高太白贝母的品质,达到理想效果.

表 4 药材根茎中无机元素间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of inorganic elements in rhizomes of medicinal materials								
元素 Element	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd
K	—							
Ca	0.756	—						
Mg	0.772	0.862 *	—					
Mn	0.642	0.175	0.236	—				
Zn	0.688	0.153	0.244	0.984 **	—			
Cu	0.018	-0.422	0.030	0.252	0.340	—		
Pb	0.760	0.556	0.853 *	0.522	0.557	0.483	—	
Cd	0.403	0.328	0.166	-0.211	-0.089	-0.267	-0.056	—

注:“*”、“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上存在显著差异.
Note: “*”, “**” indicate significant differences at levels 0.05 and 0.01 respectively.

2.7 土壤中无机元素含量间的相关性

利用 SPSS 20.0 对不同促生菌处理的太白贝母土壤中元素含量进行相关性分析,结果见表 5.其中,Cu 与 Pb 元素之间存在极显著正相关.Cu 与 Pb 均为有害元素,要保证药材的安全性,必须要降低其在药材中的含量.合理的运用不同促生菌接种,能够减少药材对土壤中有害元素的吸收,提高药材的安全性.

2.8 土壤与药材中无机元素含量间的相关性

利用 SPSS 20.0 对不同促生菌处理的太白贝母根际土壤元素与太白贝母根茎元素进行相关性分

析,结果见表 6.由表 6 可以看出,土壤中 Ca 元素与根茎中的 Pb 元素之间存在极显著性正相关.其余元素之间,也存在一定的相关性.这些相关性存在一定差异,证明试验组不同促生菌处理的太白贝母根茎与土壤元素含量间存在一定的协同作用或者拮抗作用.利用这些相关性差异,合理接种不同的促生菌,对太白贝母的栽培的品质提高具有重要作用.

表 5 药材土壤中无机元素间的相关性分析
Table 5 Correlation analysis of inorganic elements in medicinal soil

元素 Element	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd
K	—							
Ca	-0.207	—						
Mg	0.432	0.770	—					
Mn	0.796	0.074	0.464	—				
Zn	0.746	0.245	0.739	0.624	—			
Cu	0.801	-0.081	0.401	0.690	0.367	—		
Pb	0.720	0.069	0.474	0.723	0.354	0.975 **	—	
Cd	0.661	0.262	0.644	0.463	0.426	0.768	0.710	—

注:“*”、“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上存在显著差异.
Note: “*”, “**” indicate significant differences at levels 0.05 and 0.01 respectively.

表 6 药材与土壤无机元素间的相关性分析
Table 6 Correlation analysis between medicinal materials and soil inorganic elements

植物 Plant	土壤 Soil							
	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd
K	-0.252	0.546	0.324	0.087	-0.146	0.202	0.396	-0.040
Ca	0.222	0.378	0.306	-0.144	0.134	-0.046	0.098	-0.283
Mg	-0.066	0.758	0.716	0.088	0.372	0.089	0.253	0.083
Mn	-0.228	0.280	0.080	-0.135	-0.518	0.387	0.457	0.360
Zn	-0.250	0.340	0.090	-0.050	-0.523	0.361	0.456	0.319
Cu	-0.010	-0.646	0.468	0.256	0.054	0.055	0.098	0.506
Pb	-0.220	0.942 **	0.726	0.032	0.124	0.076	0.241	0.282
Cd	-0.012	-0.083	-0.173	0.440	0.025	-0.035	0.098	-0.544

注:“*”、“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上存在显著差异.
Note: “*”, “**” indicate significant differences at levels 0.05 and 0.01 respectively.

3 结论 (Conclusion)

- (1) 接种外源性促生菌能与太白贝母根系共生并形成良好的丛枝菌根结构,不同微生物促生菌处理组太白贝母药材对无机元素的吸收能力和富集能力存在差异.与对照(CK)组相比较,整体上来说,能增加根茎及其土壤中无机元素含量,增强了无机元素的富集能力,从而改善太白贝母的生长发育过程,促进药材中营养物质的积累.
- (2) 重金属元素含量作为评价药材质量的主要指标之一,严重影响药材的人药安全性.参照《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》和《土壤环境质量农用土壤污染风险管控标准》对太白贝母药材及其土壤中重金属元素含量进行评价,结果表明药材和土壤未受到重金属元素污染,均低于国家相应标准的限量值,为太白贝母今后栽培及生产的可持续健康发展提供理论依据.
- (3) 相关性分析表明,不同微生物促生菌处理组太白贝母的药材与药材、土壤与土壤以及药材与土壤之间的元素含量存在相关关系,既有协同作用,又有拮抗作用.实际生产栽培中应注意根据实际情况增施相应微生物菌肥,从而提升太白贝母的人药品质.

参考文献 (References)

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[S]. 一部. 北京: 中国中医药出版社, 2020: 38-39.

- National Pharmacopoeia Commission. The Pharmacopoeia of the People's Republic of China[S]. One. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2020: 38-39(in Chinese).
- [2] 付绍智, 袁定明, 欧阳东, 等. 重庆太白贝母种植业发展历史现状及对策探讨[J]. 时珍国医国药, 2014, 25(2): 476-477.
FU S Z, YUAN D M, OUYANG J, et al. The development history of Chongqing *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li planting industry and its countermeasures[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2014, 25(2): 476-477(in Chinese).
- [3] 付绍智. 长江三峡地区野生太白贝母的生态类型与保护对策[J]. 时珍国医国药, 2012, 23(8): 2018-2019.
FU S Z. Ecological types and protection strategies of wild *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li in the Three Gorges area of the Yangtze River[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2012, 23(8): 2018-2019(in Chinese).
- [4] 周浓, 丁博, 郭冬琴, 等. 野生与栽培太白贝母茎、叶显微结构的比较研究[J]. 中药材, 2015, 38(1): 77-80.
ZHOU N, DING B, GUO D Q, et al. Comparative study on the microstructure of the stem and leaf of wild and cultivated *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li [J]. Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(1): 77-80(in Chinese).
- [5] 赵静名, 洛俊峰, 吴炳福. 浅谈平贝母微量元素营养失调的发生及防治措施[J]. 人参研究, 2010, 22(4): 33.
ZHAO J M, LUO J F, WU B F. A brief talk on the occurrence and prevention measures of nutrient deficiency of *Fritillaria Pingii*[J]. Ginseng Research, 2010, 22(4): 33(in Chinese).
- [6] 常换换, 张立猛, 崔永和, 等. 促生菌在中国烤烟生产中的应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(10): 214-220.
CHANG H H, ZHANG L M, CUI Y H, et al. Research progress in the application of growth-promoting bacteria in flue-cured tobacco production in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(10): 214-220(in Chinese).
- [7] GUO J K, MVHAMMAD A, LV X, et al. Prospects and applications of plant growth promoting rhizobacteria to mitigate soil metal contamination: A review[J]. Chemosphere, 2020, 246, 125823.
- [8] 林英, 司春灿, 章慧璇. 解钾微生物研究现状及其在农业生产中的应用和展望[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 1-5.
LIN Y, SI C C, ZHANG H X. Research status of potassium-dissolving microorganisms and their application and prospects in agricultural production[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(12): 1-5(in Chinese).
- [9] 张艺灿, 刘凤之, 王海波. 根际溶磷微生物促生机制研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 1-9.
ZHANG Y C, LIU F Z, WANG H B. Research progress on the growth promotion mechanism of rhizosphere phosphate-dissolving microorganisms[J]. Soil and Fertilizer China, 2020(2): 1-9(in Chinese).
- [10] MOHAMED I, EID K E, ABBAS M H H, et al. Use of plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizae to improve the growth and nutrient utilization of common bean in a soil infected with white rot fungi[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 171: 539-548.
- [11] PENG R, PENG M, MO R Y, et al. Analysis of the bioactive components from different growth stages of *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li [J]. Acta Pharmaceutica Sinica B, 2013, 3(3): 167-173.
- [12] 周浓, 郭冬琴, 沈力, 等. 太白贝母与暗紫贝母中4种生物碱的含量比较[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 133-136.
ZHOU N, GUO D Q, SHEN L, et al. Comparison of the contents of four alkaloids in *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li and *Fritillaria dark purple*[J]. Food Science, 2014, 35(12): 133-136(in Chinese).
- [13] 乔卿梅, 程茂高, 王新民. 根际微生物在克服药用植物连作障碍中的潜力[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 957-961.
QIAO Q M, CHENG M G, WANG X M. The potential of rhizosphere microorganisms in overcoming the obstacles of continuous cropping of medicinal plants[J]. Chinese Journal of Soil Science. 2009, 40(4): 957-961(in Chinese).
- [14] 肖艳红, 李菁, 刘祝祥, 等. 药用植物根际微生物研究进展[J]. 中草药, 2013, 44(4): 497-504.
XIAO Y H, LI J, LIU Z X, et al. Research progress on rhizosphere microorganisms of medicinal plants[J]. Chinese Herbal Medicine, 2013, 44(4): 497-504(in Chinese).
- [15] 耿士均, 王波, 刘刊, 等. 专用微生物肥对不同连作障碍土壤根际微生物区系的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(4): 758-764.
GENG S J, WANG B, LIU K, et al. Effect of special microbial fertilizer on the rhizosphere microbial flora of different continuous cropping obstacles[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28(4): 758-764(in Chinese).
- [16] 董天旺. 氮磷肥与微生物肥料配施对2年生太白贝母生长及品质的影响[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2018.
DONG T W. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus fertilizers and microbial fertilizers on the growth and quality of two-year-old *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li [D]. Xi'an: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2018(in Chinese).
- [17] 谷文超, 母茂君, 杨敏, 等. 太白贝母鳞茎品质与根际土壤因子的相关性分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(7): 165-177.
GU W C, MU M J, YANG M, et al. Correlation analysis of bulb quality of *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li and Rhizosphere Soil Factors[J]. Chinese Journal of Experimental Formulas, 2020, 26(7): 165-177(in Chinese).
- [18] 杨敏, 张杰, 沈昱翔, 等. 滇重楼与丛枝菌根的共生对重金属元素吸收的影响[J]. 环境化学, 2018, 37(4): 860-870.
YANG M, ZHANG J, SHEN Y X, et al. Effects of symbiosis of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* with arbuscular mycorrhizal fungi on absorption of heavy metals[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(4): 860-870(in Chinese).
- [19] 陈碧华, 杨和连, 李亚灵, 等. 不同种植年限大棚菜田土壤水溶性盐分的变化特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 241-245.
CHEN B H, YANG H L, LI Y Y, et al. Variation characteristics of soil water-soluble salt in greenhouse vegetable fields with different planting years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 241-245(in Chinese).

- [20] 母茂君, 周雪芹, 郭冬琴, 等. 太白贝母种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(9): 1966-1972.
MU M J, ZHOU X Q, GUO D Q, et al. Effects of planting years of *Fritillaria Taipaiensis* P.Y.Li on soil heavy metal content and enzyme activity[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38 (9): 1966-1972 (in Chinese).
- [21] 严明理, 刘丽莉, 王海华, 等. 模拟酸雨和 Pb 复合污染对羽叶鬼针草的生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 217-221.
YAN M L, LIU L L, WANG H H, et al. Effect of simulated acid rain and pb compound pollution on the physiological characteristics of *bidens pinnatum*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23 (1): 217-221(in Chinese).
- [22] 中华人民共和国商务部. WM/T2 -2004 药用植物及制剂外经贸行业标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 1.
Ministry of Commerce of the People's Republic of China. WM/T2-2004 Industrial Standards for Foreign Trade and Economic Cooperation of Medicinal Plants and Preparations[S]. Beijing: China Standard Press, 2004: 1(in Chinese).
- [23] 生态环境部国家市场监督管理总局. GB 15618-2018. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 2.
State Administration for Market Supervision and Administration of the Ministry of Ecology and Environment. GB 15618-2018. Soil environmental quality agricultural soil pollution risk management and control standards[S]. Beijing: China Standards Press, 2018: 2(in Chinese).
- [24] 崔莉娜, 郭弘婷, 李维扬, 等. 不同林龄杉木人工林菌根侵染特征研究[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1926-1934.
CUI L N, GUO H T, LI W Y, et al. Study on the characteristics of mycorrhiza infection in Chinese fir plantations of different ages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (6): 1926-1934(in Chinese).
- [25] 周浓, 张德全, 孙琴, 等. 真菌诱导子对滇重楼中次生代谢产物甾体皂苷的影响研究[J]. 药学报, 2012, 47(9): 1237-1242.
ZHOU N, ZHANG D Q, SUN Q, et al. The effect of fungal elicitor on the secondary metabolite steroidal saponins of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2012, 47 (9): 1237-1242(in Chinese).