

不同丛枝菌根真菌菌剂对滇重楼及土壤中营养元素的影响

赵顺鑫,魏祖晨,李卓蔚,许凌峰,郭冬琴,周 浓,杜慧慧*

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 404120

摘要:探究不同丛枝菌根真菌菌剂对滇重楼和土壤不同部位营养元素的影响,为滇重楼生物菌肥的研发提供参考。本文通过盆栽接种不同丛枝菌根真菌菌剂,采用凯氏定氮法、钒钼黄比色法、硫酸-高氯酸消煮法和原子吸收光谱法测定滇重楼和土壤中的氮、磷、钾、钙、镁元素含量。结果表明,不同 AM 真菌混剂处理后,滇重楼和土壤不同部位营养成分吸收及积累随生长期的不同而各异,S8 处理组可增加滇重楼新、老根茎和叶中氮含量、新根茎中磷的含量(最高 6.289 g/kg)以及不同部位钙的含量,其中叶中钙含量最高,为 40.323 g/kg,也可增加新根茎中镁的含量,最高可达 28.142 g/kg;而不同 AM 处理组根际土壤中氮、磷、钾、镁的含量变化规律不明显,而根际土壤中钙的含量有不同程度的增加,且 S8 处理组效果较好,可达 125.734 g/kg。相关性分析表明:滇重楼老根茎中氮与钙和镁以及钙和镁之间呈正相关,老根茎中钙含量与根际土壤中钙、镁呈负相关。新根茎中氮与磷、镁与磷和钾呈正相关,而根际土壤中钙与钾呈负相关,与根际土壤中镁呈正相关。综上,不同 AM 真菌组合能影响滇重楼根茎与其根际土壤大量元素的吸收及蓄积,其中 S8 处理组(微小巨孢囊霉 *Gigaspora albida*、巨大巨孢囊霉 *Gigaspora gigantea*、美丽盾巨孢囊霉 *Scutellospora calospora*、亮色盾巨孢囊霉 *Racocetra fulgida*、根内球囊霉 *Rhizophagus intraradices*、近明球囊霉 *Claroideoglossum claroideum*)的效果最佳,可作为滇重楼生物菌肥的优良菌株组合之一。

关键词:土壤微环境;滇重楼;丛枝菌根真菌;营养元素吸收

中图分类号:R282

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2021)10-1691-10

DOI:10.16333/j.1001-6880.2021.10.008

Effects of different arbuscular mycorrhizal fungicides on *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* and the nutrient elements in the rhizosphere soil

ZHAO Shun-xin, WEI Zu-chen, LI Zhuo-wei, XU Ling-feng, GUO Dong-qin, ZHOU Nong, DU Hui-hui*

Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of Three Gorges Reservoir Area's Medicinal Herbs,
College of Life Science and Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120, China

Abstract: In order to explore the effect of different arbuscular mycorrhizal fungal inoculants on different nutrient elements of soil and *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, it provides a reference for the development of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* biological bacterial fertilizer. In this study, the pot inoculation experiment was conducted to inoculate different arbuscular mycorrhizal fungi inoculants during the *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, the contents of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and soil were determined by the Kjeldahl method, vanadium-molybdenum yellow colorimetric method, the de-boiling method with sulfuric acid and perchloric acid and atomic absorption spectrometry. The results showed that the absorption and accumulation of nutrients elements in different parts of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and soil in different growth stages after treatment with different arbuscular mycorrhizal fungal inoculants. S8 treatment could increase the content of N, P in new rhizomes and leaves (up to 6.289 g/kg) and Ca in different parts of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. The content of Ca in leaves was the highest (40.323 g/kg). The content of Mg in new rhizome was 28.142 g/kg, but the content of N, P, K and Mg in different am treatment groups did not change significantly. However, the content of Ca in soil increased in different degrees, and the effect of S8 treatment group was better, up to 125.734 g/kg. Correlation analysis showed that there was a positive correlation between N and Ca, Mg in old tuber, and be-

收稿日期:2021-02-02 接受日期:2021-07-07

基金项目:国家自然科学基金(81260622);重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0267);重庆三峡学院人才项目(20RC-12);三峡库区可持续发展研究中心开放基金(2020sxxjy05)

* 通信作者 Tel:86-015086753127; E-mail:duhuihui2010@163.com

tween Ca and Mg in the old tuber. Ca in old tuber was negatively correlated with Ca, Mg in soil. N and P, Mg in new rhizome were positively correlated with P and K, while Ca and K in soil were negatively correlated with Mg in soil. In conclusion, different AM fungal inoculants could affect the absorption and accumulation of nutrient elements in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and soil, among which S8 treatment group (*G. albida*, *G. gigantea*, *S. calospora*, *R. fulgida*, *R. intraradices*, *C. claroidium*). It can be used as an excellent strain of biological fertilizer of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*.

Key words: soil microenvironment; *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; arbuscular mycorrhizal fungi; nutrient elements absorption

作为植物生长直接基质的根际土壤为植物的生长发育提供保障,土壤中的微生物组成及酶活力影响着土壤微生态系统,对土壤理化性质、养分循环和植物生长等具有重要的影响^[1]。土壤微生物群落在调控土壤物质循环和改善土壤质量起到关键性作用^[2]。丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌可以改善土壤的营养成分,促进植物养分吸收利用,提高药用植物的产量和品质^[3,4],同时对污染土壤、盐碱土壤的生态恢复发挥积极作用^[5]。

野生滇重楼资源的枯竭,使得人工栽培和引种栽培成为滇重楼研究的主流^[6]。但因其地理位置,种植年限的差异,导致滇重楼的品质不一^[7]。据报道,接种不同 AM 真菌能够提高滇重楼薯蓣皂苷元的含量、改善土壤的理化性质、提高土壤养分和优化微生物结构^[7,8],促进滇重楼幼苗期叶片叶绿素合成,提高幼苗光合能力^[9]。Zhang 等^[10]报道滇重楼种子共生萌发时接种薄壁两性囊霉(*Ambispora leptoticha*)和崔氏原囊霉(*Archaeospora trappei*)可提高滇重楼幼苗的成活率和产量。另外,接种不同 AM 真菌可以促进滇重楼根际对土壤营养元素的吸收利用、提高滇重楼品质^[11]。Yang 等^[12]发现接种优选的混合 AM 真菌菌剂增加滇重楼根中内源激素含量比接种单株真菌的效果更好。前期研究^[13]发现不同 AM 真菌混剂能够提高根际土壤中球囊霉素含量和酶活性,改变微生物群落结构,从而改善土壤环境,也能促进滇重楼对外界不利环境的抗逆性,提高滇重楼总皂苷含量,诱导滇重楼次生代谢的变化,增加有效成分,从而提升滇重楼的药用品质。

通过接种 AM 真菌改善土壤环境和提升药材品质已成为一种趋势。土壤中营养元素含量水平受栽培土壤营养水平和植株自身习性的影响^[14]。Shen 等^[15]发现,接种不同 AM 真菌后滇重楼根茎和根际土壤中的钙、镁、钠等含量均高于未处理组,且促进根茎对元素的吸收来提高品质。Gu 等^[16]研究表明,不同 AM 真菌混合接种可增加木香对营养物质的吸收,促进代谢产物的积累,提高木香内脂的产量和入药品质。而接种不同 AM 真菌混剂后对滇重楼

和土壤微生态中营养元素影响的研究较少。基于此,本研究通过接种不同组合的 AM 真菌菌剂后,测定滇重楼不同部位以及土壤中的营养元素的含量,旨在解析不同 AM 真菌菌剂对滇重楼和土壤中营养元素的影响,以期能够最大化利用土壤的营养元素,减少资源浪费,同时为滇重楼生物菌肥的研发奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与培养

样品于 2013 年 10 月采自云南省大理白族自治州农业科学推广研究院种植基地(25°35'27.69''N, 100°18'23.17''E, 海拔 1 980 m, 年均气温 14.9 °C, 年降雨量 1 051.1 mm), 经重庆三峡学院生物与食品工程学院周浓教授鉴定为百合科重楼属滇重楼 *P. polyphylla* var. *yunnanensis*。选择大小一致且无虫害的滇重楼新鲜根茎为研究对象。12 种 AM 真菌菌剂均购自美国国际丛枝菌根真菌种质资源保藏中心(INVAM), 由重庆三峡学院微生物实验室进行扩增繁殖、储存保管。菌剂扩繁的基质使用山基土和河沙按 3:1 体积比混合制成^[11]。

栽培基质为菜园土与河沙按体积 3:1 混合,于高压灭菌锅内 121 °C 灭菌 2 h, 置于口径 15 cm, 高 18 cm 的无菌塑料容器中。采用室温盆栽的方法,于重庆市万州区铁峰山国家森林公园内试验种植基地(30°56'12.05''N, 108°22'32.89''E, 海拔 1 230 m)进行种植。分别设置丛枝菌根真菌处理组 S1 ~ S9 和对照组 CK, 每盆 3 株苗, 每组 10 个重复。不同处理组每盆接种含 4 或 6 种丛枝菌根真菌共 120 枚孢子的混合菌剂(均分), 并定期浇灌 Hoagland 营养液, 具体信息详见表 1。

1.2 样品采集与处理

分别在 4 个时期(T1:2015 年 6 月;T2:2015 年 7 月;T3:2015 年 8 月;T4:2015 年 9 月)将滇重楼植株小心取出,不伤害其根系,获得叶、茎、根茎和须根。采用 He 等^[17]方法将靠近顶芽第一茎痕处并带有顶芽的切段为新根茎,余下的部分为老根茎,置于 45 °C 烘箱中烘干至恒重,粉碎过 80 目筛,用于滇重

表 1 不同处理组及其接种丛枝菌根真菌

Table 1 Different treatment groups and inoculation of AM fungi

处理组 Treatment group	丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhizal fungi
S1	玫瑰红巨孢囊霉 (<i>Gigaspora rosea</i>)、微白巨孢囊霉 (<i>G. albida</i>)、球状巨孢囊霉 (<i>G. margarita</i>)、巨大巨孢囊霉 (<i>G. gigantea</i>)
S2	美丽盾巨孢囊霉 (<i>Scutellospora calospora</i>)、透明盾巨孢囊霉 (<i>S. pellucida</i>)、瑚状盾巨孢囊霉 (<i>Racocetra coralloidea</i>)、亮色盾巨孢囊霉 (<i>R. fulgida</i>)
S3	根内球囊霉 (<i>R. intraradices</i>)、沙荒球囊霉 (<i>Septoglomus deserticola</i>)、近明球囊霉 (<i>Claroideoglomus claroideum</i>)、明球囊霉 (<i>R. clarum</i>)
S4	玫瑰红巨孢囊霉 (<i>G. rosea</i>)、微白巨孢囊霉 (<i>G. albida</i>)、透明盾巨孢囊霉 (<i>S. pellucida</i>)、瑚状盾巨孢囊霉 (<i>R. coralloidea</i>)、近明球囊霉 (<i>C. claroideum</i>)、明球囊霉 (<i>R. clarum</i>)
S5	微白巨孢囊霉 (<i>G. albida</i>)、球状巨孢囊霉 (<i>G. margarita</i>)、瑚状盾巨孢囊霉 (<i>R. coralloidea</i>)、亮色盾巨孢囊霉 (<i>R. fulgida</i>)、根内球囊霉 (<i>R. intraradices</i>)、沙荒球囊霉 (<i>S. deserticola</i>)
S6	球状巨孢囊霉 (<i>G. margarita</i>)、巨大巨孢囊霉 (<i>G. gigantea</i>)、美丽盾巨孢囊霉 (<i>S. calospora</i>)、透明盾巨孢囊霉 (<i>S. pellucida</i>)、沙荒球囊霉 (<i>S. deserticola</i>)、近明球囊霉 (<i>C. claroideum</i>)
S7	玫瑰红巨孢囊霉 (<i>G. rosea</i>)、球状巨孢囊霉 (<i>G. margarita</i>)、透明盾巨孢囊霉 (<i>S. pellucida</i>)、亮色盾巨孢囊霉 (<i>R. fulgida</i>)、根内球囊霉 (<i>R. intraradices</i>)、明球囊霉 (<i>R. clarum</i>)
S8	微白巨孢囊霉 (<i>G. albida</i>)、巨大巨孢囊霉 (<i>G. gigantea</i>)、美丽盾巨孢囊霉 (<i>S. calospora</i>)、亮色盾巨孢囊霉 (<i>R. fulgida</i>)、根内球囊霉 (<i>R. intraradices</i>)、近明球囊霉 (<i>C. claroideum</i>)
S9	玫瑰红巨孢囊霉 (<i>G. rosea</i>)、巨大巨孢囊霉 (<i>G. gigantea</i>)、美丽盾巨孢囊霉 (<i>S. calospora</i>)、瑚状盾巨孢囊霉 (<i>R. coralloidea</i>)、沙荒球囊霉 (<i>S. deserticola</i>)、明球囊霉 (<i>R. clarum</i>)

楼元素含量测定分析。同时采集土壤样品,实验室自然风干至恒重,粉碎过 80 目筛,用于土壤相关元素含量测定分析。

1.3 仪器与试剂

TAS-990AFG 型原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司);C-MAG HP10 型数显加热板(德国 IKA 集团);DZF-6050MBE 型电热恒温真空干燥箱(上海博讯实业有限公司);钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)空心阴极灯(北京曙光电子光源仪器有限公司);ME204E 型电子分析天平(梅特勒-托利多仪器上海有限公司)。所用水为去离子水,试剂均为优级纯。

1.4 测定方法

采用凯氏定氮法^[18]测定滇重楼与土壤中的氮元素含量,采用钒钼黄比色法^[19]测定滇重楼中的磷元素含量,采用硫酸-高氯酸消煮法^[18]测定土壤中磷元素含量,采用原子吸收光谱法^[20]测定滇重楼与土壤中钾、钙、镁元素含量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据处理,使用 SPSS 25 分析软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同采收时期滇重楼中氮、磷、钾、钙、镁元素吸收和分布规律

滇重楼不同采收期其根、茎、叶中氮、磷、钾、钙、

镁含量分布规律如表 2 所示。就对照组而言,4 个时期滇重楼不同部位氮含量整体表现为先升高后下降的趋势,在 T3 时期新、老根茎氮的含量达到最大;T1 时期,S3、S4、S5、S6 和 S7 处理组滇重楼叶中氮的含量均增加,S7 新根茎氮的含量增加,S6 处理组滇重楼新根茎、老根茎和叶中氮的含量增加;S8 处理组 T1 时期新、老根茎和叶,T2 时期新根茎和叶以及 T4 时期新、老根茎中氮的含量增加。综上,S8 处理组氮含量的增加效果比较好。磷在滇重楼新根茎和叶中含量较高,其中 T4 时期 S6 处理组滇重楼的新、老根茎中磷含量最高。S8 处理组 T1 时期新根茎中磷的含量增加,达 6.289 g/kg。钾元素可以影响植物品质及根茎次生代谢产物合成积累。对钾的含量分析发现,钾含量表现为茎 > 叶 > 根茎。T4 时期 S8 处理组的老根茎中钾含量较高,为 12.715 g/kg。

不同时期处理组滇重楼钙含量大部分高于对照组,表明接种丛枝菌根真菌能有效提高滇重楼抗逆性,保证滇重楼正常生长。采收期对照组的滇重楼的钙含量表现为茎 > 叶,老根茎 > 新根茎。而处理组的钙含量新根茎 > 老根茎,表明不同处理组可促进新根茎对钙元素的蓄积。其中 S4、S6 和 S8 处理组 T1 时期叶的钙含量增加,S6 处理组 T1 时期新根茎的钙含量、T3 时期茎和叶的钙含量增加,S8 处理组 T1 和 T3 时期茎和叶以及 T4 时期新、老根茎的钙

含量增加,推测 S8 处理组可以促进滇重楼对钙的吸收,增加植物的抗逆性。对镁含量进行测定分析发现,相较于对照组,不同处理组滇重楼镁的含量不同程度发生改变。其中,T1、T4 时期 S6 组的老根茎中镁含量较高,T3 时期新根茎含量较高。S8 处理组在 T1、T2 和 T4 时期新根茎的镁的含量较高,最高可达 28.142 g/kg。因此,不同 AM 真菌混合后可不同程度上促进氮、磷、钾、钙、镁的吸收及在根茎中的蓄积。

2.2 不同采收时期土壤中营养元素含量分析

通过凯氏定氮法、硫酸-高氯酸消煮法和原子吸收光谱法测定接种不同 AM 真菌菌剂后土壤中的氮、磷、钾、钙、镁 5 种元素的含量。由表 3 可知,不同处理组土壤中的氮、磷、钾、钙、镁 5 种元素的含量与对照组存在显著差异。在 T1、T3 和 T4 时期,S8 处理组的土壤中钙的含量明显比对照组高,且 T1 时期滇重楼不同部位的钙含量,T3 时期滇重楼茎和叶中,T4 时期滇重楼新根茎中钙的含量都明显升高。表明土壤中的钙含量的升高有利于植物各个部位钙的蓄积及转移。S6 处理组在 T2 和 T4 时期钙的含量最高,均大于 141.000 g/kg。不同处理组土壤中的氮、磷、钾和镁元素的变化量不大,而 S6、S8 处理组滇重楼的新根茎、老根茎和叶中氮的含量显著升高,S7 处理组的新根茎和叶的氮含量也明显增多,最高可达 4.799 g/kg,T1 时期 S8 和 S1 处理组滇重楼的新根茎的磷含量比其他处理组高,最高可达到 6.289 g/kg,推测不同 AM 真菌可以促进滇重楼对氮元素的吸收和蓄积。

2.3 滇重楼与土壤元素相关性分析

为了分析滇重楼不同部位与栽培土壤中营养元素的关系,通过相关性分析发现,滇重楼老根茎与土壤中的营养元素有不同程度的相关性。老根茎中的氮与老根茎中钙和镁存在极显著正相关($r = 0.516$ 、 0.680 , $P < 0.01$),老根茎中的钙与镁的含量呈显著

正相关($r = 0.337$, $P < 0.05$),老根茎中的钙与土壤中的钙呈显著负相关($r = -0.315$, $P < 0.05$),与土壤中的镁存在极显著负相关($r = -0.469$, $P < 0.01$),土壤中的钙与土壤中的钾存在显著负相关($r = -0.312$, $P < 0.05$),土壤中的镁和钙存在极显著正相关($r = 0.455$, $P < 0.01$),结果见表 4。滇重楼新根茎与土壤中 5 种元素的相关性为:新根茎中的氮和磷呈极显著正相关($r = 0.407$, $P < 0.01$),新根茎中的镁和新根茎中的磷与钾呈极显著正相关($r = 0.500$ 、 0.421 , $P < 0.01$),土壤中的钙和钾呈显著负相关($r = -0.312$, $P < 0.05$),土壤中的钙和镁呈极显著正相关($r = 0.455$, $P < 0.01$)(见表 5)。表 6 展示了滇重楼叶与土壤中 5 种元素存在一定的相关性:叶中的氮和钙呈显著正相关($r = 0.407$, $P < 0.05$),叶中的钾与镁呈极显著正相关($r = 0.587$, $P < 0.01$),土壤中的钙与叶中的磷呈显著正相关($r = 0.365$, $P < 0.05$),与叶中的钾呈显著负相关($r = -0.362$, $P < 0.05$),土壤中的钙与土壤中的钾呈显著负相关($r = -0.438$, $P < 0.05$),与土壤中的镁呈显著正相关($r = 0.46$, $P < 0.05$)。

由表 7 可知,滇重楼茎与土壤中 5 种元素存在的相关性表现为:滇重楼茎中钾与钙存在显著正相关($r = 0.453$, $P < 0.05$),滇重楼茎中的钾与土壤中的磷呈显著负相关($r = -0.384$, $P < 0.05$),土壤中的钾和钙呈显著负相关($r = -0.438$, $P < 0.05$),土壤中的镁与滇重楼茎中的镁呈显著负相关($r = -0.403$, $P < 0.05$),与土壤中的钙呈显著正相关($r = 0.446$, $P < 0.05$)。茎中钾含量与钙含量呈正相关,可能与钾具有使茎干坚韧,增强植株抗机械损伤、抗虫害能力有关。在采收期,S3、S6、S8 处理组的土壤中的钙含量较高,可以为滇重楼生长提供较多的钙,从而提高滇重楼的抗逆性,且叶中的钙含量与氮含量具有正相关性。

表 2 接种丛枝菌根真菌对滇重楼 5 种元素吸收的影响

Table 2 Contents of five elements in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* inoculated with AM fungi at different times(g/kg)

元素 Element	No.	T1				T2				T3				T4	
		新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber	叶 Leaf	茎 Stalk	新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber	叶 Leaf	茎 Stalk	新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber	叶 Leaf	茎 Stalk	新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber
N	S1	1.631 ^e	1.974 ^d	1.806 ^b	1.625 ^b	1.472 ^c	2.973 ^a	2.807 ^b	1.408 ^a	0.997 ^e	1.414 ^{cde}	2.434 ^b	0.916 ^c	1.887 ^a	2.051 ^{ab}
	S2	1.139 ^f	1.907 ^{de}	0.230 ⁱ	1.454 ^c	1.548 ^{bc}	1.499 ^e	2.224 ^f	1.211 ^b	1.016 ^e	1.786 ^{bed}	0.760 ^h	1.403 ^b	1.865 ^a	1.820 ^{de}
	S3	1.518 ^e	1.663 ^f	3.898 ^b	1.274 ^g	1.032 ^e	1.489 ^e	2.397 ^d	0.726 ^{de}	3.196 ^a	2.063 ^{bc}	0.859 ^g	0.576 ^f	1.693 ^b	2.063 ^{ab}
	S4	1.364 ^e	1.838 ^{def}	4.006 ^a	1.414 ^d	1.713 ^b	1.379 ^e	1.988 ^g	1.106 ^{bc}	0.963 ^e	2.113 ^{bc}	2.170 ^d	0.644 ^e	1.788 ^{ab}	1.855 ^{cd}

续表 2 (Continued Tab. 2)

元素 Element	No.	T1				T2				T3				T4	
		新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber	叶 Leaf	茎 Stalk	新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber	叶 Leaf	茎 Stalk	新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber	叶 Leaf	茎 Stalk	新根茎 New tuber	老根茎 Old tuber
	S3	5.723 ^c	2.228 ^e	9.933 ^b	3.123 ^g	2.712 ^g	6.739 ^b	3.249 ^c	1.671 ^h	1.883 ^f	1.884 ^d	15.325 ^a	3.820 ^b	2.130 ^f	1.456 ^g
	S4	15.161 ^c	3.196 ^d	7.228 ^{de}	5.221 ^d	1.300 ^j	3.725 ^d	4.956 ^b	1.931 ^{gh}	5.540 ^c	1.441 ^e	3.651 ^h	3.092 ^d	2.193 ^f	1.191 ^h
	S5	16.033 ^b	2.142 ^e	6.967 ^{ef}	8.087 ^c	1.952 ⁱ	1.517 ^f	3.842 ^d	1.977 ^g	2.428 ^c	1.782 ^d	7.157 ^d	2.301 ^g	4.359 ^b	1.375 ^g
	S6	1.595 ^h	58.269 ^a	7.265 ^{de}	4.079 ^e	5.662 ^c	1.447 ^f	4.975 ^b	4.567 ^c	16.900 ^a	2.323 ^c	5.305 ^{ef}	2.354 ^g	1.897 ^g	4.330 ^a
	S7	1.196 ⁱ	2.341 ^e	8.621 ^c	2.723 ^h	9.364 ^b	14.056 ^a	4.103 ^c	2.605 ^f	7.747 ^b	4.586 ^b	3.549 ^h	4.147 ^a	2.707 ^d	2.652 ^c
	S8	28.142 ^a	2.914 ^d	6.745 ^f	15.488 ^a	16.647 ^a	1.402 ^f	4.098 ^c	1.967 ^g	4.117 ^d	1.429 ^e	5.046 ^f	2.773 ^c	8.059 ^a	1.927 ^f
	S9	2.746 ^f	1.726 ^f	16.515 ^a	13.561 ^b	3.601 ^e	4.006 ^c	3.311 ^e	7.407 ^b	1.542 ^g	2.270 ^e	7.768 ^c	2.248 ^g	2.496 ^e	1.448 ^g
	CK	1.696 ^h	9.089 ^c	5.343 ^g	4.351 ^e	2.243 ^h	2.189 ^e	2.935 ^f	10.730 ^a	1.547 ^g	57.864 ^b	5.365 ^e	2.611 ^f	1.532 ^h	2.107 ^e

注: 同列不同小写字母代表存在显著差异, $P < 0.05$ 。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences, $P < 0.05$.

表 3 接种丛枝菌根真菌不同时间土壤中五种元素含量

Table 3 Contents of five elements in soils inoculated with AM fungi at different times (g/kg)

No.	T1					T2				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
S1	1.726 ^{bc}	0.225 ^{cde}	28.571 ^{ab}	41.280 ^d	58.392 ^b	1.487 ^d	0.212 ^d	37.321 ^{bc}	44.727 ^{cd}	25.037 ^{bc}
S2	1.776 ^{ab}	0.238 ^{ab}	28.626 ^{ab}	54.512 ^{bcd}	68.337 ^a	1.946 ^a	0.252 ^c	34.132 ^{cd}	57.373 ^c	35.185 ^{ab}
S3	1.617 ^{de}	0.215 ^{ef}	26.389 ^{ab}	49.127 ^{cd}	41.381 ^c	1.753 ^b	0.253 ^c	34.237 ^{cd}	123.729 ^{ab}	43.146 ^a
S4	1.691 ^{cd}	0.206 ^f	28.215 ^{ab}	74.102 ^{bcd}	36.231 ^d	1.631 ^c	0.288 ^b	41.038 ^a	6.543 ^d	19.021 ^c
S5	1.839 ^a	0.226 ^{bcd}	32.471 ^{ab}	90.488 ^{bcd}	55.731 ^b	1.618 ^c	0.213 ^d	32.519 ^d	84.742 ^{bc}	23.555 ^{bc}
S6	1.702 ^{bc}	0.244 ^a	26.963 ^{ab}	104.692 ^{ab}	57.474 ^b	1.635 ^c	0.212 ^d	36.276 ^{bc}	141.657 ^a	47.462 ^a
S7	1.274 ^f	0.236 ^{abc}	13.463 ^b	150.608 ^a	57.663 ^b	1.654 ^c	0.203 ^e	33.713 ^{cd}	76.701 ^c	34.786 ^{ab}
S8	1.557 ^e	0.222 ^{de}	32.814 ^{ab}	99.145 ^{abc}	12.464 ^e	1.507 ^d	0.213 ^d	34.976 ^{cd}	55.283 ^c	47.281 ^a
S9	1.765 ^{abc}	0.229 ^{bcd}	33.563 ^{ab}	52.244 ^{bcd}	8.775 ^e	1.633 ^c	0.334 ^a	38.105 ^b	45.263 ^{cd}	25.037 ^{bc}
CK	1.716 ^{bc}	0.187 ^g	41.397 ^a	82.666 ^{bcd}	55.280 ^b	1.935 ^a	0.210 ^d	31.907 ^e	53.512 ^c	35.185 ^{ab}

No.	T3					T4				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
S1	1.434 ^d	0.204 ^e	28.996 ^{cd}	79.844 ^{ab}	34.760 ^c	1.420 ^d	0.200 ^{bc}	29.703 ^{de}	13.737 ^e	35.636 ^c
S2	1.592 ^c	0.239 ^a	25.976 ^e	92.771 ^{ab}	58.033 ^{ab}	1.580 ^c	0.162 ^{ef}	42.513 ^a	38.600 ^{de}	39.968 ^{de}
S3	1.530 ^c	0.245 ^a	31.427 ^{bc}	76.289 ^{ab}	61.730 ^{ab}	1.440 ^d	0.168 ^e	35.374 ^{bcd}	105.029 ^{abc}	58.929 ^{bc}
S4	1.530 ^c	0.215 ^c	30.150 ^{bc}	127.309 ^a	63.657 ^a	1.368 ^d	0.323 ^a	36.139 ^{bc}	97.958 ^{abc}	62.968 ^{ab}
S5	1.385 ^d	0.220 ^{bc}	30.875 ^{cd}	117.157 ^a	55.916 ^{ab}	1.665 ^b	0.160 ^f	27.199 ^e	83.848 ^{bcd}	65.034 ^a
S6	1.433 ^d	0.208 ^e	36.777 ^a	26.276 ^b	60.358 ^{ab}	0.919 ^e	0.203 ^b	31.957 ^{ede}	141.057 ^a	57.714 ^c
S7	1.372 ^d	0.204 ^c	29.052 ^{cd}	148.520 ^a	63.962 ^a	1.751 ^a	0.099 ^g	35.005 ^{cd}	45.153 ^{de}	59.363 ^{bc}
S8	5.513 ^a	0.217 ^e	31.404 ^{bc}	124.340 ^a	19.931 ^d	0.808 ^f	0.196 ^c	41.278 ^{ab}	125.734 ^{ab}	43.659 ^d
S9	1.569 ^c	0.237 ^{ab}	36.717 ^a	81.798 ^{ab}	34.760 ^c	0.967 ^e	0.177 ^d	34.707 ^{cd}	72.539 ^{cd}	35.636 ^e
CK	1.848 ^b	0.245 ^d	32.767 ^{bc}	25.855 ^b	58.033 ^{ab}	1.420 ^d	0.165 ^{ef}	33.891 ^{cd}	57.146 ^{cde}	39.968 ^{de}

注: 同列不同小写字母代表存在显著差异, $P < 0.05$ 。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences, $P < 0.05$.

表4 不同丛枝菌根真菌处理滇重楼老根茎元素与土壤元素相关性分析

Table 4 The correlation analysis of the old tuber elements and soil elements treated of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

指标 Index	老根茎 N Old tuber N	老根茎 P Old tuber P	老根茎 K Old tuber K	老根茎 Ca Old tuber Ca	老根茎 Mg Old tuber Mg	土壤 N Soil N	土壤 P Soil P	土壤 K Soil K	土壤 Ca Soil Ca	土壤 Mg Soil Mg
老根茎 N Old tuber N	-									
老根茎 P Old tuber P	0.304	-								
老根茎 K Old tuber K	0.134	0.099	-							
老根茎 Ca Old tuber Ca	0.516**	0.292	-0.207	-						
老根茎 Mg Old tuber Mg	0.680**	0.077	0.222	0.337*	-					
土壤 N Soil N	0.134	0.186	0.053	0.094	0.037	-				
土壤 P Soil P	0.095	-0.063	0.034	0.216	0.154	0.053	-			
土壤 K Soil K	-0.018	-0.042	0.009	0.185	-0.126	-0.051	-0.015	-		
土壤 Ca Soil Ca	-0.090	0.137	-0.090	-0.315*	-0.114	0.036	-0.021	-0.312*	-	
土壤 Mg Soil Mg	-0.304	-0.039	-0.121	-0.469**	-0.107	0.074	-0.232	-0.245	0.455**	-

注: * 显著相关 ($P < 0.05$), ** 极显著相关 ($P < 0.01$), 下同。Note: * Significant correlation ($P < 0.05$), ** Extremely significant correlation ($P < 0.01$), the same below.

表5 不同丛枝菌根真菌处理滇重楼新根茎元素与土壤元素相关性分析

Table 5 The correlation analysis of the new tuber elements and soil elements treated of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

指标 Index	新根茎 N New tuber N	新根茎 P New tuber P	新根茎 K New tuber K	新根茎 Ca New tuber Ca	新根茎 Mg New tuber Mg	土壤 N Soil N	土壤 P Soil P	土壤 K Soil K	土壤 Ca Soil Ca	土壤 Mg Soil Mg
新根茎 N New tuber N	-									
新根茎 P New tuber P	0.407**	-								
新根茎 K New tuber K	0.003	-0.010	-							
新根茎 Ca New tuber Ca	0.260	0.200	0.199	-						
新根茎 Mg New tuber Mg	0.292	0.500**	0.421**	0.270	-					
土壤 N Soil N	0.043	-0.032	-0.109	-0.094	-0.024	-				
土壤 P Soil P	0.229	0.014	-0.057	0.063	-0.066	0.053	-			
土壤 K Soil K	-0.299	-0.071	0.189	-0.150	0.046	-0.051	-0.015	-		
土壤 Ca Soil Ca	0.034	0.021	-0.287	-0.053	-0.027	0.036	-0.021	-0.312*	-	
土壤 Mg Soil Mg	-0.209	-0.201	0.070	-0.019	-0.164	0.074	-0.232	-0.245	0.455**	-

表 6 不同丛枝菌根真菌处理滇重楼叶中元素与土壤元素相关性分析

Table 6 The correlation analysis of leaf elements and soil elements of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

指标 Index	叶 N Leaf N	叶 P Leaf P	叶 K Leaf K	叶 Ca Leaf Ca	叶 Mg Leaf Mg	土壤 N Soil N	土壤 P Soil P	土壤 K Soil K	土壤 Ca Soil Ca	土壤 Mg Soil Mg
叶 N Leaf N	-									
叶 P Leaf P	0.075	-								
叶 K Leaf K	-0.210	-0.186	-							
叶 Ca Leaf Ca	0.407 *	-0.117	0.104	-						
叶 Mg Leaf Mg	0.051	-0.241	0.587 **	0.130	-					
土壤 N Soil N	-0.224	0.104	0.048	0.020	-0.103	-				
土壤 P Soil P	-0.101	-0.150	0.116	-0.190	-0.050	-0.035	-			
土壤 K Soil K	-0.148	-0.031	0.047	-0.226	-0.242	0.043	0.144	-		
土壤 Ca Soil Ca	0.113	0.365 *	-0.362 *	0.209	-0.095	0.132	-0.282	-0.438 *	-	
土壤 Mg Soil Mg	-0.209	0.121	0.098	0.100	-0.081	0.180	-0.265	-0.357	0.446 *	-

表 7 不同丛枝菌根真菌处理滇重楼茎中元素与土壤元素相关性分析

Table 7 The correlation analysis of stem elements and soil elements of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

指标 Index	茎 N Stalk N	茎 P Stalk P	茎 K Stalk K	茎 Ca Stalk Ca	茎 Mg Stalk Mg	土壤 N Soil N	土壤 P Soil P	土壤 K Soil K	土壤 Ca Soil Ca	土壤 Mg Soil Mg
茎 N Stalk N	-									
茎 P Stalk P	0.123	-								
茎 K Stalk K	0.300	-0.065	-							
茎 Ca Stalk Ca	0.012	0.275	0.453 *	-						
茎 Mg Stalk Mg	0.045	-0.058	0.263	0.188	-					
土壤 N Soil N	-0.183	-0.127	-0.068	0.036	-0.029	-				
土壤 P Soil P	-0.142	-0.005	-0.384 *	-0.198	0.018	-0.035	-			
土壤 K Soil K	-0.060	-0.190	0.046	0.039	0.064	0.043	0.144	-		
土壤 Ca Soil Ca	0.046	0.132	-0.130	0.280	-0.055	0.132	-0.282	-0.438 *	-	
土壤 Mg Soil Mg	0.018	0.288	-0.209	-0.125	-0.403 *	0.180	-0.265	-0.357	0.446 *	-

3 讨论与结论

接种不同 AM 真菌菌剂处理能够不同程度的影

响滇重楼及栽培土壤中营养元素的吸收及蓄积。氮、磷、钾是植物生长发育所必需的元素,其体内含

量分布能反映植物对元素的分配及相互作用的关系^[21]。接种不同组合 AM 真菌菌剂后,不同元素的含量在不同生长期呈现动态变化过程,其中 S8 处理组 T1 时期新、老根茎和叶,T2 时期新根茎和叶以及 T4 时期新、老根茎中氮的含量增加;S8 处理组 T1 时期新根茎中磷的含量增加(最高为 6.289 g/kg),推测 S8 处理组的 AM 真菌可以促进滇重楼吸收土壤中的氮、磷元素来提升产量及品质。与 Li 等^[22]研究一致,增施氮肥和磷肥可增加滇重楼的产量和皂苷含量。S8 处理组 T4 时期老根茎中钾含量较高,为 12.715 g/kg;而且 Wang 等^[23]报道土壤中的钾有利于滇重楼根茎中总皂苷和多糖的合成与积累,对其影响可能是通过滇重楼不同部位含钾量来实现。S8 处理组 T1 和 T3 时期茎和叶以及 T4 时期新、老根茎的钙含量增加;T1、T2 和 T4 时期新根茎的镁的含量增加(最高为 28.142 g/kg)。钙不仅是植物细胞壁和细胞膜等结构的重要组成,还能够有效缓解各种生物和非生物胁迫对植物的威胁,提高植物抗逆性,对生长发育、成熟及衰老起着重要作用^[24]。

药用植物的品质可以间接反映土壤质量和肥力,根际土壤微生态的变化也会影响药用植物的质量。AM 真菌等微生物的含量能够引起土壤基质环境的变化,对微生物群落组成结构产生重要影响^[25]。本研究发现,除 S6、S8 处理组滇重楼的新根茎、老根茎和叶中氮的含量显著升高,S8 和 S1 处理组滇重楼的新根茎的磷含量比其他处理组高(最高可达到 6.289 g/kg)之外,不同处理组土壤中的氮、磷、钾和镁元素的变化量不大。不同处理组土壤中的钙含量有显著性增多,尤其 S8 处理组的土壤中钙的含量明显比对照组高。因此,接种不同丛枝菌根真菌混合菌剂能有效改变滇重楼药材不同部位氮、磷、钾、钙、镁含量,促进滇重楼对营养元素的吸收。同时也可改变土壤中营养元素的释放,这与 AM 真菌菌根对营养物质竞争的优势作用研究相一致^[26]。

相关性分析表明,滇重楼老根茎中 N 的吸收与 Ca、Mg 的吸收,新根茎中 N 的吸收与 P、Mg 的吸收,P 的吸收与 K 的吸收,叶中的 N 的吸收和茎中 K 的吸收与 Ca 的吸收呈显著协同作用,老根茎中 Ca 的吸收与土壤中 Ca、Mg 的吸收呈显著负相关作用,茎中的 K 的吸收与土壤中 P 的吸收,茎中 Mg 的吸收与土壤中 Mg 的吸收呈负相关作用。与 Zhang 等^[11]推测的多种营养元素在滇重楼生长过程中的积累可

能存在竞争或协同两种效应相一致。滇重楼的老根茎中氮、钙和镁的吸收三者之间具有协同作用,滇重楼叶中磷的含量随土壤中钙含量的增加而增加,而钙和磷之间存在复杂的交互作用且具有物种特异性,高钙可增加豆科植物对磷的吸收但抑制小麦、番茄等对磷的吸收^[27,28]。

综上所述,S8 处理组的 6 种 AM 真菌:微白巨孢囊霉(*G. albida*)、巨大巨孢囊霉(*G. gigantea*)、美丽盾巨孢囊霉(*S. calospora*)、亮色盾巨孢囊霉(*R. fulgida*)、根内球囊霉(*R. intraradices*)、近明球囊霉(*C. claroideum*)作为滇重楼生物菌肥的优良菌种,为生物菌肥的研发奠定基础。本研究结果显示 9 种不同 AM 真菌菌剂的组合可以不同程度的影响营养元素的含量转移及蓄积,但是要想筛选最优的混合菌剂还需要进一步的实验验证其接种的比例及发酵液的成分等,以期为滇重楼的生物菌肥的研发和应用奠定理论基础,以利于改变滇重楼营养元素的吸收与蓄积,提升滇重楼的品质。

参考文献

- 1 Liu Y, Guo KY, Zhao YZ, et al. Change in composition and function of microbial communities in an acid bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil with the addition of three different biochars[J]. For Ecol Manag, 2020, 473:118336.
- 2 Zhang ZC, Yang JY, Hao BH, et al. Potential of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar, and combined amendment on sandy soil improvement driven by microbial community[J]. Environ Sci (环境科学), 2021, 42:2066-2079.
- 3 Chen ML, Guo LP, Yang G, et al. Discussion on appraisal methods and key technologies of arbuscular mycorrhizal fungi and medicinal plant symbiosis system[J]. Chin J Chin Mater Med (中国中药杂志), 2011, 36:3051-3056.
- 4 Xiao WJ, Yang G, Chen ML, et al. AM and its application in plant disease prevention of Chinese medicinal herbs cultivation[J]. Chin J Chin Mater Med (中国中药杂志), 2011, 36:252-257.
- 5 Li S, Bi YL, Kong W, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on ecological restoration in coal mining areas[J]. Russ J Ecol, 2015, 46:431-437.
- 6 Wang Q, Zhang HJ, Yang M, et al. Effects of 28 species of AM fungi on diosgenin contents in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*[J]. J Dali Univ (大理大学学报), 2018, 3(10): 22-25.
- 7 Gu WC, Zhang J, Zhou N, et al. Effect of different arbuscular mycorrhizal fungi combinations and inoculation periods on

- rhizosphere soil physicochemical properties and microbial quantity of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings[J]. Chin J Exp Tradit Med Form(中国实验方剂学杂志), 2020, 26(22):116-130.
- 8 Zhu FR, Zhou N, Yang M, et al. Effect of different arbuscular mycorrhizal fungi on soil nutrients in rhizosphere soil of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings[J]. Chin J Exp Tradit Med Form(中国实验方剂学杂志), 2020, 26(22):86-95.
- 9 Shen YX, Chen CR, Zhang XM, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on seedlings growth and photosynthetic characteristics of *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* [J]. Crops(作物杂志), 2020(4):170-177.
- 10 Zhang H, Du HH, Guo DQ, et al. Effects of inoculation with different AM fungi on functional gene expression in seedlings of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发), 2019, 31:318-324.
- 11 Zhang HZ, Li Y, Zhang YR, et al. Absorption and accumulation of mineral elements by *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* with different arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Environ Chem(环境化学), 2019, 38:615-625.
- 12 Yang L, Yang M, Guo DQ, et al. Effect of inoculation time of arbuscular mycorrhizal fungi on endogenous hormone content in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings[J]. Chin Tradit Herb Drugs(中草药), 2020, 51:3535-3544.
- 13 Zhou Y, Yang M, Guo DQ, et al. Effect of different exogenous arbuscular mycorrhizal fungi combinations on rhizosphere soil environment of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Chin J Exp Tradit Med Form(中国实验方剂学杂志), 2020, 26(22):96-109.
- 14 Pan XJ, Zhang J, Huang XR, et al. Growth and photosynthetic characteristics of *Aucklandia lappa* influenced by AM fungi [J]. J Chin Med Mater(中药材), 2016, 39:2178-2184.
- 15 Shen L, Wang Q, Zhang HJ, et al. Effects of symbiosis on nutrient absorption between arbuscular mycorrhizal fungi and seedlings of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. J Chin Med Mater(中药材), 2020, 43:1837-1843.
- 16 Gu WC, Yang WW, Zhang J, et al. Effect of mixed inoculation of arbuscular mycorrhizal on growth and chemical composition of *Aucklandia lappa* seedlings [J]. Chin J Exp Tradit Med Form(中国实验方剂学杂志), 2020, 26(14):173-181.
- 17 He ZJ, Zeng B, Liang SW. Effects of different Zn levels on growth, nutrient content and total saponin contents of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Southwest China J Agr Sci(西南农业学报), 2012, 25:665-669.
- 18 Bao SD. Soil Agrochemical Analysis(土壤农化分析) [M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000:73-76.
- 19 Lu C. Comparative study on two methods for determination of total phosphorus in wetland plants[J]. Acta Agr Jiangxi(江西农业学报), 2009, 21(8):142-144.
- 20 Liu YM, Wang H, Han JT, et al. Determination of trace elements in Chinese patent medicine by atomic absorption spectrometry[J]. Spectrosc Spect Anal(光谱学与光谱分析), 2005, 26:1510-1513.
- 21 Sun XJ, Chang SL, Song CC, et al. Age-related N, P, and K stoichiometry in different organs of *Picea schrenkiana* [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 2018, 37:1291-1298.
- 22 Li JL, Xiong JF, Zhang HT, et al. Effects of NPK fertilizer on yield and total saponin contents in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. J Yunnan Agr Univ:Nat Sci(云南农业大学学报:自科版), 2016, 31:895-901.
- 23 Wang Y, He ZJ, Duan YT, et al. Study on relationship between content of effective components in rhizome of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* and potash status in rhizosphere soil [J]. Southwest China J Agr Sci(西南农业学报), 2012, 25:950-953.
- 24 Chen DW, Tang YH, Shi WB, et al. Progress in the regulation of calcium growth and development [J]. Mol Plant Breed(分子植物育种), 2019, 17:3593-3601.
- 25 Zhu XM, Chen BL, Zhu LZ, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation; a review [J]. Environ Pollut, 2017, 227:98-115.
- 26 Richard J, Manuela P, Antonella S, et al. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition-current knowledge and future directions [J]. Front Plant Sci, 2017, 8:1-19.
- 27 Ding WL, Clode PL, Clements JC, et al. Effects of calcium and its interaction with phosphorus on the nutrient status and growth of three *lupinus* species [J]. Physiol Plant, 2018, 163:386-398.
- 28 Suo YY, Zhang X, Si XZ, et al. Effects of phosphorus and calcium application on the growth, yield and phosphorus and calcium efficiency of peanut [J]. Crops(作物杂志), 2021(1):187-192.