

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017081405

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 Min, ZHANG Jie, SHEN Yuxiang, 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]. Environmental Chemistry, 2018, 37(4): 860-870.

滇重楼与丛枝菌根的共生对重金属元素吸收的影响^{*}

杨 敏¹ 张 杰² 沈昱翔³ 母茂君¹ 王 骞¹ 周芯竹² 周 浓^{1,2**}

(1. 大理大学药学与化学学院, 大理, 671000; 2. 重庆三峡学院生物与食品工程学院, 重庆, 404000;
3. 安顺学院农学院, 安顺, 561000)

摘 要 通过室温盆栽接种试验, 研究在灭菌土壤中, 不同丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌处理对滇重楼生长过程中根际土壤和药材中 5 种重金属(Cd、Hg、As、Cu、Pb)吸收累积的影响。结果表明, 与对照组(CK 组)相比, 人工栽培条件下接种 28 种不同 AM 真菌, 滇重楼根际土壤及其对应药材中 5 种重金属残留量差异显著, 不同重金属在滇重楼生长不同时期含量变化的差异较大, 具体影响效果不同。除 Spe、Asc、Asp 处理组果熟期的根际土壤 Cd 元素含量超标外, 其余处理组根际土壤及其对应药材均低于国家限量标准。同时, 28 种 AM 真菌对滇重楼根茎 5 种重金属元素的富集能力存在显著差异, 滇重楼对 Cd、Hg、As、Cu 具有较强的生物积累作用, 但均显著低于超富集植物的临界含量标准(1000 mg·kg⁻¹)。对不同 AM 真菌处理组滇重楼栽培土壤重金属残留量进行风险评估及分级发现, 土壤尚处于“无污染”状态, 但有个别处理组的 Cd 已接近轻微污染。实验结果表明, 人工接种 AM 真菌能保证滇重楼根茎重金属残留量在安全范围内, 为推动滇重楼绿色种植建设开辟一条新的途径, 但在大田栽培时应根据实际情况, 选择合适的 AM 真菌菌株与滇重楼进行共生栽培, 应重视滇重楼自身特性对重金属吸收和累积的影响。

关键词 滇重楼, 丛枝菌根真菌, 土壤, 重金属, 污染。

Effects of symbiosis of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* with arbuscular mycorrhizal fungi on absorption of heavy metals (Cd, Hg, As, Cu, Pb)

YANG Min¹ ZHANG Jie² SHEN Yuxiang³ MU Maojun¹ WANG Qian¹
ZHOU Xinzhu² ZHOU Nong^{1,2**}

(1. College of Pharmacy and Chemistry, Dali University, Dali, 671000, China; 2. College of Life Science and Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing, 404000, China; 3. College of Agriculture, Anshun University, Anshun, 561000, China)

Abstract: Through potted inoculation test in sterile soil at room temperature, the effects on the adsorption and accumulation of 5 heavy metals (Cd, Hg, As, Cu, Pb) in the rhizosphere soil and *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* were investigated after different arbuscular mycorrhizal (AM) fungi were injected. The results showed that there were significant differences in the residues of the

2017 年 8 月 14 日收稿(Received: August 14, 2017).

^{*} 国家自然科学基金(81260622), 云南省应用基础研究计划(2014FD046), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601007)和贵州省科学技术基金(黔科合 LH 字[2017]7054 号)资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (81260622), Yunnan Applied Basic Research Projects (2014FD046), Science and Technology Research Projects of Chongqing Municipal Commission of Education (KJ1601007) and Science and Technology Foundation of Guizhou (LH[2017]7054).

^{**} 通讯联系人, Tel: 13896357862, E-mail: erhaizn@126.com

Corresponding author, Tel: 13896357862, E-mail: erhaizn@126.com

5 heavy metals in the rhizosphere soil and its corresponding host after 28 AM fungi were injected under artificial cultivation condition compared with the control group (CK group). The heavy metals contents varied significantly in different periods of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* growth, but the effects were different. The metal contents in the rhizosphere soil and its corresponding host in the other AM fungi groups were below the national standard limit. Except for the Cd contents in rhizosphere soil of the AM fungi groups (Spe, Asc, Asp) during the fructescence. Meanwhile, 28 AM fungi showed significant differences in collection capacity of 5 heavy metals on *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* rhizome, a higher bioaccumulation of Cd, Hg, As, Cu was found in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, however, these values were still significantly lower than the threshold concentrations for hyperaccumulators ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). According to the risk assessment and classification of the residues of heavy metals, the soil of all AM fungi groups was still at pollution-free level, but Cd contents of some AM fungi groups were close to micro-pollution level. The experimental results showed that inoculation of AM fungi could help residues of heavy metals in the *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* rhizome in a safe range and provide a new way to green agriculture, but it should choose the suitable AM fungi species for cultivating *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* under field condition according to the actual situation, considering the effects of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* on absorption and accumulation of heavy metals is also important.

Keywords: *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, arbuscular mycorrhizal fungi, soil, heavy metal, pollution.

滇重楼(*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*)为延龄草科重楼属植物^[1],具有清热解毒、消肿止痛、凉肝定惊之功效,为临床常用清热解毒药^[2].近年来,云南、贵州、重庆等地滇重楼栽培面积不断增加以供应市场需求,缓解市场的供需矛盾,然而不规范种植技术及含重金属的农药化肥的不合理使用,使得滇重楼生长地的土壤环境日益恶化,造成滇重楼产量和品质下降^[1, 3-5].因此,通过农业生物技术途径来提高滇重楼产量和品质已成为国内研究滇重楼规范化栽培体系的热点领域.

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi),简称 AMF 或 AM 真菌,是一类新型的微生物肥料,广泛存在的一类土壤有益微生物,能与绝大部分植物根系形成互惠共生体^[6].前期研究表明,滇重楼是典型的丛枝菌根植物,AM 真菌能改善滇重楼植株的光合特性与生理生化指标、提高其根茎的化学品质等^[7-9].菌根真菌对药用植物适应性和陆地生态系统的可持续性的贡献,是通过促进紧密的双向养分循环、传递,即菌根植物把植株叶片的碳水化合物输送到 AM 真菌体中,从而把大量的有机碳输入到栽培土壤中去,同时把土壤中的矿质营养元素(重金属)输入到植株组织中^[10-11].例如,陈保冬等^[12]观察到菌根植物玉米根系对 Cd 的吸附能力较强;李霞等^[13]认为接种 AM 真菌降低了翅荚木体内 Fe、Cu、Zn 和 Pd 浓度,同时增加了 Fe、Cu、Zn 和 Pd 累积量;李明亮等^[14]认为接种 AM 真菌可通过改变花生根系的形态结构来吸附固持 Cd,从而降低花生植株地上部分 Cd 含量.但是目前为止,关于 AM 真菌对滇重楼药材中重金属残留状况鲜见报道^[15].而且,接种不同 AM 真菌对药用植物吸收累积重金属的影响往往不同,不同 AM 真菌对不同重金属元素表现出吸附特异性,因而从临床用药的安全性角度考虑,有必要比较研究不同 AM 菌株对滇重楼药材及其根际土壤重金属残留量的影响.

随着中药产业的发展,中药材中的重金属超标问题已成为中药国际化过程的重要障碍,中药材的安全性问题日益受到国内外的普遍关注^[16].重金属污染日益严重使得中药中重金属残留量持续增高,从而直接影响患者临床用药的安全和疗效,而中药材的重金属污染问题,常具有一定的隐蔽性,土壤中的重金属经药用植物吸收后通过食物链进入人体,进而危害人体健康^[13, 17].因此,开展中药材及其土壤中重金属元素的相关性分析和中药材对重金属元素的吸收累积特征研究,对于从源头上控制中药材中重金属残留量具有十分重要的指导意义,弄清楚滇重楼与 AM 真菌共生对吸收累积重金属残留量所产生的影响是非常有必要的.本实验在室温盆栽条件下研究了接种不同 AM 真菌对滇重楼药材与其根际土壤中重金属残留量的影响,保证市售滇重楼药材的重金属残留量与药材质量安全性,以便于 AMF 在滇重楼生产上的大面积应用.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 供试材料与培养

Gigaspora albida (Ga)、*G. decipiens* (Gd)、*G. gigantea* (Gg)、*G. margarita* (Gm)、*G. rosea* (Gr)、*Scutellospora calospora* (Sca)、*S. dipurpurascens* (Sdi)、*S. pellucida* (Spe)、*Dentiscutata heterogama* (Dh)、*Racocetra coralloidea* (Rco)、*R. fulgida* (Rfu)、*Septoglomus deserticola* (Sde)、*S. viscosum* (Svi)、*Funneliformis mosseae* (Fm)、*Claroideoglomus claroideum* (Cc)、*Rhizophagus clarus* (Rcl)、*R. intraradices* (Rin)、*Acaulospora foreata* (Afo)、*A. koskei* (Ako)、*A. scrobiculata* (Asc)、*A. spinosa* (Asp)、*Diversispora eburnea* (De)、*D. spurca* (Ds)、*Entrophospora colombiana* (Ec)、*Paraglomus brasilianum* (Pb)、*P. occultum* (Po)、*Ambispora leptoticha* (Ale)、*Archaeospora trappei* (Atr), 本试验所用 AM 真菌均为美国国际丛枝菌根真菌种质资源保藏中心 (INVAM) 提供的 AM 真菌纯净菌剂。

栽培基质为重庆三峡学院百安校区的菜园土与河沙的混合物 (体积比 3:1, 过 2 mm 筛, 121 °C 高压灭菌锅内灭菌 2 h)。采用室温盆栽方法, 设 AM 组 (接种 28 种 AM 真菌) 和 CK 组 (对照) 共 29 个处理。每处理 6 盆, 每盆栽种 15 株滇重楼。将栽培袋用 10% 次氯酸钠溶液消毒 15 min 后, 并用流动水清洗干净。

2013 年 2 月 24 日, 选择大小一致的滇重楼根茎, 菌土均匀层施于表土下滇重楼根茎部, 接种剂量为每盆 15 mL (接种菌剂为带有孢子、菌丝及侵染后根段的栽培基质混合样品, 每 1 mL 约含 60 个孢子)。接种后室温 (自然光照) 中培养。生长发育期间按常规管理, 定期浇 Hoagland 营养液。

滇重楼新鲜根茎选自云南省大理州农业科学推广研究院种植基地同一批大小基本一致的样品, 经大理大学周浓教授鉴定为延龄草科重楼属植物滇重楼 (*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*) 的新鲜根茎。

1.2 滇重楼药材及根际土壤的采集与处理

分别于 2013 年 8 月 10 日 (果熟期) 和 2013 年 11 月 12 日 (衰老期)^[18] 收获滇重楼植株的根茎, 清洗后, 45 °C 条件下烘干, 按分析要求分别粉碎过筛 (40 目), 备用; 对应根际土壤实验室自然风干, 按分析要求分别粗磨、细磨后过筛 (40 目), 备用。

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); AFS-230E 原子荧光光度计 (北京科创海光有限公司); 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); 镉 (Cd)、铜 (Cu)、铅 (Pb) 空心阴极灯 (北京曙光明电子光源仪器有限公司); 汞 (Hg)、砷 (As) 空心阴极灯 (北京海光仪器公司); AE-240 型分析天平 (梅特勒-托利多仪器上海有限公司)。

Cd、Hg、As、Cu、Pb 标准贮备液 (购自国家环境保护总局标准样品研究所, 批号分别为: 103110、102911、103012、100609、100808), 其他试剂均为优级纯, 水为去离子水。

1.4 分析方法

重金属元素采用土壤环境质量标准 (GB 15618—1995) 5.1、5.2 和《中国药典》2015 年版一部附录 IX B 的规定执行^[19], Cd、Cu、Pb 采用原子吸收光谱法测定, Hg、As 采用原子荧光光谱法测定。

1.5 滇重楼药材限量标准

药材限量标准参照 2015 年版《中国药典》相关中药材项下重金属含量限定指标、中国对外贸易绿色行业标准《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》(WM2—2001) 限量标准规定^[20]: $Cd \leq 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Hg \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $As \leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Cu \leq 20.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Pb \leq 5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.6 滇重楼中重金属富集系数评价

重金属富集系数 (A_i) = 重金属 (i) 在植物体中的量 / 重金属 (i) 在其植物所生长土壤中的量^[21]。

1.7 栽培土壤污染现状评价方法

参照中华人民共和国环境保护行业标准《土壤环境监测技术规范 (HJ/T166—2004)》, 采用单因子污染指数和综合污染指数法进行评价^[22]。

1.8 栽培土壤污染现状评价标准

根据《中药材生产质量管理规范 (GAP)》规定, 中药材产地的土壤应符合《土壤环境质量标准

(GB15618—1995)》的二级标准^[22],具体规定为 $Cd \leq 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Hg \leq 0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $As \leq 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Cu \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Pb \leq 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (pH 值为 6.5—7.5), $Cd \leq 0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Hg \leq 1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $As \leq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Cu \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Pb \leq 350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (pH>7.5)。

1.9 数据处理

数据的统计分析采用 Excel 2003 软件和 SPSS 22.0 统计软件进行。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 栽培土壤中的重金属残留量分析

如表 1 所示,与对照相比,接种 AM 真菌条件下,28 种 AM 真菌对滇重楼根际土壤 Cd、Hg、As、Cu、Pb 等 5 种重金属浓度均有一定的影响,根际土壤不同重金属在滇重楼生长不同时期含量变化的差异较大,但具体影响效果不同。整体上从重金属元素来看,Cd、Hg、As 随着生长时期的增加而呈递减的趋势,Pb 随着生长时期的增加而呈递增的趋势,而 Cu 变化不明显。有研究表明丛枝菌根真菌菌丝体对于重金属具有很强的生物吸附潜力,真菌菌丝体对各金属离子吸附能力差异显著,如摩西管柄囊霉对 Cd 最强,Zn 次之,Mn 最弱^[12],这可能是导致滇重楼根际土壤重金属富集无一致规律的原因。由于 Pb 随着生长时期的增加量较大,因此 5 种重金属元素总含量随着生长时期的增加而呈递增的趋势。

参照中国土壤元素背景值 ($Cd = 0.097 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Hg = 0.065 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $As = 11.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Cu = 22.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Pb = 26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[23],除 As、Cu 外的 3 种元素均存在超过背景值的处理组,AM 真菌对滇重楼重金属元素的吸收累积因重金属元素及菌种的不同而异,与李霞^[13]等的研究结果相一致,表明 Cd、Hg、Pb 元素存在不同程度的累积和富集。

参照《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)中Ⅱ级标准,除 Spe、Rco、Asc、Asp 处理组果熟期的 Cd 元素含量超标外,其余处理组和各元素的含量均低于最高限值,与周浓等^[5]的研究结果相一致,可能与库区土壤中 Cd 富集程度较高、AM 真菌菌株及金属元素、生长时期有关^[5, 13, 24-25],有待进一步深入地跟踪调查研究。

2.2 药材中重金属残留量分析

从表 2 的结果来看,与对照相比,接种 AM 真菌条件下,28 种 AM 真菌对滇重楼根茎 Cd、Hg、As、Cu、Pb 等 5 种重金属的残留量均不相同,其含量高低顺序依次为 $Cu > Pb > As > Hg > Cd$,5 种重金属元素随着生长时期的增加呈现不同的变化趋势。从总量来看,只有 Rfu 处理组果熟期 5 种重金属残留总量超过 CK 组,其余处理组均低于 CK 组,这可能是由于 AM 真菌菌丝对于重金属的生物吸附,对金属离子进入宿主植物有一种“过滤效应”^[12],可以同时避免过量毒害金属进入宿主以及有效平衡矿质营养。从具体来看,重金属残留量在不同 AM 真菌处理组与 CK 组之间差别并不明显,部分 AM 真菌处理组中重金属元素残留量超过 CK 组,这可能与 AM 真菌种间差异有关^[6],不同菌种对重金属的敏感性不同,接种 AM 真菌促进了滇重楼对某种重金属的吸收,但并无一致规律,有待进一步深入地跟踪调查研究。

参照《中国药典》(2015 年版一部)^[2]相关药材项下重金属残留量的限量指标、《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM/T2—2004)^[20]的重金属残留量的限量指标、超富集植物的临界含量标准^[26],除 Hg 元素在果熟期部分 AM 真菌处理组中未检出外,不同处理组下滇重楼根茎中重金属元素残留量均符合限量标准。

2.3 药材对重金属富集系数

药用植物从土壤中吸收、富集的重金属元素,可以用富集系数来衡量药用植物将土壤中重金属元素转移到植物体内的能力的强弱^[20]。从表 3 的结果来看,与对照相比,接种 AM 真菌条件下,28 种 AM 真菌对滇重楼根茎 Cd、Hg、As、Cu、Pb 等 5 种重金属元素的富集系数均不相同,但具体影响效果不同。除 Pb 元素外,其余 Cd、Hg、As、Cu 等 4 种元素均有不同处理组的富集系数大于 1,个别处理组 2—3 种元素的富集系数大于 1,说明不同 AM 真菌处理条件下重金属 Cd、Hg、As、Cu 具有选择性地从土壤迁移到滇重楼根茎中。所以,在对滇重楼 GAP 基地建设中应该严格控制其栽培土壤性质和合适的 AM 真菌菌株。

2.4 土壤中重金属污染评价

参照《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)标准进行土壤重金属评价,结果见表 4。

表 1 土壤中重金属残留量的比较

Table 1 Comparison of heavy metals residues in soil

实验组 Experimental group	Cd/ (mg·kg ⁻¹)		Hg/ (mg·kg ⁻¹)		As/ (mg·kg ⁻¹)		Cu/ (mg·kg ⁻¹)		Pb/ (mg·kg ⁻¹)		总量 Total amount/(mg·kg ⁻¹)		pH	
	果熟期 Fructescence		果熟期 Fructescence		果熟期 Fructescence		果熟期 Fructescence		果熟期 Fructescence		果熟期 Fructescence		果熟期 Fructescence	
	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence	衰老期 Senescence
Ga	0.2116c	0.0893b	0.1104b	0.0802c	0.8215a	0.3873bcdefg	12.7246fg	11.4204h	3.2435x	87.9306a	17.1116u	99.9078a	7.42	7.18
Gd	0.2120c	0.0981b	0.0729d	0.0250hi	0.7249b	0.3863bcdefg	12.4375i	11.6221g	2.6250y	13.2467o	16.0723v	25.3782k	7.29	7.30
Gg	0.2119c	0.0982b	0.0572fgh	0.0435g	0.7143b	0.3300ghij	12.6812g	10.7500l	13.1809o	28.0000b	26.8455l	39.2218b	7.31	7.34
Gm	0.2118c	0.0982b	0.0628efg	0.0160i	0.8007a	0.4080bcdef	13.1743c	10.4974n	17.9196g	15.8085jk	32.1692de	26.8281ghijk	7.52	7.14
Gr	0.2118c	0.0983b	0.0535ghij	0.0534fg	0.3719fgh	0.3513efghi	12.9903d	12.0625e	15.1137l	14.2500n	28.7412i	26.8155ghijk	7.66	7.24
Sca	0.0981d	0.0981b	0.0238n	0.0403g	0.3458gh	0.3111ijk	14.1698a	10.1225o	12.2971p	14.9338lm	26.9346l	25.5057jk	7.27	7.27
Sdi	0.0982d	0.0982b	0.0515hijk	0.0681de	0.4156def	0.3947bcdef	13.1809c	11.3693hi	10.6822r	19.7401e	24.4283o	31.6704e	7.66	7.50
Spe	0.3256b *	0.0980b	0.0156o	0.0653de	0.3601fgh	0.3239hij	12.5562h	9.1737q	19.3028f	18.5347fg	32.5604c	28.1956fghijk	7.42	6.93
Dh	0.0981d	0.2118a	0.0679de	0.0474g	0.4417d	0.2688k	12.8029ef	11.2416ij	14.6765n	23.9196c	28.0872j	35.6892c	7.15	7.55
Reo	0.3256b *	0.0142c	0.0421lm	0.0407g	0.4957c	0.4104bcde	13.9895b	13.5523a	10.6795r	12.9903o	25.5323m	27.0079fghijk	7.78	7.24
Rfu	0.0982d	0.0981b	0.0574fgh	0.1150a	0.3727fgh	0.3901bcdef	13.0592d	11.2332ij	16.0585k	9.9226q	29.6461gh	21.7589l	7.94	7.46
Sde	0.2120c	0.0155c	0.0349m	0.0809c	0.3560fgh	0.4135bcd	11.5625m	12.3033d	7.3750v	19.9850e	19.5404s	32.7982de	7.45	7.35
Svi	0.2118c	0.0982b	0.0454ijkl	0.0470g	0.3431gh	0.2873jk	12.3657ij	10.9973k	7.6193n	11.4346p	20.5854r	22.8644l	7.45	7.35
Fm	0.2119c	0.0982b	0.0462ijkl	0.0674de	0.3972defg	0.3737defg	11.4943m	11.1847j	22.2389b	14.9963lm	34.3885b	26.7203ghijk	7.64	6.97
Cc	0.2120c	0.0148c	0.0349m	0.0472g	0.3448gh	0.4348bc	11.8750l	11.4147h	19.5625e	22.3927d	32.0292e	34.3041cd	7.32	7.55
Rcl	0.0982d	0.0154c	0.0427lm	0.0300h	0.3944defg	0.4426b	12.5625h	12.1129e	16.6875j	15.8591jk	29.7854g	28.4600fghi	8.04	7.25
Rin	0.2118c	0.0156c	0.0449kl	0.0753cd	0.3798efgh	0.3476fghi	11.8007l	10.9780k	17.6074h	15.4067kl	30.0446f	26.8232ghijk	7.36	7.58
Afo	0.2117c	0.0150c	0.0619efg	0.0712cde	0.3398gh	0.3765cdefg	12.1692k	11.9137f	14.9151m	17.0284i	27.7186k	29.4049fg	6.81	7.26
Ako	0.2118c	0.0162c	0.0542ghij	0.0177hi	0.3398gh	0.3769cdefg	12.1784k	11.4204h	4.7464w	15.4144kl	17.5307t	27.2456fghijk	7.23	7.08
Asc	0.4395a *	0.0159c	0.0788c	0.0526fg	0.4328de	0.3508efghi	12.5594h	11.3523hi	9.1852s	14.5334mn	22.6957p	26.3050hijk	7.19	7.40
Asp	0.4394a *	0.0157c	0.3191a	0.0602ef	0.3269h	0.4899a	12.1814k	12.8493c	26.2369a	15.4067kl	39.5037a	28.8218fgh	7.24	7.71
De	0.2119c	0.2120a	0.0682de	0.0503fg	0.4102def	0.4433b	12.8686e	11.6221g	16.7416j	16.2459j	30.3004f	28.5736fghi	7.20	7.40
Ds	0.0980d	0.0981b	0.0510hijk	0.0929b	0.5023c	0.3792cdefg	12.8525e	11.2416ij	11.3551q	16.4876ij	24.8589n	28.2995fghij	7.31	7.44
Ec	0.0981d	0.0162c	0.0213no	0.0290h	0.3601fgh	0.3753cdefg	11.4856m	11.3551hi	17.4782h	13.9755n	29.4434h	25.7513ijk	7.44	7.25
Pb	0.0982d	0.0981b	0.0549ghi	0.0197hi	0.4807c	0.0000l	12.1875k	10.6768lm	19.8750d	18.9186f	32.6963c	29.7132f	7.45	7.15
Po	0.0982d	0.0156c	0.0648ef	0.0610ef	0.3596gh	0.3064ijk	12.3125j	2.8083r	19.5625e	17.7234h	32.3976cd	20.9147l	7.05	7.43
Ale	0.2118c	0.0980b	0.0594fgh	0.0187hi	0.3960defg	0.3475fghi	12.7373fg	13.0397b	21.0415c	18.2181gh	34.4459b	31.7221e	7.71	7.28
Atr	0.0156c	0.0156c	0.0393lm	0.0178hi	0.3764fgh	0.4268bcd	12.7341fg	9.4810p	16.9788i	16.5918ij	30.1442f	26.5331ghijk	7.57	7.60
CK	0.1000d	0.0982b	0.0540ghij	0.0153i	0.0310i	0.4961a	12.1875k	10.6223m	8.5625t	17.1207i	20.9350q	28.3527fghij	7.16	7.23

注:每组同列不同的小写字母代表0.05 水平上显著性差异;“-”表示未检出;“*”表示重金属超标;“-”表示未检出;表2—表4 同。

Note: Different lowercase letters on the same column of each group represented significant difference at $P < 0.05$; “-” means non-detected, “*” means heavy metals in excess of the standards; The same were applied in Table 2—Table 4.

表 2 药材中重金属残留量的比较

Table 2 Comparison of heavy metals residues in herb

实验组 Experimental group	Cd/ (mg·kg ⁻¹)		Hg/ (mg·kg ⁻¹)		As/ (mg·kg ⁻¹)		Cu/ (mg·kg ⁻¹)		Pb/ (mg·kg ⁻¹)		总量 Total amount/(mg·kg ⁻¹)	
	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence
Ga	0.0437ghi	0.0010a	0.0857d	0.0369a	0.1000j	0.1492a	0.5327x	3.6588a	1.0629kl	0.6916ab	1.8249p	4.5375a
Gd	0.0438ghi	0.0125a	0.1301e	0.0368a	0.2378fg	0.1755a	0.9838w	2.5956ab	1.2475hijk	0.1538ab	2.6429o	2.9742d
Gg	0.0062i	0.0910a	-j	0.0365a	0.0220j	0.2256a	1.7229s	3.0682ab	1.5667fg	0.7585a	3.3178n	4.1798b
Gm	0.0187i	0.0125a	-j	0.0341a	0.0000j	0.1910a	0.2797y	1.5766ab	0.9940l	0.0649b	1.2925q	1.8792g
Gr	0.0437ghi	0.2604a	0.0805e	0.0556a	0.1700h	0.0740a	0.2336y	0.9597ab	1.1866ijk	0.3466ab	1.7144p	1.6963ghi
Sea	0.0499ghi	0.1696a	0.0505fg	0.0413a	0.0000j	0.2104a	2.2871p	0.1498b	1.4307gh	0.4155ab	3.8183m	0.9866lm
Sdi	0.0375hi	0.0911a	0.0512fg	0.0456a	0.2362fg	0.1209a	2.6999n	0.6120ab	1.4318gh	0.3849ab	4.4565kl	1.2545ijklm
Spe	0.0562ghi	0.0909a	-j	0.0567a	0.0000j	0.1708a	3.0847m	0.7831ab	2.1889b	0.2588ab	5.3298j	1.3604hijkl
Dh	0.0250i	0.1239a	0.1390b	0.0495a	0.2688ef	0.2949a	1.8099r	0.4792ab	1.1167jkl	0.5263ab	3.3594n	1.4738hijk
Rco	0.2248ab	0.0785a	0.0065j	0.0476a	0.5038c	0.1294a	5.8544i	1.8316ab	1.7162f	0.5626ab	8.3057g	2.6498e
Rfu	0.1437de	0.0910a	0.0036j	0.0331a	0.5510b	0.2953a	14.3364a	0.4284ab	3.3367a	0.4697ab	18.3714a	1.3174hijklm
Sde	0.0375hi	0.0785a	0.0350i	0.0533a	0.0936i	0.1447a	2.1663q	0.2167b	1.5425fg	0.6107ab	3.8748m	1.1039klm
Svi	0.0437ghi	0.1693a	-j	0.0276a	0.0000j	0.1640a	2.4906o	0.2965b	1.6687f	0.3993ab	4.2031l	1.0566klm
Fm	0.0437ghi	0.1452a	-j	0.0432a	0.0000j	0.2151a	2.1739q	1.1292ab	2.0940bc	0.1677ab	4.3116kl	1.7004ghi
Cc	0.0375hi	0.1365a	0.0018j	0.0339a	0.2242g	0.1600a	4.3638k	1.0048ab	1.4100gh	0.1269ab	6.0372i	1.4621hijk
Rcl	0.2438a	0.1694a	0.0477g	0.0362a	0.4575d	0.1594a	7.2325f	1.0951ab	1.4550gh	0.0929ab	9.4364e	1.5530ghij
Rin	0.2060ab	0.2602a	0.0015j	0.0414a	0.6377a	0.3125a	10.2098b	1.3496ab	2.0804bcd	0.1797ab	13.1355b	2.1435f
Afo	0.0936fgh	0.0455a	-j	0.0367a	0.4999c	0.2899a	3.9990l	0.8781ab	1.3280hi	0.1779ab	5.9205i	1.4281hijk
Ako	0.0625ghi	0.0785a	-j	0.0389a	0.0000j	0.1424a	1.3265u	0.7072ab	1.2116ijk	0.2220ab	2.6005o	1.1890ijklm
Asc	0.1125ef	0.1364a	-j	0.0366a	0.5097c	0.3094a	1.1322v	0.6731ab	0.8148m	0.2439ab	2.5692o	1.3994hijk
Asp	0.1999abc	0.0455a	0.0040j	0.0343a	0.5706b	0.2084a	8.1534d	1.8352ab	1.6517f	0.2697ab	10.5796c	2.3931f
De	0.0500ghi	0.3295a	-j	0.0870a	0.0000j	0.1722a	2.6387n	0.2117b	1.8641e	0.4972ab	4.5527k	1.2976ijklm
Ds	0.0499ghi	0.1694a	0.0414h	0.0472a	0.2801e	0.2371a	1.4550t	0.3484ab	1.2828hij	0.1318ab	3.1092n	0.9339m
Ec	0.2247ab	0.1696a	0.0070j	0.0497a	0.4888c	0.2934a	5.1561j	0.8595ab	1.9001de	0.2260ab	7.7767h	1.5981ghij
Pb	0.0875fgh	0.0910a	0.0028j	0.0342a	0.2378fg	0.2357a	1.0213w	0.8658ab	0.9725l	0.2128ab	2.3218o	1.4395hijk
Po	0.1938abc	0.0125a	0.0348i	0.0434a	0.5922b	0.1982a	7.4938e	0.2083b	1.9450cde	0.5155ab	10.2594d	0.9779lm
Ale	0.1561cd	0.0455a	0.0061j	0.0457a	0.5591b	0.2562a	6.1501g	0.7713ab	1.5959fg	0.3508ab	8.4673g	1.4695hijk
Atr	0.1810bcd	0.0125a	0.1801a	0.0333a	0.5587b	0.1512a	6.0037h	1.1702ab	1.9426cde	0.3845ab	8.8662f	1.7517gh
CK	0.1000fg	0.1362a	0.0540f	0.0466a	0.0305j	0.1743a	9.6750c	2.4425ab	3.4250a	0.6665ab	13.2845b	3.4662c

表 3 药材对重金属的富集系数
Table 3 Enrichment factor of heavy metal in herbs

实验组 Experimental group	Cd			Hg			As			Cu			Pb		
	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence
Ga	0.2064no	0.0112u	0.7757j	0.7757j	0.4598x	0.1217q	0.1217q	0.3852jk	0.0419r	0.3204a	0.3277c	0.3204a	0.0079m	0.0079m	
Gd	0.2064no	0.1273t	1.7838d	1.7838d	1.4694h	0.3280o	0.3280o	0.4543hi	0.0791q	0.2233c	0.4752a	0.2233c	0.0116l	0.0116l	
Gg	0.0295q	0.9263p	—s	—s	0.8387n	0.0308r	0.0308r	0.6836d	0.1359o	0.2854b	0.1189fg	0.2854b	0.0271f	0.0271f	
Gm	0.0884p	0.1273t	—s	—s	2.1360d	0.0000r	0.0000r	0.4681h	0.0212s	0.1502d	0.0555g	0.1502d	0.0041n	0.0041n	
Gr	0.2064no	2.6494k	1.5031e	1.5031e	1.0421k	0.4572n	0.4572n	0.2106n	0.0180s	0.0796fgh	0.0785fg	0.0796fgh	0.0243g	0.0243g	
Sca	0.5091j	1.7289l	2.1261b	2.1261b	1.0241l	0.0000r	0.0000r	0.6763d	0.1614n	0.0148l	0.1163fg	0.0148l	0.0278f	0.0278f	
Sdi	0.3818l	0.9275p	0.9947h	0.9947h	0.6698q	0.5682l	0.5682l	0.3063m	0.2048m	0.0538hij	0.1340fg	0.0538hij	0.0195i	0.0195i	
Spe	0.1727o	0.9280p	—s	—s	0.8687m	0.0000r	0.0000r	0.5274g	0.2457l	0.0854fg	0.1134fg	0.0854fg	0.0140k	0.0140k	
Dh	0.2546mn	0.5849r	2.0458c	2.0458c	1.0436k	0.6086k	0.6086k	1.0971a	0.1414o	0.0426ijk	0.0761fg	0.0426ijk	0.0220h	0.0220h	
Reo	0.6906i	5.5298f	0.1551m	0.1551m	1.1692j	1.0164h	1.0164h	0.3153lm	0.4185i	0.1352de	0.1607ef	0.1352de	0.0433b	0.0433b	
Rfu	1.4637e	0.9275p	0.0626o	0.0626o	0.2877y	1.4784d	1.4784d	0.7571c	1.0978a	0.0381ijkl	0.2078de	0.0381ijkl	0.0473a	0.0473a	
Sde	0.1769o	5.0655g	1.0018g	1.0018g	0.6586r	0.2629p	0.2629p	0.3499klm	0.1874m	0.0176kl	0.2092de	0.0176kl	0.0306e	0.0306e	
Svi	0.2064no	1.7242l	—s	—s	0.5871t	0.0000r	0.0000r	0.5708f	0.2014m	0.0270kl	0.2190de	0.0270kl	0.0349d	0.0349d	
Fm	0.2064no	1.4789n	—s	—s	0.6407s	0.0000r	0.0000r	0.5755f	0.1891m	0.1010f	0.0942fg	0.1010f	0.0112l	0.0112l	
Cc	0.1769o	9.2214d	0.0503p	0.0503p	0.7188o	0.6502j	0.6502j	0.3680k	0.3675j	0.0880fg	0.0721fg	0.0880fg	0.0057mn	0.0057mn	
Rcl	2.4819b	10.9968b	1.1155f	1.1155f	1.2071i	1.600g	1.600g	0.3601kl	0.5757f	0.0904f	0.0872fg	0.0904f	0.0059mn	0.0059mn	
Rin	0.9728f	16.6827a	0.0345q	0.0345q	0.5501v	1.6792b	1.6792b	0.8990b	0.8652b	0.1229e	0.1182fg	0.1229e	0.0117l	0.0117l	
Afo	0.4422k	3.0339i	—s	—s	0.5153w	1.3862ef	1.3862ef	0.7699c	0.3286k	0.0737fgh	0.0890fg	0.0737fgh	0.0104l	0.0104l	
Ako	0.2948m	4.8471h	—s	—s	2.1925c	0.0000r	0.0000r	0.3778k	0.1089p	0.0619ghi	0.2553d	0.0619ghi	0.0144k	0.0144k	
Asc	0.2559mn	8.5794e	—s	—s	0.6963p	1.1777g	1.1777g	0.8821b	0.0901q	0.0593ghi	0.0887fg	0.0593ghi	0.0168j	0.0168j	
Asp	0.4550k	2.8976j	0.0125r	0.0125r	0.5693u	1.7451a	1.7451a	0.4254ij	0.6693d	0.1428de	0.0630g	0.1428de	0.0175ij	0.0175ij	
De	0.2358n	1.5547m	—s	—s	1.7288f	0.0000r	0.0000r	0.3885jk	0.2050m	0.0182kl	0.1113fg	0.0182kl	0.0306e	0.0306e	
Ds	0.5091j	1.7257l	0.8127i	0.8127i	0.5079w	0.5577l	0.5577l	0.6253e	0.1132p	0.0310jkl	0.1130fg	0.0310jkl	0.0080m	0.0080m	
Ec	2.2910c	10.4678c	0.3262l	0.3262l	1.7120g	1.3572f	1.3572f	0.7817c	0.4489h	0.0757fgh	0.1087fg	0.0757fgh	0.0162j	0.0162j	
Pb	0.8909g	0.9273p	0.0512p	0.0512p	1.7345f	0.4946m	0.4946m	0.0000o	0.0838q	0.0811fgh	0.0489g	0.0811fgh	0.0113l	0.0113l	
Po	1.9728d	0.8005q	0.5366k	0.5366k	0.7114o	1.6469c	1.6469c	0.6468de	0.6086e	0.0742fgh	0.0994fg	0.0742fgh	0.0291ef	0.0291ef	
Ale	0.7370h	0.4638s	0.1033n	0.1033n	2.4416b	1.4118e	1.4118e	0.7372c	0.4828g	0.0592ghi	0.0758fg	0.0592ghi	0.0193i	0.0193i	
Atr	11.6041a	0.8006q	4.5853a	4.5853a	1.8667e	1.4843d	1.4843d	0.3543klm	0.4715g	0.1234e	0.1144fg	0.1234e	0.0232gh	0.0232gh	
CK	1.0000f	1.3873o	1.0000g	1.0000g	3.0403a	0.9851i	0.9851i	0.3514klm	0.7938c	0.2299c	0.4000b	0.2299c	0.0389c	0.0389c	

表 4 土壤重金属污染评价
Table 4 Evaluation for heavy metal pollution in soil

实验组 Experimental group	P_i										$P_{综合}$		污染等级评价 Evaluation for pollution grade	
	Cd		Hg		As		Cu		Pb		果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence
	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence	果熟期 Fructescence	衰老期 Senescence				
Ga	0.7053c	0.2978d	0.2209b	0.1605c	0.0274ab	0.0129ef	0.1272a	0.1142abc	0.0108p	0.2931a	0.5221c	0.2445b	安全级	安全级
Gd	0.7067c	0.3270c	0.1458d	0.0501mn	0.0242ab	0.0129ef	0.1244a	0.1162abc	0.0088p	0.0442q	0.5197c	0.2440b	安全级	安全级
Gg	0.7063c	0.3274c	0.1144h	0.0870jk	0.0238ab	0.0110gh	0.1268a	0.1075abc	0.0439hi	0.0933b	0.5197c	0.2479b	安全级	安全级
Gm	0.3530d	0.3273c	0.0628m	0.0319p	0.0320a	0.0136e	0.1317a	0.1050abc	0.0512e	0.0527kl	0.2651d	0.2433b	安全级	安全级
Gr	0.3531d	0.3277c	0.0535nop	0.1067h	0.0149ab	0.0117fg	0.1299a	0.1206abc	0.0432i	0.0475op	0.2634d	0.2474b	安全级	安全级
Sea	0.3270d	0.3270c	0.0475pqr	0.0807k	0.0115ab	0.0104ghi	0.1417a	0.1012abc	0.0410j	0.0498mn	0.2448d	0.2448b	安全级	安全级
Sdi	0.1636e	0.3272c	0.0515opq	0.1362ef	0.0166ab	0.0132e	0.1318a	0.1137abc	0.0305m	0.0658l	0.1284e	0.2493b	安全级	安全级
Spe	1.0855b	0.3267c	0.0312t	0.1305f	0.0120ab	0.0108ghi	0.1256a	0.0917bc	0.0643b	0.0618fg	0.7899b	0.2471b	警戒级	安全级
Dh	0.3271d	0.3531b	0.1359e	0.0474no	0.0147ab	0.0108ghi	0.1280a	0.1124abc	0.0489ef	0.0683c	0.2492d	0.2633b	安全级	安全级
Reo	1.0852b	0.0473e	0.0841k	0.0814k	0.0165ab	0.0137e	0.1399a	0.1355a	0.0356l	0.0433q	0.7911b	0.1061b	警戒级	安全级
Rfu	0.1636e	0.3269c	0.0574mno	0.2301a	0.0149ab	0.0130ef	0.1306a	0.1123abc	0.0459gh	0.0331s	0.1296e	0.2523b	安全级	安全级
Sde	0.7067c	0.0517e	0.0699l	0.1619c	0.0119ab	0.0138e	0.1156a	0.1230abc	0.0246n	0.0666cd	0.5167c	0.1287c	安全级	安全级
Svi	0.7062c	0.3273c	0.0908j	0.0940ij	0.0114ab	0.0096i	0.1237a	0.1100abc	0.0254n	0.0381r	0.5174c	0.2455b	安全级	安全级
Fm	0.3532d	0.3273c	0.0462qr	0.1349ef	0.0159ab	0.0125ef	0.1149a	0.1118abc	0.0635b	0.0500mn	0.2635d	0.2483b	安全级	安全级
Cc	0.7067c	0.0247f	0.0698l	0.0472no	0.0115ab	0.0174bc	0.1188a	0.1141abc	0.0652b	0.0640e	0.5183c	0.0891de	安全级	安全级
Rcl	0.1637e	0.0257f	0.0427rs	0.0300p	0.0158ab	0.0177b	0.1256a	0.1211abc	0.0477fg	0.0453pq	0.1286e	0.0921de	安全级	安全级
Rin	0.7060c	0.0520e	0.0898j	0.1505d	0.0127ab	0.0116fg	0.1180a	0.1098abc	0.0587c	0.0514lm	0.5183c	0.1189cd	安全级	安全级
Afo	0.7056c	0.0500e	0.1237g	0.1424e	0.0120ab	0.0126ef	0.1217a	0.1191abc	0.0497ef	0.0568i	0.5191c	0.1142cd	安全级	安全级
Ako	0.7062c	0.0540e	0.1084h	0.0355p	0.0113ab	0.0126ef	0.1218a	0.1142abc	0.0158o	0.0514lm	0.5176c	0.0892de	安全级	安全级
Asc	1.4649a	0.0530e	0.1576c	0.1051h	0.0144ab	0.0117fg	0.1256a	0.1135abc	0.0306m	0.0484no	1.0665a	0.0930de	轻污染	安全级
Asp	1.4646a	0.0262f	0.6382a	0.0602l	0.0109ab	0.0196a	0.1218a	0.1285ab	0.0875a	0.0440q	1.0865a	0.0990de	轻污染	安全级
De	0.7063c	0.7065a	0.1364e	0.1006hi	0.0137ab	0.0148d	0.1287a	0.1162abc	0.0558d	0.0542jk	0.5207c	0.5189a	安全级	安全级
Ds	0.3268d	0.3271c	0.1020i	0.1859b	0.0167ab	0.0126ef	0.1285a	0.1124abc	0.0379k	0.0550j	0.2468d	0.2512b	安全级	安全级
Ec	0.3270d	0.0540e	0.0427rs	0.0581lm	0.0120ab	0.0125ef	0.1149a	0.1136abc	0.0583c	0.0466op	0.2441d	0.0898de	安全级	安全级
Pb	0.3274d	0.3270c	0.1097h	0.0394nop	0.0160ab	0.0000j	0.1219a	0.1068abc	0.0663b	0.0631ef	0.2486d	0.2434b	安全级	安全级
Po	0.3274d	0.0520e	0.1296f	0.1220g	0.0120ab	0.0102ni	0.1231a	0.0281d	0.0652b	0.0591h	0.2495d	0.0944de	安全级	安全级
Ale	0.3530d	0.3268c	0.0594mn	0.0374op	0.0158ab	0.0116fg	0.1274a	0.1304a	0.0601c	0.0607gh	0.2644d	0.2446b	安全级	安全级
Atr	0.0260f	0.0260f	0.0393s	0.0178q	0.0151ab	0.0171bc	0.1273a	0.0948bc	0.0485f	0.0474op	0.0971e	0.0729e	安全级	安全级
CK	0.3333d	0.3273c	0.1081h	0.0307p	0.0010b	0.0165c	0.1219a	0.1062abc	0.0285m	0.0571i	0.2502d	0.2436b	安全级	安全级

从表 4 的结果来看,就单一重金属污染指数而言,AM 真菌处理组除果熟期的 Cd 部分 PN(内梅罗综合污染指数) ≥ 0.7 ,达到警戒限至轻污染,其余的 PN 值均小于 0.7,土壤均属于清洁水平,土壤环境质量属安全级.在 5 种重金属共同作用下,除了 Spe、Rco、Asc、Asp 处理组果熟期的 PN ≥ 0.7 以外,其他处理组的 PN 值均远小于 0.7.所以,整体而言在人工接种 AM 真菌栽培条件下滇重楼种植土壤具有较低的生态风险.

2.5 药材中重金属含量间的相关性

利用 SPSS 22.0 统计软件对药材中 5 种重金属元素含量进行相关性分析,结果表明果熟期 Cd 的累积与 As、Cu($r=0.814$, $r=0.699$, $P<0.01$)的累积具有显著正相关,As 的累积与 Cu($r=0.606$, $P<0.01$)的累积有着显著的正相关,Cu 的累积与 Pb($r=0.784$, $P<0.01$)的累积具有显著正相关,其余重金属间呈负相关或正相关,均未达到显著性,见表 5.衰老期 Cd 的累积与 Hg($r=0.551$, $P<0.01$)的累积有着显著的正相关,其余重金属间呈负相关或正相关,均未达到显著性,见表 6.由此推测,重金属在滇重楼根茎生长过程中的积累过程可能存在竞争和协同 2 种效应,同时不同生长时期表现出不同的变化规律.

表 5 药材中重金属含量间的相关性(果熟期)
Table 5 Correlation of heavy metal content in herb during fructescence

重金属 Heavy metal	Cd	Hg	As	Cu	Pb
Cd	—				
Hg	-0.070	—			
As	0.814 **	0.059	—		
Cu	0.699 **	-0.130	0.606 **	—	
Pb	0.306	-0.106	0.100	0.784 **	—

注:“*”表示差异有统计学意义($P<0.05$),“**”表示差异有统计学意义($P<0.01$);表 6—表 8 同.

Note:“*” represented statistically significant difference at $P<0.05$, “**” represented statistically significant difference at $P<0.01$; The same were applied in Table 6—Table 8.

表 6 药材中重金属含量间的相关性(衰老期)
Table 6 Correlation of heavy metal content in herb during senescence

重金属 Heavy metal	Cd	Hg	As	Cu	Pb
Cd	—				
Hg	0.551 **	—			
As	0.050	-0.168	—		
Cu	-0.359	-0.276	-0.163	—	
Pb	-0.086	0.235	-0.184	0.273	—

2.6 土壤与药材中重金属含量间的相关性

利用 SPSS 22.0 统计软件对药材与对应根际土壤中 5 种重金属元素含量进行相关性分析,结果表明果熟期土壤 Cd 的累积与药材 Hg($r=-0.451$, $P<0.05$)的累积具有显著负相关,土壤 As 的累积与药材 Cu、Pb($r=-0.499$, $r=-0.547$, $P<0.01$)的累积具有显著负相关,其余重金属间呈负相关或正相关,均未达到显著性,见表 7.衰老期土壤 Cd 的累积与药材 Hg($r=0.467$, $P<0.05$)的累积具有显著正相关,土壤 Pb 的累积与药材 Cu、Pb($r=0.575$, $P<0.01$; $r=0.407$, $P<0.05$)的累积具有显著正相关,其余重金属间呈负相关或正相关,均未达到显著性,见表 8.由此推测,滇重楼根茎生长过程中土壤与药材中重金属积累过程可能存在竞争和协同 2 种效应,且不同生长时期表现出不同的变化规律.

表 7 土壤与药材中重金属含量间的相关性(果熟期)
Table 7 Correlation of heavy metal content between soil and herb during fructescence

重金属		土壤 Soil				
Heavy metal		Cd	Hg	As	Cu	Pb
药材 Herb	Cd	-0.003	0.177	-0.316	-0.083	0.362
	Hg	-0.451 *	-0.039	0.132	0.199	-0.299
	As	0.017	0.242	-0.154	-0.064	0.351
	Cu	-0.150	0.143	-0.499 **	-0.091	0.349
	Pb	-0.229	-0.098	-0.547 **	-0.125	0.177

表 8 土壤与药材中重金属含量间的相关性(衰老期)

Table 8 Correlation of heavy metal content between soil and herb during senescence

重金属 Heavy metal	土壤 Soil					
		Cd	Hg	As	Cu	Pb
药材 Herb	Cd	0.296	0.123	0.009	0.202	-0.289
	Hg	0.467 *	0.092	0.156	0.047	-0.074
	As	0.017	0.204	-0.265	-0.028	-0.152
	Cu	-0.053	-0.181	0.229	0.193	0.575 **
	Pb	0.267	0.137	0.057	-0.116	0.407 *

3 结论(Conclusion)

(1)与对照组(CK 组)相比,人工栽培条件下接种 28 种不同 AM 真菌对滇重楼根际土壤及其对应药材中 Cd、Hg、As、Cu、Pb 等 5 种重金属残留量差异显著,不同重金属在滇重楼生长不同时期含量变化的差异较大,但具体影响效果不同.除 Spe、Asc、Asp 处理组果熟期的根际土壤 Cd 元素含量超标外,其余处理组根际土壤及其对应药材均达到相关行业的限量标准,其种植基地土壤和生产的滇重楼药材均符合中药材 GAP 要求,能够保证栽培基地滇重楼的用药安全性,为构建高产优质高效的滇重楼绿色种植体系提供了一种可能的技术途径,以期进行大田推广应用与示范.

(2)与对照组(CK 组)相比,接种 AM 真菌条件下,28 种 AM 真菌对滇重楼根茎 Cd、Hg、As、Cu、Pb 等 5 种重金属元素的富集能力存在显著差异,滇重楼对 Cd、Hg、As、Cu 具有较强的生物积累作用,但均显著低于超富集植物的临界含量标准(1000 mg·kg⁻¹),说明滇重楼在其生长过程中可能主动富集相应元素,Cd、Hg、As、Cu 是今后滇重楼与部分 AM 真菌菌株大田推广栽培优先控制的对象.

(3)以《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)为评价标准,除 Ga、Gd、Gg、Spe、Rco、Sde、Svi、Cc、Rin、Afo、Ako、Asc、Asp、De 处理组果熟期和 De 处理组衰老期 Cd 的 PN≥0.7,土壤环境仅处于轻微生态风险中,其余处理组的 PN 值均小于 0.7,栽培土壤重金属污染程度总体呈清洁水平,在人工接种 AM 真菌栽培条件下滇重楼种植土壤具有较低的生态风险,但栽培土壤中 Cd 应是今后人工栽培监测和控制目标的重点,以保证其入药质量安全性.

(4)接种外源性 AM 真菌菌剂能促进滇重楼生长和根茎品质,同时能保障滇重楼根茎重金属残留量在安全范围内,有效控制了滇重楼重金属的污染风险.与对照组(CK 组)相比,接种不同外源性 AM 真菌后,滇重楼重金属残留量的发生了明显变化,提示 AM 真菌与滇重楼的共生关系存在一定的选择性和适应性,大田推广条件下应根据实际情况选择合适的 AM 真菌菌株进行共生栽培.

参考文献(References)

[1] 李海涛, 罗先文, 管燕红, 等. 云南省不同地区滇重楼皂苷含量的对比及影响因子分析[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(5): 803-806.
LI H T, LUO X W, GUAN Y H, et al. Comparison between content of saponins of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* in different areas of Yunnan province[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(5): 803-806 (in Chinese).

[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 86-87, 260.
State Pharmacopoeia Commission Code. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Volume I) [S]. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 86-87, 260(in Chinese).

[3] 李懿, 何佳, 赵庭周, 等. HPLC 同时测定不同产地滇重楼中的 6 种重楼皂苷[J]. 中成药, 2012, 34(1): 113-116.
LI Y, HE J, ZHAO T Z, et al. Determination of six saponins in *Paris polyphylla* var. *yunnanens* from different habitats by HPLC[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2012, 34(1): 113-116 (in Chinese).

[4] 杨永红, 戴丽君, 何昆鸿, 等. 土壤营养与人工栽培滇重楼品质相关性评价[J]. 中药材, 2012, 35(10): 1557-1561.
YANG Y H, DAI L J, HE K H, et al. Relation between soil nutrient of artificially cultivated area and rhizome quality of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2012, 35(10): 1557-1561 (in Chinese).

[5] 周浓, 张杰, 郭冬琴, 等. 三峡库区栽培重楼中重金属元素的含量与评价[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1758-1760.
ZHOU N, ZHANG J, GUO D Q, et al. The content and evaluation of heavy metals in *Rhizoma Paridis* cultivated in Three Gorges Reservoir area[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(9): 1758-1760 (in Chinese).

[6] 全瑞建, 杨晓红, 李东彦. 丛枝菌根真菌种间差异对柚苗营养生长及矿质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7):

- 1229-1233.
- TONG R J, YANG X H, LI D Y. Effects of interspecies difference of arbuscular mycorrhizal fungi on *Citrus grandis* cv. Changshou Shatian You seedlings vegetative growth and mineral contents[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(7): 1229-1233 (in Chinese).
- [7] 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. Effects of fungal elicitors on the secondary metabolite steroidal saponin in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2012, 47(9): 1237-1242 (in Chinese).
- [8] 周浓, 丁博, 冯源, 等. 接种不同 AM 真菌对滇重楼根根侵染率和入药品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(16): 3158-3167.
- ZHOU N, DING B, FENG Y, et al. Effects of mycorrhizal colonization and medicine quality of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* inoculated by different foreign AM fungi species[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(16): 3158-3167 (in Chinese).
- [9] 韦正鑫, 郭冬琴, 李海峰, 等. AM 真菌对滇重楼光合参数及生理指标的影响[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(20): 3945-3952.
- WEI Z X, GUO D Q, LI H F, et al. Photosynthetic parameters and physiological indexes of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* influenced by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(20): 3945-3952 (in Chinese).
- [10] 樊宇红, 凌宏文, 朴河春. 桑树与丛枝菌根的共生对重金属元素吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 477-484.
- FAN Y H, LING H W, PIAO H C. Effects of symbiosis of mulberry (*Morus alba*) with arbuscular mycorrhizae on absorption of heavy metals (Fe, Mn, Zn, Cu and Cd) [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3): 477-484 (in Chinese).
- [11] PIAO H C, LIU C Q, WANG S J. Isotopic evaluation of the role of arbuscular mycorrhizae in Chinese fir seedlings[J]. Pedobiologia-International Journal of Soil Biology, 2012, 55(55): 167-174.
- [12] 陈保冬, 李晓林, 朱永官. 丛枝菌根真菌菌丝体吸附重金属的潜力及特征[J]. 菌物学报, 2005, 24(2): 283-291.
- CHEN B D, LI X L, ZHU Y G. Characters of metal adsorption by AM fungal mycelium[J]. Mycosystema, 2005, 24(2): 283-291 (in Chinese).
- [13] 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 等. 丛枝菌根对翅茎木生长及吸收累积重金属的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3142-3148.
- LI X, PENG X W, WU S L, et al. Effect of arbuscular mycorrhizae on growth, heavy metal uptake and accumulation of *Zenia insignis* Chun Seedlings[J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 3142-3148 (in Chinese).
- [14] 李明亮, 李欢, 王凯荣, 等. Cd 胁迫下丛枝菌根对花生生长、光合生理及 Cd 吸收的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(11): 2344-2352.
- LI M L, LI H, WANG K R, et al. Effect of arbuscular mycorrhizae on the growth, photosynthetic characteristics and cadmium uptake of peanut plant under cadmium stress[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(11): 2344-2352 (in Chinese).
- [15] 周浓, 张德伟, 郭冬琴, 等. 菌根真菌对人工栽培滇重楼重金属元素的影响[J]. 中成药, 2014, 36(12): 2583-2586.
- ZHOU N, ZHANG D W, GUO D Q, et al. Effect of the arbuscular mycorrhiza fungi on heavy metals in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* by artificial cultivation[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2014, 36(12): 2583-2586 (in Chinese).
- [16] 赵连华, 杨银慧, 胡一晨, 等. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J]. 中草药, 2014, 45(9): 1199-1206.
- ZHAO L H, YANG Y H, HU Y C, et al. Current situation analysis and countermeasures on contamination of heavy metal in traditional Chinese medicinal materials in China[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2014, 45(9): 1199-1206 (in Chinese).
- [17] 褚卓栋, 刘文菊, 肖亚兵, 等. 中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况及评价[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1599-1607.
- CHU Z D, LIU W J, XIAO Y B, et al. Survey and assessment of heavy metals in soils and herbal medicines from Chinese herbal medicine cultivated regions[J]. Environmental Science, 2010, 31(6): 1599-1607 (in Chinese).
- [18] 周浓, 段宝忠, 夏从龙, 等. 滇重楼不同生长发育期化学成分的变化规律[J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(5): 70-73.
- ZHOU N, DUAN B Z, XIA C L, et al. Research on changing regulation of ingredients in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* at different growth[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2011, 17(5): 70-73 (in Chinese).
- [19] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(四部)[S]. 北京: 中国医药科技出版社: 205-207.
- State Pharmacopoeia Commission Code. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Volume IV) [S]. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 205-207 (in Chinese).
- [20] 齐耀东, 张志鹏, 张昭, 等. 关黄柏产区土壤重金属污染及药材安全性评价[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(3): 383-389.
- QI Y D, ZHANG Z P, ZHANG Z, et al. Evaluation for heavy metal pollution of soil and herb from main producing area of *Phellodendron amurense* in China[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(3): 383-389 (in Chinese).
- [21] 严明理, 刘丽莉, 王海华, 等. 3 种植物对红壤中镉的富集特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 72-77.
- YAN M L, LIU L L, WANG H H, et al. Accumulation characteristics of cadmium for three plants in red soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 72-77 (in Chinese).
- [22] 秦樊鑫, 张明时, 张丹, 等. 贵州省道地药材 GAP 基地土壤重金属含量及污染评价[J]. 土壤, 2008, 40(1): 135-140.
- QIN F X, ZHANG M S, ZHANG D, et al. Heavy metal contents and pollution evaluation of soils in Chinese medicinal herbs GAP bases in Guizhou Province[J]. Soils, 2008, 40(1): 135-140 (in Chinese).
- [23] 秦越华, 强承魁, 曹丹, 等. 徐州市典型稻区土壤和稻米重金属含量及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1546-1554.
- QIN Y H, QIANG C K, CAO D, et al. Contents and health risk assessment of heavy metals in soils and rice grains from typical rice-growing region of Xuzhou city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(9): 1546-1554 (in Chinese).
- [24] 周晓腾, 卢恒, 李耿, 等. 川产道地药材川芎重金属富集能力及健康风险分析[J]. 环境化学, 2014, 33(4): 562-567.
- ZHOU X T, LU H, LI G, et al. Enrichment ability and health risk assessment of heavy metals in *Ligusticum chuanxiong* Hort originated from Sichuan Province in China[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(4): 562-567 (in Chinese).
- [25] CITTERIO S, PRATO N, FUMAGALLI P, et al. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* induces growth and metal accumulation changes in *Cannabis sativa* L.[J]. Chemosphere, 2005, 59(1): 21-29.
- [26] 缪福俊, 孙浩, 陈玲, 等. 兰坪铅锌尾矿区土壤与自然发生的 5 种植物的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1): 189-194.
- MIAO F J, SUN H, CHEN L, et al. Study on lead-zinc tailings soil and five plants occurring naturally in lead-zincmining tailings in Lanping[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(1): 189-194 (in Chinese).