

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020120901

黎海灵, 谷文超, 赵顺鑫, 等. 不同产地滇重楼药材及其根际土壤中 6 种重金属含量的比较[J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2179-2192.

LI Hailing, GU Wenchao, ZHAO Shunxin, et al. Comparison of 6 heavy metal contents in *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* medicine and their rhizosphere soils from different geographical areas[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (7): 2179-2192.

不同产地滇重楼药材及其根际土壤中 6 种重金属含量的比较*

黎海灵¹ 谷文超¹ 赵顺鑫² 杨 敏^{1**} 魏祖晨² 周 浓^{1,2**}

(1. 大理大学药学院, 大理, 671000; 2. 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 对不同产地栽培品和野生品滇重楼药材及其根际土壤中 6 种重金属元素的含量进行测定分析, 为适宜滇重楼种植地区的选择提供参考. 以云南、贵州、四川采集的 27 份滇重楼药材及其根际土壤为研究对象, 通过微波消解法处理, 采用原子荧光光谱法 (AFS) 和电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 对铜 (Cu)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、铅 (Pb)、砷 (As)、汞 (Hg) 等 6 种重金属元素进行测定, 参照相关限量标准对重金属元素进行安全性评价, 并且利用主成分分析和聚类分析方法分析不同产地滇重楼药材及其根际土壤中重金属含量的相关性. 结果表明, 不同产地滇重楼药材及其根际土壤重金属含量存在显著性差异 ($P<0.05$), 其中大多数产地滇重楼药材 Cu、Pb 元素含量超过标准限量; 从单因子污染指数 >1 可知, 主要是 Cd 富集造成的土壤污染; 同时, 滇重楼药材对土壤中的 Cu 元素具有较强的富集作用; 主成分分析表明, 滇重楼药材重金属含量最高和最低分别是贵州省清镇市野生品和云南省芒市栽培品, 而土壤重金属含量最高和最低分别是云南省保山市水寨乡和贵州省织金县栽培品; 聚类分析结果表明, 栽培产地滇重楼药材及其根际土壤重金属含量与野生产地无明显区别. 栽培品滇重楼完全可以代替野生品使用, 为滇重楼人工规模化种植及管理提供参考依据, 以缓解野生滇重楼资源匮乏的困境.

关键词 滇重楼, 药材, 根际土壤, 重金属元素, 原子荧光光谱法, 电感耦合等离子体质谱法, 富集系数.

Comparison of 6 heavy metal contents in *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* medicine and their rhizosphere soils from different geographical areas

LI Hailing¹ GU Wenchao¹ ZHAO Shunxin² YANG Min^{1**}
WEI Zuchen² ZHOU Nong^{1,2**}

(1. College of Pharmacy, Dali University, Dali, 671000, China; 2. The Chongqing Engineering Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of the Three Gorges Reservoir Area's Medicinal Herbs, College of Food and Biological Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing, 404120, China)

Abstract The contents of 6 heavy metal elements in cultivated and wild *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* medicine and its rhizosphere soil from different geographical areas were determined and

2020 年 12 月 9 日收稿(Received: December 9, 2020).

* 国家自然科学基金 (81260622), 重庆市自然科学基金 (cstc2018jcyjAX0267) 和云南省地方本科高校 (部分) 基础研究联合专项项目 (2019FH001 (-041)) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (81260622), Chongqing Natural Science Foundation Project (cstc2018jcyjAX0267) and Local University of Yunnan Province (Partial) Joint Research Fundamentals (2019FH001(-041)).

** 通讯联系人 **Corresponding author**, Tel: (0872)2219936, E-mail: yang_min_0302@163.com; Tel: (023)58576130, E-mail: erhaizn@126.com

analyzed, which provided reference for the selection of suitable planting areas of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. 27 samples of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* medicinal materials and their rhizosphere soil collected from Yunnan, Guizhou and Sichuan were selected as the research objects. Treated by microwave digestion, 6 kinds of heavy metal elements, including Cu, Cd, Cr, Pb, As and Hg, were determined by AFS and ICP-MS. The safety of heavy metal elements was evaluated according to the relevant limit standards, and the correlation of heavy metal contents in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* medicinal materials and its rhizosphere soil was analyzed by principal component analysis and cluster analysis. The results showed that the heavy metal contents in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* medicine and its rhizosphere soil from different habitats were significantly different ($P < 0.05$), among which the content of Cu and Pb in the herbs exceeded the standard seriously. From the single factor pollution index > 1 , it could be seen that the main reason was the soil pollution caused by Cd enrichment. At the same time, the medicinal materials of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* had a strong enrichment effect on Cu in soil. Principal component analysis showed that the highest and lowest heavy metal contents of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* medicinal materials were wild products in Qingzhen City, Guizhou Province and cultivated products in Mangshi City, Yunnan Province, respectively, while the highest and lowest heavy metal contents in soil were cultivated products in Shuizhai Township, Baoshan City, Yunnan Province and Zhijin County, Guizhou Province, respectively. The cluster analysis results showed that there was no significant difference in the heavy metal contents of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* rhizome and its rhizosphere soil between cultivated and wild areas. The cultivated product *P. polyphylla* var. *yunnanensis* could completely replace the wild products, and provide reference for the artificial large-scale cultivation and management of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, so as to alleviate the shortage of resources of wild *P. polyphylla* var. *yunnanensis*.

Keywords *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis*, medicinal materials, rhizosphere soils, heavy metal contents, atomic fluorescence spectrometry, inductively coupled plasma mass spectrometry, bioconcentration factors.

滇重楼 *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* (Franch.) Hand.-Mazz. 为百合科重楼属多年生的草本植物, 收载于 2020 年版中国药典一部^[1], 其根茎为主要药用部位。主要成分为甾体皂苷、胆甾烷醇类、黄酮以及五环三萜等; 具有抗心肌缺血、抗菌、抗肿瘤、免疫调节以及驱虫等药理作用^[2-3]。野生资源是滇重楼药材的主要来源, 随着近年来的大量采挖, 造成野生资源日益枯竭, 故找到合适的人工栽培滇重楼方法迫在眉睫^[4]。

中药材作为传统医学的重要组成部分, 以其独特的疗效、低毒副作用受到了越来越多国家的关注和使用。但是, 随着中药的国际化提升, 因环境污染问题而导致中药重金属超标也受到了广泛的关注^[5]。重金属元素具有难降解、半衰期长和滞留时间长等特点, 容易在人体内富集不易排出, 超过一定的阈值后, 就会产生功能性病变, 从而引发疾病, 例如: 镉元素超标会诱导肝、肾、脾等器官致癌; 铅元素对神经系统、免疫系统及内分泌系统等均具有危害作用^[6]。有研究发现, 不同产地不同基源重楼重金属含量差异较大且具有地域性, 其中七叶一枝花重金属含量较高, 多叶重楼、滇重楼、南重楼和五指莲等的 Cr、As、Cd、Pb 等重金属元素含量有不同程度超标现象^[7-8]; 同时滇重楼活性成分重楼皂苷 I、II、VI 和 VII 含量与 Cu、As、Cr 和 Hg 等重金属元素含量等有关^[9]。但目前, 对滇重楼重金属的研究主要集中在药材方面, 而有关滇重楼药材及其根际土壤重金属元素的对比研究鲜有报道。

因此, 本研究采用原子荧光光谱法 (atomic fluorescence spectrometry, AFS) 和电感耦合等离子体质谱法 (inductively coupled plasma mass, ICP-MS) 对滇重楼药材及其根际土壤中的铜 (Cu)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、铅 (Pb)、砷 (As)、汞 (Hg) 等 6 种重金属元素进行含量测定, 对其进行安全性评价, 并通过主成分分析及聚类分析比较不同产地野生与栽培滇重楼重金属含量差异性, 以期为滇重楼科学种植及其健康

发展提供理论依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 供试材料

滇重楼及其根际土壤样品均采自云南、贵州、四川的部分地区,详细采集地见表 1。每个采集地使用对角线法(栽培品)或多点法(野生品)收集滇重楼药材 10—15 株,去掉地表枯枝落叶层,运用木铲轻轻挖掉表面的浮土,采用抖根法收集根际土壤,每个土壤样本平行采集 3 份,将其混匀用四分法取样保留约 1 kg 的根际土壤^[10]。经重庆三峡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周浓教授鉴定为百合科植物滇重楼 *P. polyphylla* var. *yunnanensis*。将采集的新鲜滇重楼药材去除地上部分和须根^[1],用去离子水洗净后晾干,在 45 ℃ 烘箱下烘干至恒重,粉碎,过 100 目筛后放入自封袋,在自封袋外放入硅胶干燥剂进行密封保存。根际土壤自然风干,粉碎过 100 目筛,备用。

表 1 不同产地滇重楼药材及其根际土壤样品信息

Table 1 Information of <i>P. polyphylla</i> var. <i>yunnanensis</i> and its rhizosphere soil samples from different habitats			
生长方式 Growth mode	NO.	样品来源 Sample source	经纬度 Longitude and latitude
栽培 cultivate	Z-GZZJ	贵州省毕节市织金县以那镇	26°48'33.57"N, 105°38'57.71"E
	Z-GZZY	贵州省安顺市紫云县猫营镇	25°59'05.46"N, 106°04'50.09"E
	Z-GZLL	贵州省黔西南州龙里县龙山镇大冲村	26°27'47.29"N, 106°59'33.64"E
	Z-GZXY	贵州省黔西南州兴义市七舍镇马格闹村	25°00'40.74"N, 104°49'10.82"E
	Z-SCHD	四川省凉山州会东县老君滩乡坪街村	26°23'32.68"N, 102°57'55.67"E
	Z-YNSM	云南省昆明市嵩明县杨林镇老余屯村	25°09'25.07"N, 103°02'31.33"E
	Z-YNYM	云南省玉溪市易门县二街15组	24°58'38.89"N, 102°12'52.17"E
	Z-YNBSP	云南省保山市隆阳区蒲缥镇黄泥村	25°02'09.58"N, 99°04'08.31"E
	Z-YNBSSZ	云南省保山市隆阳区水寨乡摆菜村	25°11'50.33"N, 99°19'15.87"E
	Z-YNLL	云南省保山市龙陵县龙新乡龙新村	24°32'12.82"N, 98°46'54.28"E
	Z-YNMS	云南省德宏州芒市江东乡大水沟村	24°29'24.79"N, 98°20'11.93"E
	Z-YNCL	云南省保山市昌宁县大田坝乡湾岗村	24°94'20.79"N, 99°56'52.25"E
	Z-YNYP	云南省大理州永平县杉阳镇阿海寨村	25°21'08.71"N, 99°23'06.52"E
	Z-YNYL	云南省大理州云龙县漕涧镇铁厂村	25°34'57.29"N, 99°07'29.63"E
	Z-YNLJ	云南省丽江市玉龙县白沙镇玉湖村	27°01'94.84"N, 100°22'01.55"E
	Z-YNJC	云南省大理州剑川县羊岑乡	26°48'42.07"N, 99°80'75.88"E
野生 wild	Y-GZASLG	贵州省安顺市西秀区龙宫镇	26°05'42.15"N, 105°52'43.28"E
	Y-GZASAD	贵州省安顺市西秀区安大广城	26°15'50.06"N, 106°00'35.28"E
	Y-GZQZ	贵州省贵阳市清镇市卫城镇坪寨村	26°44'43.78"N, 106°22'57.08"E
	Y-GZXR	贵州省黔西南州兴仁县民建村战马田村	25°32'46.94"N, 105°27'35.53"E
	Y-GZXY	贵州省黔西南州兴义市七舍镇马格闹村	25°00'40.74"N, 104°49'10.82"E
	Y-SCHD	四川省凉山州会东县老君滩乡坪街村	26°23'43.21"N, 102°58'06.64"E
	Y-YNCX	云南省楚雄市吕合镇钱粮办事处杨巡部小组	25°07'55.62"N, 101°22'30.67"E
	Y-YNBSP	云南省保山市隆阳区蒲缥镇黄泥村	25°02'09.58"N, 99°04'108.31"E
	Y-YNCL	云南省保山市昌宁县大田坝乡湾岗村	24°94'20.79"N, 99°56'52.25"E
	Y-YNYP	云南省大理州永平县杉阳镇阿海寨村	25°21'27.85"N,E99°23'14.09"
	Y-YNLJ	云南省丽江市玉龙县白沙乡玉湖村	27°01'94.84"N, 100°22'01.55"E

1.2 仪器与试剂

EXPEC 7000 型电感耦合等离子体质谱仪(聚光科技(杭州)股份有限公司); AFS-9750 型原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); MARS6 高压微波消解仪(美国 CEM 公司); SQP Sartorius 万分之一电子天平(德国 Sartorius 公司)。

重金属元素标准溶液($1000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$): 铜(Cu, 批号 GSB04—1725—2004)、镉(Cd, 批号 GSB04—1721—2004)、铬(Cr, 批号 GSB04—1723—2004)、铅(Pb, 批号 GSB04—1742—2004)、砷(As, 批号 GSB04—1714—2004)、汞(Hg, 批号 GSB04—1729—2004); 内标元素标准液($1000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$): 锗(Ge, 批号 GSB04—1728—2004)、铑(Rh, 批号 GSB04—1746—2004)、铋(Bi, 批号 GSB04—1719—2004), 均购自国家有色金属及电子材料分析测试中心; 浓硝酸、浓盐酸、氢氟酸均是优级纯, 购自成都金山化学试剂有限公司; 实验用水为去离子超纯水。实验所用容量瓶、移液管、烧杯等玻璃器皿均采用 20% 硝酸溶液浸泡 24 h, 然后用去离子超纯水冲洗干净, 备用。

1.3 药材消解

称取滇重楼干燥样品粉末 0.20 g 于聚四氟乙烯消解罐内, 加入浓硝酸 8 mL, 密封, 盖上消解盖, 静置过夜, 置于微波消解仪中, 按设定的消解程序进行: 先经 12 min 由室温升温至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 10 min, 然后以 $8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 20 min。待消解完全后, 取出消解罐, 将消解液转移至 25 mL 容量瓶中并用去离子超纯水定容至刻度, 摇匀待测。取 8 mL 浓硝酸置于聚四氟乙烯消解罐内以同法制备空白溶液^[11]。

1.4 土壤消解

土壤中 Cu、Cd、Cr、Pb、As 等重金属元素消解方法: 称取滇重楼根际土壤粉末 0.20 g 于聚四氟乙烯消解罐内, 加入浓硝酸 8 mL, 氢氟酸 1 mL, 密封, 盖上消解盖, 静置过夜, 置于微波消解仪中, 按设定的消解程序处理: 先经 6 min 由室温升温至 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 然后以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min, 再以 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 15 min, 最后 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 10 min。待消解完全后, 取出消解罐, 在通风橱中以 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 将酸挥至近干, 转移至 50 mL 容量瓶中并用去离子超纯水定容至刻度, 摇匀待测。取 8 mL 浓硝酸和 1 mL 氢氟酸置于聚四氟乙烯消解罐内以同法制备空白溶液^[12]。

土壤 Hg 元素消解方法: 称取滇重楼根际土壤粉末 0.5 g 于 25 mL 具塞试管中, 加少许水润湿样品, 加入 5 mL 王水, 摇匀后置于沸水浴中消解 2 h, 取出冷却至室温, 加 $0.5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 重铬酸钾溶液 5 mL, 再用 $0.2\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 重铬酸钾溶液定容至刻度, 摇匀后离心($4000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 取上清液待测。同法做空白试剂^[13]。

1.5 元素测定

ICP-MS 参数: 功率 1.4 kW, 雾化气流量 $1.224\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 辅助气流量 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、冷却气流量 $14.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 雾化室温度 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 蠕动泵速 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 采样深度 3.91 mm, 扫描次数 10 次, 分析时间 26 s。AFS 参数: 汞灯, 负高压 290 V, 载气流量 $400\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 屏蔽器流量 $1000\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 灯电流 10 mA, 重复次数 3 次, 读数时间 10 s。

调节各仪器条件, 以 Ge、Rh、Bi 为内标元素, 采用 ICP-MS 测定药材和土壤中的 Cu、Cd、Cr、Pb、As 元素以及药材中的 Hg 元素, 运用 AFS 测定土壤中的 Hg 元素。

1.6 滇重楼药材限量标准

药材限量标准参照 2020 年版《中国药典》^[14] 和《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762—2017) 规定^[8]: $\text{Cu}\leq 20.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Cd}\leq 1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Cr}\leq 2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Pb}\leq 5.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{As}\leq 2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Hg}\leq 0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.7 滇重楼重金属富集系数评价

重金属元素富集系数 (BCF)=药材内重金属元素的含量/土壤中重金属元素含量 $\times 100\%$ ^[15]。

1.8 滇重楼土壤污染现状评价方法

参考前期研究已测得土壤 pH 值范围为: 6.63—7.46^[16], 根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018)^[17] 中在 $6.5<\text{pH}\leq 7.5$ 对各元素的限量为: $\text{Cu}\leq 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Cd}\leq 0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Cr}\leq 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Pb}\leq 120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{As}\leq 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Hg}\leq 2.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—

2004), 采用单因子污染指数和梅罗综合污染指数法对滇重楼土壤污染现状进行评价^[18-19]. 土壤环境质量等级见表 2.

表 2 土壤环境质量等级
Table 2 Soil environmental quality grade

等级 Grade	综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染等级 Class of pollution	污染水平 Pollution level
I	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染物超出标准视为轻度污染, 作物开始污染
IV	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物受中度污染
V	$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染	土壤、作物受污染已相当严重

单因子指数法:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 、 C_i 和 S_i 分别为土壤中污染物 i 的单项污染指数、土壤中污染物 i 的实测值和土壤中污染 i 的物质质量标准. 当 $P_i > 1$ 时, 为污染.

综合污染指数法:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{均}}^2 + P_{\text{最大}}^2}{2}}$$

式中, $P_{\text{综}}$ 、 $P_{\text{均}}^2$ 和 $P_{\text{最大}}^2$ 分别是综合污染指数、平均单项污染指数的平方和最大单项污染指数的平方.

1.9 数据处理

测定结果采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行处理, 运用 SPSS 22.0 软件对数据进行主成分分析和聚类分析.

2 结果与讨论(Results and Discussion)

2.1 不同产地滇重楼药材中重金属元素的分析

27 批栽培和野生滇重楼药材之间 6 种重金属元素含量存在显著性差异($P < 0.05$), 见表 3. 除 Y-YNXC(云南省楚雄市野生品)产地 Hg 未检出外, 其它产地均检测出 6 种重金属元素. 各重金属元素在药材中的平均含量为 $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$, 其中野生滇重楼药材 Cu、Cd、Cr、Pb 的平均含量远高于栽培品, 而 As 和 Hg 的平均含量与栽培产地相差不大. 不同产地滇重楼药材元素含量变化范围为 $0.001\text{--}290.068\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 Cu 的含量最高, 达 $290.068\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 元素 Hg 含量最低, 仅有 $0.001\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 从总体上看, 在栽培产地中 Z-SCHD(四川省会东县栽培品)重金属的含量最高, Z-YNLL(云南省龙陵县栽培品)和 Z-YNMS(云南省芒市栽培品)重金属含量相对较低; 而野生产地中 Y-GZQZ(贵州省清镇市野生品)重金属的含量较高, Y-GZASAD(贵州省安顺市安大广城野生品)和 Y-YNXC 重金属含量最低; 栽培产地滇重楼药材重金属含量趋势高于野生. 变异系数(coefficient of variation, CV)描述的是相对离散程度, 变异系数越大, 说明各产地重金属含量变异程度越大, 反之亦然^[20]. 在栽培和野生滇重楼产地中 Cr 的变异系数最小, 而 As 最大. 说明在不同产地中各产地滇重楼药材 Cr 的含量相对聚集, As 的含量则相对离散. 栽培产地中 Cu、Cd、Cr、Hg 的变异系数比野生产地的小, Pb、As 则相反, 表明栽培产地滇重楼药材中 Cu、Cd、Cr、Hg 含量相较于野生产地差异较小, Pb、As 含量差异较大. 进一步表明不同产地滇重楼药材重金属元素含量有较大差异.

表 3 不同产地滇重楼药材中重金属的含量($\bar{x} \pm s, n=3, \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Content of heavy metals in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* from different habitats($\bar{x} \pm s, n=3, \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

NO.	Cu	Cd	Cr	Pb	As	Hg
Z-GZZJ	82.0.10±0.465 e	0.093±0.004 f	1.386±0.050 jk	7.516±0.148 f	0.161±0.004 fghi	0.018±0.002 bc
Z-GZZY	64.064±2.085 g	0.121±0.007 d	1.109±0.055 l	4.563±0.125 h	0.193±0.016 fgh	0.016±0.001 cd
Z-GZLL	128.075±0.662 c	0.134±0.002 c	1.711±0.032 fg	12.391±0.212 b	0.126±0.016 fghij	0.013±0.003 de
Z-GZXY	72.361±0.610 f	0.072±0.001 g	2.227±0.088 c	3.257±0.154 i	0.337±0.014 de	0.027±0.002 a
Z-SCHD	178.286±2.768 a	0.102±0.001 e	2.476±0.102 b	8.870±0.199 d	0.327±0.011 de	0.021±0.004 b
Z-YNM	25.923±0.692 j	0.167±0.003 b	1.566±0.019 hi	3.482±0.117 i	0.070±0.005 ij	0.001±0.001 h
Z-YNYM	88.221±0.993 d	0.092±0.004 f	2.935±0.078 a	10.555±0.142 c	0.238±0.014 ef	0.002±0.001 gh
Z-YNBSPP	164.174±0.720 b	0.048±0.001 i	1.312±0.014 k	37.046±0.678 a	0.098±0.002 ghij	0.002±0.001 fgh
Z-YNBSZ	56.842±0.861 h	0.078±0.001 g	1.879±0.073 de	0.512±0.010 l	0.489±0.183 bc	0.015±0.004 cde
Z-YNLL	10.476±0.290 m	0.010±0.001 k	1.722±0.042 fg	1.137±0.019 k	0.035±0.004 j	0.004±0.001 fgh
Z-YNMS	20.128±4.515 k	0.011±0.001 k	1.934±0.052 d	0.466±0.004 l	0.086±0.002 hij	0.001±0.001 h
Z-YNCL	19.310±0.318 l	0.031±0.001 j	1.634±0.025 gh	1.973±0.034 j	0.572±0.064 b	0.002±0.001 gh
Z-YNYP	89.491±1.188 d	0.025±0.001 j	1.774±0.054 ef	3.260±0.015 i	0.204±0.003 fg	0.001±0.002 h
Z-YNYL	70.883±0.819 f	0.052±0.001 i	1.493±0.039 ij	8.080±0.021 e	0.382±0.009 cd	0.006±0.001 f
Z-YNLJ	80.378±0.947 e	0.062±0.004 h	1.547±0.016 hi	6.242±0.037 g	3.505±0.102 a	0.011±0.001 e
Z-YNJC	52.825±0.212 i	0.204±0.008 a	1.707±0.052 fg	8.887±0.138 d	0.325±0.021 de	0.005±0.002 fg
Mean	75.494	0.081	1.776	7.390	0.447	0.009
CV/%	64.27	67.68	25.57	118.06	185.72	90.26
Y-GZASLG	86.343±2.558 f	0.102±0.036 d	2.318±0.052 d	9.572±0.122 f	0.136±0.062 c	0.003±0.0011 d
Y-GZASAD	27.025±1.331 a	0.077±0.001 de	1.700±0.012 f	8.718±0.059 g	0.224±0.004 bc	0.005±0.001 c
Y-GZQZ	290.068±0.720 k	0.671±0.013 a	1.924±0.047 e	50.112±0.265 a	0.471±0.036 b	0.017±0.001 a
Y-GZXR	75.914±0.511 g	0.160±0.015 c	5.736±0.200 a	13.526±0.313 d	0.221±0.011 bc	0.017±0.001 ab
Y-GZXY	95.493±2.322 d	0.052±0.002 ef	3.569±0.043 b	7.369±0.145 h	0.2890±0.008 bc	0.005±0.001 c
Y-SCHD	43.726±0.629 j	0.077±0.012 de	1.605±0.046 f	42.227±0.640 b	0.101±0.019 c	0.001±0.001 ef
Y-YNCX	64.906±0.806 h	0.210±0.004 b	1.921±0.036 e	3.619±0.112 j	0.084±0.005 c	—
Y-YNBSPP	89.359±0.913 e	0.024±0.001 g	1.892±0.020 e	7.560±0.126 h	0.263±0.006 bc	0.005±0.001 c
Y-YNCL	61.482±1.049 i	0.032±0.002 fg	3.178±0.079 c	6.426±0.096 i	0.096±0.008 c	0.005±0.001 c
Y-YNYP	116.023±0.676 b	0.032±0.001 fg	2.453±0.037 d	10.317±0.219 e	0.148±0.007 c	0.002±0.001 de
Y-YNLJ	100.346±0.259 c	0.059±0.005 e	1.664±0.068 f	29.356±0.518 c	2.335±0.409 a	0.016±0.001 b
Mean	95.517	0.136	2.542	17.164	0.397	0.007
CV/%	72.74	137.04	48.61	92.83	164.32	93.91

注: 同列不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著, 下同。
Note: different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level, same as below.

根据 2020 年版《中国药典》和《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762—2017)对药材重金属限量标准规定, 在本实验中, 除 Z-YNLL 和 Z-YNCL(云南省昌宁县栽培品)其余 25 个产地滇重楼药材 Cu 含量均超标, 其中 Y-GZQZ 产地 Cu 含量是最高标准限量的 14.5 倍; 27 个产地中只有 Z-YNLJ(云南省丽江市栽培品)和 Y-YNLJ(云南省丽江市野生品)的 As 含量超标; 有 8 个产地 Cr 含量超标, 其中 Y-GZXR(贵州省兴仁县野生品)的 Cr 含量是最高标准限量的 2.9 倍; 有 66.7% 产地 Pb 含量超标, 其野生产地采集的滇重楼药材整体上均超标; 所有产地 Cd 和 Hg 含量均符合相关要求。

2.2 不同产地滇重楼根际土壤中重金属元素的分析

27 批栽培和野生滇重楼根际土壤中 6 种重金属元素含量存在显著性差异($P<0.05$), 见表 4. 所有滇重楼根际土壤样品中均检测出 6 种重金属元素. 不同栽培产地中各重金属元素平均含量为

Pb>Cr>Cu>As>Cd>Hg, 而不同野生产地中各重金属元素平均含量为 Pb>As>Cr>Cu>Cd>Hg, 其中栽培产地根际土壤 Cu、Cd、Cr、Pb、Hg 的平均含量远高于野生产地, As 的平均含量反而低于野生产地. 不同产地滇重楼根际土壤元素含量变化范围为 0.038—249.814 mg·kg⁻¹, 其中 Pb 的含量最高, 达到 249.814 mg·kg⁻¹, As 含量最低, 仅有 0.038 mg·kg⁻¹. 整体上看, 在栽培产地中 Z-YNBSSZ(云南省保山市水寨乡栽培品)重金属含量较高, Z-GZZJ(贵州省织金县栽培品)重金属含量最低; 在野生产地中 Y-YNLJ 重金属含量最高, Y-SCHD(四川省会东县野生品)重金属含量相对较低; 不同栽培产地滇重楼根际土壤重金属含量趋势高于野生. 栽培和野生产地 As 的变异系数均较大, 而野生产地 Cu、Cd、Cr、Pb、Hg 的变异系数远低于栽培产地. 进一步说明不同产地滇重楼根际土壤重金属含量相差较大, 其中以 As 最为明显.

表 4 不同产地滇重楼根际土壤中重金属的含量($\bar{x} \pm s$, $n=3$, mg·kg⁻¹)

Table 4 Contents of heavy metals in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* from different habitats ($\bar{x} \pm s$, $n=3$, mg·kg⁻¹)

NO.	Cu	Cd	Cr	Pb	As	Hg
Z-GZZJ	20.515±0.145 a	1.499±0.046 b	3.883±0.018 h	29.215±0.232 i	1.908±0.068 h	0.284±0.014 ef
Z-GZZY	4.802±0.305 fg	2.862±0.056 a	13.897±0.072 b	38.810±0.132 g	6.080±0.485 c	0.458±0.090 cd
Z-GZLL	2.961±0.340 ij	0.768±0.010 d	5.882±0.951 g	78.038±1.421 d	1.490±0.286 hi	0.181±0.005 gh
Z-GZXY	8.424±0.496 b	0.576±0.012 f	9.960±0.879 c	32.600±0.242 h	3.832±0.274 de	0.372±0.127 de
Z-SCHD	7.643±0.076 c	0.519±0.009 g	9.555±0.227 cd	29.033±0.435 i	3.335±0.063 ef	0.284±0.014 ef
Z-YNBM	6.267±0.230 d	0.661±0.004 e	36.797±0.540 a	99.763±0.156 c	1.902±0.102 h	0.628±0.020 b
Z-YNYM	2.896±0.058 ij	0.282±0.004 i	8.248±0.097 e	18.384±0.140 k	0.571±0.035 jk	0.119±0.019 h
Z-YNBSPP	5.498±0.176 e	0.360±0.010 h	7.233±0.269 f	32.337±0.851 h	0.147±0.033 k	0.503±0.069 c
Z-YNBSSZ	2.585±0.089 jk	0.747±0.019 d	8.535±0.360 e	32.855±0.196 h	11.569±0.602 b	2.493±0.024 a
Z-YNLL	4.788±0.323 fg	0.094±0.002 k	8.900±0.337 de	47.883±0.968 e	0.280±0.018 k	0.2744±0.028 fg
Z-YNMS	2.249±0.217 k	0.069±0.001 k	8.900±0.337 j	41.039±0.354 f	0.132±0.106 k	0.376±0.012 de
Z-YNCL	5.167±0.159 ef	0.387±0.014 h	10.422±0.446 c	249.814±0.195 a	4.204±0.056 d	0.095±0.022 h
Z-YNYP	3.141±0.198 i	0.197±0.005 j	8.090±0.860 ef	15.118±0.033 l	0.955±0.078 ij	0.088±0.001 h
Z-YNYL	4.258±0.074 h	0.296±0.004 i	5.934±0.248 g	26.514±0.275 j	2.942±0.096 fg	0.103±0.004 h
Z-YNLJ	6.256±0.102 d	0.662±0.013 e	2.657±0.055 i	17.940±0.175 k	48.144±0.564 a	0.136±0.021 h
Z-YNJC	4.682±0.221 gh	1.183±0.036 c	9.991±0.865 c	185.454±0.690 b	2.667±0.173 g	0.274±0.007 f
Mean	5.758	0.698	9.401	60.925	5.635	0.417
CV/%	75.01	99.15	85.19	108.39	207.50	138.27
Y-GZASLG	2.062±0.133 f	0.441±0.018 g	5.744±0.638 d	22.154±0.309 h	1.268±0.150 f	0.094±0.005 h
Y-GZASAD	2.405±0.060 f	0.885±0.013 c	7.736±0.245 c	82.839±0.744 d	1.994±0.107 d	0.486±0.0124 b
Y-GZQZ	3.366±0.238 e	1.004±0.024 b	9.357±0.005 b	93.044±0.309 c	1.870±0.124 de	0.278±0.009 e
Y-GZXR	6.250±0.315 b	0.505±0.007 f	11.892±0.754 a	24.848±0.218 g	0.038±0.015 h	0.363±0.028 c
Y-GZXY	5.368±0.270 c	0.753±0.010 d	7.957±0.494 c	36.723±0.337 f	1.647±0.074 e	0.304±0.013 d
Y-SCHD	7.669±0.316 a	0.707±0.009 e	4.622±0.436 e	42.882±0.271 e	2.732±0.105 c	0.122±0.008 g
Y-YNCX	3.701±0.033 de	0.697±0.010 e	10.184±0.240 b	21.061±0.273 i	1.054±0.043 f	0.041±0.001 i
Y-YNBSPP	2.397±0.138 f	0.343±0.003 h	6.179±0.766 d	99.250±0.139 b	3.207±0.227 b	0.677±0.014 a
Y-YNCL	2.304±0.090 f	0.081±0.009 j	7.993±0.806 c	16.311±0.119 j	0.374±0.008 g	0.071±0.004 h
Y-YNYP	4.079±0.259 d	0.111±0.004 i	9.358±0.593 b	10.454±0.110 k	0.571±0.088 g	0.088±0.003 h
Y-YNLJ	4.052±0.189 d	1.050±0.012 a	4.318±0.372 e	123.114±0.156 a	71.848±0.141 a	0.244±0.007 f
Mean	3.969	0.598	7.758	52.062	7.873	0.252
CV/%	45.52	55.44	30.61	76.42	269.78	79.17

2.3 不同产地滇重楼根际土壤中重金属污染评价

以《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004) 为评价标准, 采用单因子污染指数和梅罗综合污染指数法对土壤重金属元素进行污染等级评价. 结果见表 5, 不同产地滇重楼根际土壤中有 74% 的产地 Cd 单因子污染指数>1, 产地 Z-YNCL、Z-YNJC(云南省剑川县栽培品)、Y-YNLJ 的 Pb, Z-YNLJ、Y-YNLJ 的 As 以及 Z-YNBSSZ 的 Hg 单因子污染指数均>1. 产地 Z-GZZJ 和 Z-GZZY(贵州省紫云县栽培品)综合污染指数远高于其他产地, 且污染等级达到重度污染; 产地 Z-YNYM(云南省易门县栽培品)、Z-YNLL、Z-YNMS、Z-YNYP(云南省永平县栽培品)、Y-YNCL(云南省昌宁县野生品)和 Y-YNYP(云南省永平县野生品)综合污染指数均≤0.7 为安全等级; 而其他产地大部分以轻度污染为主, 少部分产地为警戒线和中度污染. 研究区域土壤主要受到 Cd 富集过多造成土壤污染, 可能是滇重楼多年生长致使土壤质量下降、重金属富集等, 也有可能是较多的人为活动因素干扰造成 Cd 含量增加^[17].

表 5 滇重楼土壤重金属污染评价

Table 5 Pollution Evaluation of heavy metal in soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

No.	P_i						$P_{综合}$	污染等级评价 Pollution level evaluation
	Cu	Cd	Cr	Pb	As	Hg		
Z-GZZJ	0.205	4.998	0.019	0.243	0.064	0.118	3.596	重度污染
Z-GZZY	0.048	9.541	0.069	0.323	0.203	0.191	6.857	重度污染
Z-GZLL	0.030	2.560	0.029	0.650	0.050	0.075	1.854	轻度污染
Z-GZXY	0.084	1.919	0.050	0.272	0.128	0.155	1.391	轻度污染
Z-SCHD	0.076	1.730	0.048	0.242	0.111	0.118	1.254	轻度污染
Z-YNMS	0.063	2.205	0.184	0.831	0.063	0.262	1.616	轻度污染
Z-YNYM	0.029	0.939	0.041	0.153	0.019	0.050	0.680	安全等级
Z-YNBSPP	0.055	1.199	0.036	0.269	0.005	0.210	0.874	警戒线
Z-YNBSSZ	0.026	2.490	0.043	0.274	0.386	1.039	1.831	轻度污染
Z-YNLL	0.048	0.312	0.045	0.399	0.009	0.114	0.303	安全等级
Z-YNMS	0.022	0.230	0.002	0.342	0.004	0.157	0.258	安全等级
Z-YNCL	0.052	1.289	0.052	2.082	0.140	0.040	1.534	轻度污染
Z-YNYP	0.031	0.656	0.040	0.126	0.032	0.036	0.476	安全等级
Z-YNYL	0.043	0.987	0.030	0.221	0.098	0.043	0.718	警戒线
Z-YNLJ	0.063	2.208	0.013	0.150	1.605	0.057	1.634	轻度污染
Z-YNJC	0.047	3.945	0.050	1.545	0.089	0.114	2.872	中度污染
Y-GZASLG	0.021	1.470	0.029	0.185	0.042	0.039	1.061	轻度污染
Y-GZASAD	0.024	2.950	0.039	0.690	0.066	0.203	2.138	中度污染
Y-GZQZ	0.034	3.348	0.047	0.775	0.062	0.116	2.423	中度污染
Y-GZXR	0.062	1.684	0.059	0.207	0.001	0.151	1.218	轻度污染
Y-GZXY	0.054	2.511	0.040	0.306	0.055	0.127	1.812	轻度污染
Y-SCHD	0.077	2.356	0.023	0.357	0.091	0.051	1.702	轻度污染
Y-YNCX	0.037	2.325	0.051	0.176	0.035	0.017	1.673	轻度污染
Y-YNBSPP	0.024	1.144	0.031	0.827	0.107	0.282	0.858	警戒线
Y-YNCL	0.023	0.272	0.040	0.136	0.012	0.030	0.201	安全等级
Y-YNYP	0.041	0.370	0.047	0.087	0.019	0.037	0.271	安全等级
Y-YNLJ	0.041	3.499	0.022	1.026	2.395	0.102	2.611	中度污染

2.4 不同产地滇重楼药材及其根际土壤主成分分析

主成分分析是利用降维的思想, 将原有众多且相关指标所含信息转化为少数几个相互独立的综合

指标^[21]。以 6 种重金属元素为变量, 分别对 27 批滇重楼药材和根际土壤进行主成分分析, 结果见表 6—9。由表 6 所示, 药材 6 种重金属所有主成分构成信息主要集中在前 3 个主成分, 其特征值均>1, 累积贡献率为 77.687%, 故前 3 个主成分能反应滇重楼药材 6 种重金属含量的基本特征。对主成分 1、2 和 3 贡献较大的分别是 Cu、As 和 Cr, 则造成不同产地滇重楼药材重金属含量差异较大的主要因素为 Cu、As 和 Cr。计算 3 个主成分得分, 并进行排序, 由表 7 可知, 主成分 1 得分最高的是 Y-GZQZ, 为 4.167; 主成分 2 得分最高的是 Z-YNLJ, 为 3.498; 主成分 3 得分最高的是 Y-GZXR, 为 3.188。综合得分最高的是 Y-GZQZ, 最低的是 Z-YNMS; 不同野生品产地的综合得分普遍低于栽培品。

表 6 滇重楼药材中 6 种重金属元素的主成分矩阵

Table 6 Principal component matrix distances of six heavy metals in <i>P. polyphylla</i> var. <i>yunnanensis</i>				
种类 Type	主成分1 Component 1	主成分2 Component 2	主成分3 Component3	
Cu	0.901	-0.069	-0.006	
Cd	0.828	-0.196	-0.096	
Cr	0.047	-0.497	0.75	
Pb	0.779	-0.071	-0.361	
As	0.152	0.873	0.128	
Hg	0.497	0.345	0.626	
特征值 Characteristic value	2.376	1.176	1.109	
贡献率/% Contribution rate	39.604	19.595	18.488	
累计贡献率/% Cumulative rate	39.604	59.199	77.687	

表 7 滇重楼药材主成分得分、综合得分及其排序

Table 7 Main component score, comprehensive score and ranking of <i>P. polyphylla</i> var. <i>yunnanensis</i>					
产地 Origin	F1	F2	F3	F综	排序 Rank
Z-GZZJ	0.097	0.476	0.288	0.238	7
Z-GZZY	-0.074	0.555	0.006	0.103	10
Z-GZLL	0.490	-0.044	-0.041	0.229	8
Z-GZXY	0.139	0.658	1.699	0.641	5
Z-SCHD	0.913	0.145	1.294	0.810	4
Z-YNMS	-0.644	-0.376	-0.803	-0.614	25
Z-YNYM	-0.176	-0.787	0.181	-0.245	14
Z-YNBSPP	0.819	-0.336	-1.688	-0.069	11
Z-YNBSSZ	-0.336	0.534	0.658	0.120	9
Z-YNLL	-1.156	-0.132	-0.306	-0.695	26
Z-YNMS	-1.163	-0.305	-0.352	-0.754	27
Z-YNCL	-1.043	0.302	-0.510	-0.577	24
Z-YNYP	-0.593	-0.204	-0.511	-0.475	23
Z-YNYL	-0.400	0.222	-0.520	-0.272	16
Z-YNLJ	0.069	3.498	0.467	1.029	2
Z-YNJC	-0.083	-0.127	-0.510	-0.196	13
Y-GZASLG	-0.205	-0.600	-0.243	-0.314	18
Y-GZASAD	-0.624	-0.033	-0.449	-0.433	21
Y-GZQZ	4.167	-0.674	-0.814	1.760	1
Y-GZXR	0.459	-1.614	3.188	0.585	6
Y-GZXY	-0.236	-0.863	0.957	-0.110	12
Y-SCHD	0.213	-0.452	-1.700	-0.410	20
Y-YNCX	-0.287	-0.669	-0.666	-0.474	22
Y-YNBSPP	-0.381	-0.073	-0.246	-0.271	15
Y-YNCL	-0.565	-0.808	0.683	-0.329	19
Y-YNYP	-0.203	-0.621	-0.174	-0.302	17
Y-YNLJ	0.806	2.328	0.112	1.025	3

表 8 滇重楼根际土壤中 6 种重金属元素的主成分阵距

Table 8 Principal component matrix distances of six heavy metals in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

种类 Type	主成分1 Component 1	主成分2 Component 2	主成分3 Component 3	主成分4 Component 4
Cu	0.461	-0.432	-0.629	-0.092
Cd	0.823	-0.199	-0.119	0.11
Cr	0.422	0.725	-0.188	-0.178
Pb	0.447	0.242	0.54	-0.532
As	0.291	-0.545	0.638	0.142
Hg	0.275	0.391	0.147	0.812
特征值 Characteristic value	1.428	1.26	1.165	1.015
贡献率/% Contribution rate	23.806	20.994	19.424	16.91
累计贡献率/% Cumulative rate	23.806	44.8	64.224	81.134

表 9 滇重楼根际土壤主成分得分、综合得分及其排序

Table 9 Principal component scores, comprehensive scores and their order of rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

产地 Origin	F1	F2	F3	F4	F综	排序 Rank
Z-GZZJ	1.783	-2.174	-2.773	0.017	-0.699	27
Z-GZZY	2.400	-0.101	-0.634	0.643	0.660	3
Z-GZLL	-0.227	0.003	0.316	-0.378	-0.069	10
Z-GZXY	0.117	-0.186	-0.820	0.111	-0.187	15
Z-SCHD	-0.092	-0.190	-0.752	0.009	-0.255	18
Z-YNSM	1.721	2.895	-0.636	-0.769	0.942	2
Z-YNYM	-0.987	0.140	-0.188	-0.092	-0.318	21
Z-YNBSPP	-0.487	0.093	-0.364	0.416	-0.119	11
Z-YNBSSZ	0.685	1.409	0.912	4.068	1.632	1
Z-YNLL	-0.751	0.283	-0.180	-0.205	-0.233	16
Z-YNMS	-1.399	-0.190	0.389	0.330	-0.298	19
Z-YNCL	0.755	0.768	1.428	-2.365	0.269	7
Z-YNYP	-1.085	0.083	-0.229	-0.131	-0.379	22
Z-YNYL	-0.889	-0.253	-0.193	-0.143	-0.402	24
Z-YNLJ	0.056	-2.082	1.014	0.504	-0.175	14
Z-YNJC	1.197	0.495	0.832	-1.289	0.410	5
Y-GZASLG	-0.998	-0.076	0.021	-0.043	-0.316	20
Y-GZASAD	0.090	0.400	0.472	0.095	0.263	8
Y-GZQZ	0.342	0.321	0.288	-0.408	0.167	9
Y-GZXR	-0.156	0.288	-0.726	0.122	-0.120	12
Y-GZXY	-0.105	-0.098	-0.400	0.102	-0.130	13
Y-SCHD	-0.128	-0.740	-0.615	-0.235	-0.425	26
Y-YNCX	-0.412	0.067	-0.417	-0.241	-0.254	17
Y-YNBSPP	-0.348	0.561	0.840	0.222	0.291	6
Y-YNCL	-1.290	0.195	-0.094	-0.174	-0.387	23
Y-YNYP	-1.059	0.127	-0.439	-0.164	-0.417	25
Y-YNLJ	1.265	-2.039	2.948	-0.001	0.549	4

滇重楼根际土壤 6 种重金属主成分构成信息主要集中在前 4 个主成分, 见表 8 所示, 其特征值均 >1, 累积贡献率为 81.134%, 因此, 前 4 个主成分能反应滇重楼根际土壤 6 种重金属含量的基本特征. 对主成分 1、2、3 和 4 贡献较大的重金属分别是 Cd、Cr、As 和 Hg, 则造成不同产地滇重楼根际土壤重

金属含量差异较大的主要因素为 Cd、Cr、As 和 Hg。计算 4 个主成分得分, 并进行排序, 由表 9 可知, 主成分 1 得分最高的是 Z-GZZY, 为 2.40; 主成分 2 得分最高的是 Z-YNSM(云南省嵩明县栽培品), 为 2.895; 主成分 3 得分最高的是 Y-YNLJ, 为 2.948; 主成分 4 得分最高的是 Z-YNBSSZ, 为 4.068。综合得分最高的是 Z-YNBSSZ, 最低的是 Z-GZZJ; 不同产地野生品的综合得分普遍低于栽培品。

2.5 不同产地滇重楼药材对重金属元素富集系数

富集系数表示植物从土壤中吸收累积重金属元素的性能。当 $C<0.1$ 时表示强烈贫化, $C<0.5$ 时相对贫化, $0.5<C<1.5$ 时二者属同一水平, $C>1.5$ 时相对富集, $C>3$ 时强烈富集^[22]。由表 10 可知, 在 16 个栽培和 11 个野生产地采集的滇重楼计算得到的富集系数中, Cu 含量在各产地中除栽培产地 Z-YNLL 是相对富集, 其余产地均是强烈富集; Cd 在栽培产地 Z-GZZJ、Z-GZZY、Z-YNCL、Z-YNLJ 和野生产地 Y-GZASAD、Y-GZXY(贵州省兴义市野生品)、Y-YNBSPP(云南省保山市蒲缥镇野生品)、Y-YNLJ 是强烈贫化, Y-GZQZ 是二者属同一水平, 其余产地是相对贫化; Cr 在栽培产地 Z-GZZY、Z-YNSM 是强烈贫化, Z-YNLJ 是二者属同一水平, Z-YNMS 是强烈富集, 其余产地是相对贫化; Pb 在栽培产地 Z-YNSM、Z-YNBSSZ、Z-YNLL、Z-YNMS、Z-YNCL 和野生产地 Y-YNBSPP 是强烈贫化, Z-YNYM、Z-YNBSPP(云南省保山市蒲缥镇栽培品)和 Y-GZQZ、Y-GZXR、Y-SCHD、Y-YNYP 是二者属同一水平, 其余产地是相对贫化; As 在栽培产地 Z-YNYM、Z-YNLL、Z-YNCL、Z-YNYP、Z-YNYL(云南省云龙县栽培品)、Z-YNJC 和野生产地 Y-GZASLG(贵州省安顺市龙宫镇野生品)、Y-GZASAD、Y-GZQZ、Y-GZXY、Y-YNCL、Y-YNYP 是相对贫化, Z-YNBSPP、Z-YNMS 是二者属同一水平, Y-GZXR 是强烈富集, 其余产地均强烈贫化; Hg 在全部产地均强烈贫化。从总体上看, 栽培产地滇重楼的富集系数比野生产地的高。因此, 滇重楼药材栽培基地建设中需要严格控制土壤环境质量评价和选择, 且不能忽视滇重楼自身对特定重金属的累积特征。

表 10 富集系数
Table 10 Enrichment factors

No.	Cu	Cd	Cr	Pb	As	Hg
Z-GZZJ	3.998	0.062	0.357	0.257	0.085	0.064
Z-GZZY	13.340	0.042	0.080	0.118	0.032	0.036
Z-GZLL	43.251	0.174	0.291	0.159	0.085	0.070
Z-GZXY	8.589	0.125	0.224	0.100	0.088	0.072
Z-SCHD	23.327	0.196	0.259	0.305	0.098	0.075
Z-YNSM	4.136	0.252	0.043	0.035	0.037	0.002
Z-YNYM	30.897	0.325	0.356	0.574	0.417	0.020
Z-YNBSPP	29.859	0.133	0.181	1.146	0.668	0.004
Z-YNBSSZ	21.987	0.104	0.220	0.016	0.042	0.006
Z-YNLL	2.188	0.109	0.193	0.024	0.125	0.015
Z-YNMS	10.109	0.164	4.497	0.011	0.652	0.003
Z-YNCL	3.737	0.081	0.157	0.008	0.136	0.017
Z-YNYP	28.684	0.129	0.219	0.216	0.214	0.017
Z-YNYL	16.647	0.176	0.252	0.305	0.130	0.055
Z-YNLJ	12.849	0.093	0.582	0.348	0.073	0.084
Z-YNJC	11.281	0.173	0.171	0.048	0.122	0.020
Y-GZASLG	41.869	0.232	0.404	0.432	0.107	0.029
Y-GZASAD	11.235	0.087	0.220	0.105	0.113	0.011
Y-GZQZ	86.181	0.668	0.206	0.539	0.252	0.063
Y-GZXR	12.146	0.316	0.482	0.544	5.808	0.047
Y-GZXY	17.790	0.069	0.449	0.201	0.175	0.017
Y-SCHD	5.702	0.109	0.347	0.985	0.037	0.009
Y-YNCX	17.538	0.302	0.189	0.172	0.080	—
Y-YNBSPP	37.278	0.071	0.306	0.076	0.082	0.008
Y-YNCL	26.683	0.387	0.398	0.394	0.256	0.071
Y-YNYP	28.442	0.286	0.262	0.987	0.258	0.022
Y-YNLJ	24.762	0.057	0.385	0.238	0.033	0.064

楼药材重金属含量最高的是野生产地贵州省清镇市(Y-GZQZ), 最低的是栽培产地云南省芒市(Z-YNMS); 根际土壤重金属含量最高的是栽培产地云南省保山市水寨乡(Z-YNBSSZ), 最低的是栽培产地贵州省织金县(Z-GZZJ)。聚类分析表明栽培产地滇重楼药材及其根际土壤重金属含量与野生产地无明显区别。

参考文献 (References)

[1] 国家药典委员会. 中国药典(2020年版一部)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 271-272.
National Pharmacopoeia Commission. Ch. P (2020 edition)[S]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2020: 271-272 (in Chinese).

[2] 杨远贵, 张霁, 张金渝, 等. 重楼属植物化学成分及药理活性研究进展 [J]. 中草药, 2016, 47(18): 3301-3323.
ZHANG Y G, ZHANG J, ZHANG J Y, et al. Research progress in chemical constituents in plants of *Paris* L. and their pharmacological effects [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2016, 47(18): 3301-3323(in Chinese).

[3] 裴艺菲. 滇重楼多光谱指纹图谱结合化学计量学鉴别研究[D]. 昆明: 云南中医药大学, 2020.
PEI Y F. Identification research of *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* based on multi-spectral fingerprint combined with chemometrics[D]. Kunming: Yunnan University of Chinese Medicine, 2020 (in Chinese).

[4] 杨玲, 杨敏, 郭冬琴, 等. 混合丛枝菌根真菌接种时期对滇重楼幼苗内源激素含量的影响 [J]. 中草药, 2020, 51(13): 3535-3544.
YANG L, YANG M, GUO D Q, et al. Endogenous Hormone contents of the *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seedlings influenced by the inoculation time [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(13): 3535-3544(in Chinese).

[5] 朱晓东. 6种常用中药中重金属含量、形态分析与风险评价研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2020.
ZHU X D. Study on content analysis, speciation analysis and risk assessment of heavy metals in six common Chinese medicinal materials[D]. Urumqi: Xinjiang Medical University, 2020 (in Chinese).

[6] 石宗维, 张晓东, 卢志宏. 浅谈重金属在脊椎动物体内的富集与危害 [J]. 南方农业, 2020, 14(5): 116, 122.
SHI Z W, ZHANG X D, LU Z H. Accumulation and harm of heavy metals in vertebrates [J]. South China Agriculture, 2020, 14(5): 116, 122(in Chinese).

[7] 张晓南, 苏钰, 普冰清, 等. 重楼药材中重金属及有害元素含量测定及分析 [J]. 中药与临床, 2020, 11(1): 28-31.
ZHANG X N, SU T, PU B Q, et al. Determination and analysis of heavy metals and harmful elements in Chonglou [J]. Pharmacy and Clinics of Chinese Materia Medica, 2020, 11(1): 28-31(in Chinese).

[8] 李若诗, 袁会琼, 赵飞亚, 等. 不同产地不同种类重楼药材重金属元素的含量测定及分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(15): 30-36.
LI R S, YUAN H Q, ZHAO F Y, et al. Determination and analysis of heavy metals of *Paridis rhizoma* from different localities and pieces [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2019, 25(15): 30-36(in Chinese).

[9] 朱艳霞, 黄燕芬, 柯芳. 滇重楼中重楼皂苷和重金属含量的相关性研究 [J]. 中国医院用药评价与分析, 2017, 17(10): 1315-1318.
ZHU Y X, HUANG Y F, KE F. Study on correlation between content of polyphyllins and heavy metals in *Paris Polyphylla* var. *Yunnanensis* [J]. Evaluation and Analysis of Drug-Use in Hospitals of China, 2017, 17(10): 1315-1318(in Chinese).

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-35.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000: 14-35 (in Chinese).

[11] 黄小兰, 何旭峰, 周祥德, 等. 不同产地地参中22种元素的测定与分析 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 229-235.
HUANG X L, HE X F, ZHOU D X, et al. Determination and analysis of 22 elements in *Lycopus lucidus* var. *hirtus* Regel from different habitats [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 229-235(in Chinese).

[12] 蓝巧娟. 三峡库区消落带沉积物典型重金属迁移转化机理研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2019.
LAN Q J. Study on the migration and transformation mechanism of typical heavy metals in the sediment of the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2019 (in Chinese).

[13] 中华人民共和国国家标准委员会. 土壤中总汞的测定: GB/T 22105.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Standardization Administration of China. Determination of total mercury in soil: GB/T 22105.1—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).

[14] 国家药典委员会. 中国药典(2020年版四部)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 520-522.
National Pharmacopoeia Commission. Ch. P (2020 edition)[S]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2020: 520-522 (in Chinese).

[15] 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 (Cd, Hg, As, Cu, Pb) [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(4): 860-870(in Chinese).
- [16] 王骞, 邹佩宏, 杨敏, 等. 滇重楼根茎品质与根际土壤因子的相关性分析 [J]. *中草药*, 2020, 51(22): 5839-5849.
WANG Q, WU P H, YANG M, et al. Correlation analysis between rhizome quality and rhizosphere soil factors of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2020, 51(22): 5839-5849(in Chinese).
- [17] 生态环境部国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准: GB15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Ministry of ecology and environment, State Administration of market supervision and Administration. Soil environmental quality agricultural soil pollution risk control standard: GB15618—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).
- [18] 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. Effect of growth years to the soil enzyme activities and heavy metal residue of *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(9): 1966-1972(in Chinese).
- [19] 颜秋晓, 何腾兵, 高安勤, 等. 不同种植年限下山银花产地土壤及花蕾重金属污染特征 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 310-315, 328.
YAN Q X, HE T B, GAO A Q, et al. Heavy metal contamination characteristics of soil and buds of *Lonicerae Flos* in different planting years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 310-315, 328(in Chinese).
- [20] 余彦鸽, 张晓丹, 侯卓妮, 等. 不同产地野生丹参药材及其土壤无机元素的相关性研究 [J]. *浙江理工大学学报: 自然科学版*, 2017, 37(2): 289-296.
YU Y G, ZHANG X D, HOU Z N, et al. Correlation analysis of inorganic elements in *Salvia miltiorrhiza* Bunge growing wild in China and its soil from different places [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University: Natural Sciences Edition*, 2017, 37(2): 289-296(in Chinese).
- [21] 叶琪琪, 杜冰洁, 张鹏葛, 等. 新疆伊贝母有效成分含量与土壤因子相关性分析 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2017, 23(13): 41-47.
YE Q Q, DU B J, ZHANG P G, et al. Relations between soil factors and active ingredient content of *Fritillariae Pallidiflorae* bulbus in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2017, 23(13): 41-47(in Chinese).
- [22] 梅桂林, 王星星, 孙煜铮, 等. 石台县虎杖药材及其根际土壤中硒及重金属元素含量检测与相关性分析 [J]. *安徽中医药大学学报*, 2017, 36(1): 81-85.
MEI G L, WANG X X, SUN Y Z, et al. Determination and correlation analysis of selenium and heavy metal elements in *Polygonum cuspidatum* its rhizosphere soil in Shitai county, China [J]. *Journal of Anhui Traditional Chinese Medical College*, 2017, 36(1): 81-85(in Chinese).