

土壤无机元素化学形态与滇重楼主要有效成分相关性研究

施志芬^{1,2}, 盘付梅^{1,2}, 谷文超², 王光志^{1*}, 周 浓^{2*}

¹成都中医药大学 药学院, 成都 611130;

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:探究野生和栽培产地滇重楼根际土壤中 16 种无机元素的 5 种化学形态分布规律及其与药材品质的相关性, 为滇重楼科学化种植及药效功能的开发利用提供参考依据。采用 BCR 顺序提取法提取不同化学形态的无机元素, 采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 进行元素含量测定, 再利用 SPSS 软件进行相关性分析。滇重楼的野生品和栽培品的根际土壤中 16 种无机元素主要以残渣态为主, 且野生品和栽培品在各元素含量方面差异明显, 栽培品高于野生品; Ca、Mg 元素在水溶态和交换态中的含量明显高于其他元素, P、Mo 元素含量则较低; Ca、Mg、Fe、Al 元素在有机态和铁锰氧化态中的含量明显较高, 但 Na 元素未检测到; 相关性分析表明, 滇重楼中重楼皂苷的积累与根际土壤中的 P、K 元素呈显著的负相关关系, 与 Fe、Al、Se、Ba 等元素呈显著正相关关系。综上, 滇重楼根际土壤中的无机元素大部分以残渣态形式存在, P、K 元素的存在在一定程度上抑制了重楼皂苷的积累, Fe、Al、Se、Ba 等元素促进了重楼皂苷的积累。

关键词:滇重楼; 无机元素; 化学形态; 重楼皂苷; 相关性分析

中图分类号: R282.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-6880(2023)8-1380-13

DOI: 10.16333/j.1001-6880.2023.8.011

Correlation between the chemical forms of soil inorganic elements and the main active components of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

SHI Zhi-fen^{1,2}, PAN Fu-mei^{1,2}, GU Wen-chao², WANG Guang-zhi^{1*}, ZHOU Nong^{2*}

¹College of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611130, China;

²The 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: To explore the distribution of five chemical forms of 16 inorganic elements in the rhizosphere soils of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* in wild and cultivated areas and their correlation with the quality of medicinal materials, so as to provide a reference for the scientific planting of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and the development and utilization of its medicinal efficacy. Five elements were extracted by BCR sequential extraction method, determined by inductively coupled plasma mass spectrometry, and analyzed by SPSS software. The 16 kinds of inorganic elements in the rhizosphere soil of wild and cultivated samples in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* were mainly residues, and the content of wild samples and cultivated samples was significantly different, and the cultivated samples were higher than those of wild samples. The content of the same element in different forms is also different, the content of Ca and Mg elements in water-soluble and exchange states is significantly higher than that of other elements, the content of P and Mo elements is lower. The content of Ca, Mg, Fe and Al in organic and iron-manganese oxidation states were significantly higher, but Na element were not detected. Correlation analysis showed that the accumulation of polyphyllin in *P. polyphylla* var. *yunnanensis* showed a significant negative correlation with P and K elements in rhizosphere soil, and Ba, Al, Fe, Se elements were positively correlated with polyphyllin. To sum up, Most of the inorganic elements in the rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* exist in the form of residues, and the presence of P and K el-

收稿日期: 2022-11-18

接受日期: 2023-02-15

基金项目: 重庆市自然科学基金 (cstc2018jcyjAX0267); “成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目 (KJCX2020046)

* 通信作者 Tel: 86-28-61800231; E-mail: wangguangzhi@cducm.edu.cn, erhaizn@126.com

ements inhibits the accumulation of polyphyllin to a certain extent, Fe, Al, Se, Ba and other elements promote the accumulation of polyphyllin.

Key words: *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; inorganic elements; chemical form; polyphyllin; correlation analysis

滇重楼 (*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*) 为百合科多年生草本药用植物, 主要以干燥根茎入药, 性寒味苦, 具有清热解毒、凉肝定惊、抗肿瘤、抗炎等功效^[1-4]。近些年来, 由于制药产业的飞速发展, 市场对滇重楼的需求成倍增加, 而滇重楼药用部位生长缓慢, 且繁殖率低下, 导致野生滇重楼资源枯竭, 因此, 发展栽培种植品解决野生资源供应不足的问题已迫在眉睫。

元素形态分为物理和化学两种, 其中化学形态指元素在环境中实际存在的分子或离子形式, 与元素的富集性、迁移性及生物可利用性等密切相关^[5,6], 主要包括水溶态、交换态(弱酸提取态)、铁锰氧化态(可还原提取态)、有机态(可氧化提取态)、残渣态等^[7]。目前对土壤元素的研究主要集中在对其元素全量的探讨, 全量元素虽然能一定程度反映土壤元素总含量的高低, 但却不能直观反映出真正能被植物吸收利用的元素含量, 因此分析土壤中各元素形态的含量对了解某一地区元素分布状况将具有更加全面的意义。此外, 已有大量学者对中草药根际土壤中的各种重金属元素形态含量进行了探讨^[8-10], 却鲜少有对其他无机元素形态的分析。其中, Shen^[11]研究了丹参中无机元素的吸收和迁移规律, 发现丹参中的无机元素含量受根际元素形态

分配的影响较大, 主要受根际土壤中交换态、残渣态、有机态和铁锰氧化态含量的交互影响。这为滇重楼品质、根际土壤、元素形态迁移等相关方面的研究提供了很好的示范与借鉴。

本研究采用 BCR 顺序提取法提取各元素的化学形态, 采用电感耦合等离子体质谱法 (inductively coupled plasma mass, ICP-MS) 进行含量测定, 探究滇重楼野生品与栽培品的根际土壤中 16 种无机元素的分布规律及含量大小, 并与有效成分进行相关性分析, 以期为滇重楼合理施肥及规范化种植提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

从云南、贵州、四川 3 省采集野生滇重楼 11 份、栽培滇重楼 16 份, 样品信息见表 1, 详细产地信息及样品前期处理方法, 参照前期已有研究^[12]。

栽培品滇重楼前期栽培株大部分为种植户自己育苗提供, 因考虑到产业循环发展的需要以及对种植成本的考量, 少部分为根茎切块繁殖。种植方式为遮荫网种植, 并采用腐殖土、稻草、松针等进行覆盖处理, 有保湿防凉、冬天防冻的作用。种植期间, 每年至少施加两次肥料, 冬肥为氮磷钾复合肥, 春肥为经腐熟处理后的农家肥, 每一栽培产地具体施肥量不一。

表 1 样品来源

Table 1 Sample sources

栽培样品 Cultivated sample	产地 Collection location	野生样品 Wild sample	产地 Collection location
Zt-1	贵州省织金县以那	Yt-1	贵州省安顺市西秀区龙宫镇
Zt-2	贵州省紫云猫营	Yt-2	贵州省安顺市西秀区安大广城
Zt-3	贵州省龙里县大冲村	Yt-3	贵州省清镇市卫城镇坪寨村
Zt-4	四川省会东县平街村	Yt-4	贵州省兴仁县战马田村
Zt-5	云南省嵩明县老余屯村	Yt-5	贵州省兴义市七舍镇马格闹村
Zt-6	云南省易门县二街 15 组	Yt-6	四川省会东县老君滩乡平街村
Zt-7	云南省楚雄市吕合镇	Yt-7	云南省易门县二街 15 组
Zt-8	云南省保山市隆阳区蒲缥镇	Yt-8	云南省楚雄市吕合镇
Zt-9	云南省保山市隆阳区摆菜村	Yt-9	云南省保山市隆阳区蒲缥镇
Zt-10	云南省龙陵县龙新乡龙新村	Yt-10	云南省昌宁县大田坝乡湾岗村
Zt-11	云南省芒市江东乡大水沟村	Yt-11	云南省玉龙纳西族自治县

续表 1 (Continued Tab. 1)

栽培样品 Cultivated sample	产地 Collection location	野生样品 Wild sample	产地 Collection location
Zt-12	云南省昌宁县大田坝乡	Zt-15	云南省玉龙县白沙乡玉湖村
Zt-13	云南省永平县阿海寨村委会	Zt-16	云南省剑川县羊岑乡
Zt-14	云南省云龙县漕涧镇铁厂村		

1.2 试剂

16 种无机元素标准溶液 (1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$)、3 种内标单元素标准溶液 (1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$) 皆为国家标准样品, 采购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。冰醋酸、浓硝酸、盐酸羟胺、氢氟酸、乙酸铵均为购自于成都科龙公司的优级纯。

1.3 元素提取与测定

1.3.1 形态提取方法

元素形态提取采用震荡提取法, 除水溶态单独提取, 其余形态均采用 BCR 顺序提取^[13-15], 微波消解升温程序参照 Lan 等^[16]方法进行。

1.3.2 含量测定

以 Ge、Rh、Bi 为内标元素, 采用 ICP-MS 对各提取液中的 P、K、Na、Mg、Al、Ca、Fe、Cu 等元素含量进行测定。ICP-MS 使用参数设置: 射频功率 1 400 W; 载气流速: 1.224 L/min; 辅助气流量: 1.0 L/min; 冷却气流速: 14.0 L/min; 雾化温度: 2.0 $^{\circ}\text{C}$; 蠕动泵工作转速: 30 r/min; 采样深度 3.91 mm; 分析时长 26 s。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 滇重楼根际土壤水溶态元素含量分析

滇重楼根际土壤水溶态元素含量统计结果见表 2。由表可知, 无论野生滇重楼还是栽培滇重楼, 其土壤水溶态中含量居于前四位的都是 K、Mg、Ca 和 Na 元素。此外, 通过对两分组的对比, 发现 P、Na、K、Cu、Ca、Ba、Mo 等元素在栽培滇重楼根际土壤水溶态中的含量总体高于野生滇重楼。与野生滇重楼相比, 栽培滇重楼中的主要营养元素 K 和 P 都有了极大的提升, 其中 K 元素含量增加 218.53%, P 元素含量增加了 734.24%。从变异系数 (coefficient of variation, CV) (变异系数 = 数据的标准差/数据的平均值, 用以反映数据的离散程度) 来看, Al、Fe 元素在样品根际土壤水溶态中的变异系数皆超过 100%, 表明水溶态 Al、Fe 元素含量易受所在地环境影响。

表 2 滇重楼根际土壤水溶态元素含量统计

Table 2 Content of water soluble fraction elements in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	野生样品 Wild sample				栽培样品 Cultivated sample			
	变幅 Rangeability ($\mu\text{g}/\text{g}$)	极差 Range ($\mu\text{g}/\text{g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g}/\text{g}$)	变异系数 CV (%)	变幅 Rangeability ($\mu\text{g}/\text{g}$)	极差 Range ($\mu\text{g}/\text{g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g}/\text{g}$)	变异系数 CV (%)
P	0.188 ~ 7.419	7.231	2.167	136.88	0.717 ~ 53.839	53.122	18.078	79.00
K	27.660 ~ 135.038	107.378	60.909	51.80	33.534 ~ 535.025	501.491	194.015	70.66
Na	8.918 ~ 37.124	28.206	22.741	37.35	11.777 ~ 72.910	61.133	26.766	55.55
Mg	2.168 ~ 244.813	242.645	71.788	112.98	11.445 ~ 146.941	135.496	60.137	58.87
Al	1.236 ~ 79.864	78.628	12.980	175.03	0.191 ~ 33.191	33.000	7.050	134.88
Ca	1.002 ~ 1 287.052	1 286.05	435.021	109.22	57.12 ~ 1 562.031	1 504.91	550.004	91.24
Fe	0.414 ~ 38.705	38.291	7.165	157.32	0.032 ~ 20.688	20.656	4.679	112.02
Cu	0.010 ~ 0.202	0.192	0.083	67.41	0.051 ~ 0.336	0.285	0.136	55.04
Zn	0.020 ~ 1.023	1.003	0.331	87.50	0.041 ~ 1.335	1.294	0.317	94.26
Mn	0.108 ~ 5.068	4.960	2.702	67.44	0.169 ~ 3.429	3.260	1.186	77.33

续表 2(Continued Tab. 2)

元素 Element	野生样品 Wild sample				栽培样品 Cultivated sample			
	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)
Ba	0.023 ~ 0.340	0.317	0.181	52.44	0.049 ~ 2.034	1.985	0.344	141.13
Co	0.005 ~ 0.079	0.074	0.020	104.74	0.005 ~ 0.034	0.029	0.014	51.74
Ni	0.034 ~ 0.181	0.147	0.069	68.81	0.026 ~ 0.074	0.048	0.052	27.42
Se	0.012 ~ 0.050	0.038	0.027	45.30	0.007 ~ 0.069	0.062	0.021	76.59
Mo	0.003 ~ 0.079	0.076	0.031	76.72	0.005 ~ 0.483	0.478	0.088	136.26
Sb	0.018 ~ 0.108	0.009	0.079	36.20	0.007 ~ 0.117	0.110	0.029	106.70

2.2 滇重楼根际土壤交换态元素含量分析

滇重楼根际土壤交换态中各元素含量统计情况见表 3。由表可知,滇重楼根际土壤交换态中, Ca、Mg、Al 元素含量较高,交换态 Mo 元素在所有产地的检测中均未发现。此外,除 Na、Co、Mg、Mn、Ni、Se 元素以外,栽培滇重楼中其余元素均高于野生滇重

楼。土壤中交换态 K 元素含量极低,即使是在栽培土壤中,含量也没有明显提升。从变异系数来看, Mg、Ca 元素在两样品根际土壤水溶态中的变异系数皆超过 100%,表明交换态 Mg、Ca 元素含量易受所在地环境影响,在不同产地中的分散程度较大。

表 3 滇重楼根际土壤交换态元素含量统计

Table 3 Content of exchangeable fraction elements in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	野生样品 Wild sample				栽培样品 Cultivated sample			
	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)
P	0.327 ~ 90.726	90.399	20.641	132.84	2.516 ~ 293.919	291.403	125.334	72.95
K	0.094 ~ 0.458	0.364	0.218	51.66	0.159 ~ 1.163	1.004	0.480	60.48
Na	15.842 ~ 81.809	65.967	50.689	42.74	14.840 ~ 68.629	53.789	48.533	35.66
Mg	74.021 ~ 5745.330	5671.309	1086.001	154.29	58.210 ~ 4219.316	4161.106	509.646	199.03
Al	16.104 ~ 322.586	306.482	99.456	84.28	8.351 ~ 788.586	780.235	149.938	152.75
Ca	40.125 ~ 17253.001	17212.876	3519.110	135.20	56.258 ~ 28113.375	28057.117	3647.342	187.30
Fe	0.066 ~ 7.881	7.815	3.142	71.26	1.071 ~ 24.193	23.122	5.287	110.20
Cu	0.011 ~ 0.394	0.383	0.154	83.45	0.012 ~ 1.798	1.786	0.313	151.97
Zn	0.174 ~ 3.610	3.436	1.492	63.77	0.694 ~ 11.728	11.034	4.074	75.30
Mn	10.167 ~ 90.176	80.009	32.434	72.61	9.451 ~ 74.368	64.917	28.921	69.27
Ba	7.446 ~ 25.586	18.140	12.861	36.15	2.626 ~ 69.230	66.604	16.181	96.33
Co	0.236 ~ 1.157	0.921	0.701	37.84	0.231 ~ 1.468	1.237	0.684	49.75
Ni	0.305 ~ 1.583	1.278	0.674	53.30	0.288 ~ 1.582	1.294	0.622	53.84
Se	0.008 ~ 0.061	0.053	0.030	52.37	0.007 ~ 0.063	0.056	0.020	69.94
Mo	-	-	-	-	-	-	-	-
Sb	0.013 ~ 0.013	0.000	0.013	0.00	0.002 ~ 0.099	0.097	0.025	166.47

注:“-”表示未检测出,下同。

Note:“-” means not detected, the same below.

续表 5 (Continued Tab. 5)

元素 Element	野生样品 Wild sample				栽培样品 Cultivated sample			
	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)
Mg	22.315 ~ 1 116.257	1 093.942	310.001	114.110	7.216 ~ 1 543.001	1 535.785	317.120	150.330
Al	772.452 ~ 4 575.331	3 802.879	2 206.423	51.270	788.216 ~ 7 998.251	7 210.035	2 376.135	70.700
Ca	14.115 ~ 1 189.572	1 175.457	271.463	158.600	16.100 ~ 1 291.541	1 275.441	250.252	156.630
Fe	1 113.245 ~ 8 038.772	6 925.527	3 324.241	64.380	823.216 ~ 8 035.441	7 212.225	2 995.330	53.290
Cu	0.377 ~ 2.910	2.533	1.323	56.210	0.818 ~ 7.658	6.840	1.821	89.770
Zn	0.534 ~ 4.393	3.859	1.885	58.050	1.012 ~ 9.827	8.815	3.036	81.710
Mn	16.448 ~ 78.802	62.354	30.714	62.070	0.336 ~ 58.057	57.721	16.561	92.600
Ba	0.923 ~ 6.710	5.787	2.950	62.950	0.254 ~ 87.008	86.754	7.120	299.530
Co	0.158 ~ 0.942	0.784	0.403	55.110	0.095 ~ 0.741	0.646	0.337	62.380
Ni	0.436 ~ 1.784	1.348	1.057	43.620	0.128 ~ 1.706	1.578	0.886	49.610
Se	0.017 ~ 0.592	0.575	0.228	84.380	0.029 ~ 0.881	0.852	0.176	122.710
Mo	0.008 ~ 0.554	0.546	0.093	166.990	0.051 ~ 0.709	0.658	0.192	98.900
Sb	0.002 ~ 0.510	0.508	0.072	208.020	0.004 ~ 0.664	0.660	0.062	263.110

2.5 滇重楼根际土壤残渣态元素含量分析

滇重楼根际土壤残渣态元素含量统计结果见表 6。由表可知,以残渣态形式存在的土壤元素中,Fe、K、Al 等元素含量明显较高。此外,从整体元素含量高低来看,除 Al、Mg、Sb 以外,栽培滇重楼其他元素

含量皆高于野生滇重楼。从变异系数来看,两组中的 Mg、Se、Sb 元素变异系数皆大于 100%,表明以上残渣态元素在不同产地中的分散程度较大,元素含量受所在地环境影响较大。

表 6 滇重楼根际土壤残渣态元素含量统计

Table 6 Content of residual fraction elements in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	野生样品 Wild sample				栽培样品 Cultivated sample			
	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)	变幅 Rangeability ($\mu\text{g/g}$)	极差 Range ($\mu\text{g/g}$)	均值 Mean ($\mu\text{g/g}$)	变异系数 CV (%)
P	22.752 ~ 597.746	574.994	221.919	96.940	29.244 ~ 733.323	704.079	314.751	77.850
K	873.455 ~ 12 581.001	11 707.546	6 136.022	58.450	1 055.234 ~ 14 709.115	13 653.881	7 742.129	57.980
Na	93.445 ~ 1 920.311	1 826.866	650.453	85.070	282.315 ~ 4 644.132	4 361.817	1 289.283	103.530
Mg	11.656 ~ 849.428	837.772	140.065	173.220	5.880 ~ 564.407	558.527	120.901	140.470
Al	778.321 ~ 4 902.215	4 123.894	1 924.125	59.880	709.102 ~ 3 265.355	2 556.253	1 830.381	36.910
Ca	141.524 ~ 264.566	123.042	203.045	42.850	7.678 ~ 330.460	322.782	210.041	72.280
Fe	9 248.061 ~ 55 500.477	46 252.416	25 238.001	65.320	7 557.153 ~ 57 916.225	50 359.072	25 917.219	52.390
Cu	0.248 ~ 4.414	4.166	2.646	44.270	0.563 ~ 11.757	11.194	3.503	71.740
Zn	1.175 ~ 5.530	4.355	3.325	44.650	1.230 ~ 32.241	31.011	10.224	88.920
Mn	6.074 ~ 59.652	53.578	28.998	64.250	7.698 ~ 128.744	121.046	36.400	77.480
Ba	6.599 ~ 139.784	133.185	51.105	77.320	4.001 ~ 356.316	352.315	71.815	110.290
Co	0.130 ~ 1.791	1.661	0.833	60.870	0.347 ~ 1.671	1.324	1.011	42.590
Ni	0.604 ~ 4.873	4.269	1.838	64.430	1.012 ~ 6.272	5.260	2.196	56.970
Se	0.026 ~ 0.194	0.168	0.069	120.140	0.068 ~ 0.836	0.768	0.296	109.130
Mo	0.328 ~ 3.643	3.315	1.098	90.310	0.324 ~ 19.674	19.250	2.343	201.920
Sb	0.047 ~ 55.686	55.639	8.427	220.560	0.066 ~ 47.263	47.197	5.410	231.200

总的来看,所有化学形态元素含量均以 Ca、Mg、Al、Fe 等元素含量居多,Mo、Co、Se、Sb 等元素含量较少。大部分元素均以残渣态形式呈现,且栽培滇重楼的各个形态元素含量总体上高于野生滇重楼,其中,土壤中主要营养元素 K 和 P 均为栽培样品高于野生样品,表明人工栽培技术可以通过人为手段调控滇重楼生长的土壤环境,从而获取高产优质的滇重楼药材。

在前期对不同产地各形态元素研究的基础上^[17],结合具体产地来说,野生产地中,贵州省安顺市西秀区(Yt-1)的根际土壤水溶态、交换态、有机态元素丰富,其中水溶态 K、Na 交换态 Na、Al,有机态 P、K 元素含量相对较大;贵州省兴义市(Yt-5)和云南省玉龙纳西族自治县(Yt-11)铁锰氧化态和残渣态元素含量较大,Yt-5 中的铁锰氧化态 P、K 和残渣态 P 元素含量较大,Yt-11 中的铁锰氧化态 Mn 和残渣态 Mg 元素含量相对较大;栽培产地中贵州省织金县(Zt-1)的根际土壤中 5 种形态元素皆较为丰富,其中水溶态 K、Na、Mg 交换态 Na、Al,铁锰氧化态 P、K,有机态 P 和残渣态 P 元素含量较大;四川省会东县(Zt-4)水溶态、交换态、残渣态元素较为丰富,其中水溶态 P,交换态 K、Na,残渣态 P 元素含量较大;云南省玉龙县(Zt-15)有机态和残渣态元素较为丰富,其中有机态 P 和残渣态 P 元素含量相对较

大;贵州省龙里县(Zt-3)、云南省易门县(Zt-6)、云南省昌宁县(Zt-12)水溶态元素含量较丰富,其中皆为水溶态 K 元素含量较大。

2.6 相关性分析

在前期对不同滇重楼皂苷研究的基础上^[18],利用 SPSS 相关软件,对不同产地滇重楼根际土壤中的各元素形态与 9 种重楼皂苷进行相关性分析。并进一步挑选出各化学形态下与重楼皂苷有显著相关关系的化学元素,综合分析滇重楼根际土壤的不同化学形态元素与重楼皂苷的关系。

由表 7 可知,水溶态 P、K 元素与重楼皂苷 VII、H、V 有着显著负相关关系($P < 0.05$),P 元素又与重楼皂苷 I 有着极显著负相关关系($P < 0.01$),K 元素与重楼皂苷 I 呈显著负相关;在水溶态中含量较高的 Mg、Ca、Na 元素与有效成分之间的关系总体上来说不显著。含量相对较少的 Co、Ba、Se 元素与重楼皂苷的相关性反而更强一些,Co、Se 元素与重楼皂苷 VII 呈显著正相关($P < 0.05$),与重楼皂苷 II 呈显著负相关。Ba、Se 元素与重楼皂苷 VI 呈极显著正相关($P < 0.01$),Se 元素又与重楼皂苷 H 呈极显著正相关。总而言之,水溶态 P、K 元素在重楼皂苷的形成与累积过程中存在拮抗作用,Ba、Se 元素在一定程度上促进了重楼皂苷的形成与累积。

表 7 滇重楼根际土壤水溶态元素与重楼皂苷相关性分析

Table 7 Correlation analysis between water soluble fraction elements and polyphyllin in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	伪原薯 菟皂苷 Pseudoprotodioscin	重楼皂苷 VII Paris VII	重楼皂苷 H Paris H	重楼皂苷 VI Paris VI	重楼皂苷 II Paris II	薯蓣皂苷 Dioscin	纤细薯 菟皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
P	0.104	-0.385 *	-0.390 *	-0.294	0.043	-0.102	-0.178	-0.495 **	-0.449 *
K	0.020	-0.458 *	-0.487 *	-0.334	0.228	-0.159	-0.060	-0.457 *	-0.467 *
Na	0.078	-0.077	-0.003	0.052	-0.072	-0.159	-0.359	-0.360	-0.405 *
Mg	-0.071	0.236	0.318	0.321	-0.466 *	-0.120	-0.313	-0.226	-0.176
Al	-0.082	0.143	0.023	-0.010	-0.021	-0.090	0.261	-0.028	0.126
Ca	0.084	0.212	0.294	0.290	-0.173	-0.142	-0.111	-0.086	-0.094
Fe	-0.093	0.165	0.046	0.089	-0.008	-0.164	0.226	-0.124	0.043
Cu	-0.024	-0.056	0.034	0.250	-0.167	-0.101	-0.229	-0.346	-0.378
Zn	-0.319	0.337	0.395 *	0.192	-0.045	-0.250	0.233	-0.060	-0.073
Mn	-0.033	0.434 *	0.339	0.237	-0.281	-0.153	-0.349	-0.091	-0.041
Ba	-0.203	0.234	0.337	0.496 **	-0.320	-0.184	-0.145	-0.177	-0.066
Co	-0.142	0.454 *	0.423 *	0.473 *	-0.385 *	-0.167	-0.183	-0.125	-0.095
Ni	-0.126	0.197	0.160	0.197	-0.214	-0.208	-0.243	-0.312	-0.325

续表 7 (Continued Tab. 7)

元素 Element	伪原薯 蕈皂苷 Pseudoprotodioscin	重楼皂苷 VII Paris VII	重楼皂苷 H Paris H	重楼皂苷 VI Paris VI	重楼皂苷 II Paris II	薯蕈皂苷 Dioscin	纤细薯 蕈皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
Se	-0.136	0.444 *	0.634 **	0.621 **	-0.473 *	-0.170	-0.233	0.036	0.095
Mo	-0.111	-0.010	0.071	0.256	-0.076	-0.123	-0.164	-0.182	-0.193
Sb	0.232	0.237	0.152	0.144	-0.004	-0.224	-0.168	-0.177	-0.116

注: * 显著相关 ($P < 0.05$), ** 极显著相关性, 下表同。

Note: * Significant correlation ($P < 0.05$), ** Very significant correlation, the same below.

由表 8 可知,在重楼皂苷 I 的分析项下,交换态 P 元素与之呈极显著负相关;在薯蕈皂苷以及重楼皂苷 I 的分析项下,Al、Fe 元素皆与之呈极显著正相关;含量相对较少的交换态 K、Se 元素与重楼皂苷 VII、H 呈极显著相关关系,其中 K 元素与之皆呈极显著负相关,Se 元素与之皆呈极显著正相关;含

量和变异系数都较大的 Ca、Mg 元素,Ca 元素与总体有效成分间的相关性不显著,Mg 元素与重楼皂苷 VI、H 呈显著正相关关系。总而言之,交换态 P、K 元素对重楼皂苷的累积有拮抗作用,而交换态 Al、Fe 和 Se 元素对重楼皂苷的累积具有促进作用。

表 8 滇重楼根际土壤交换态元素与重楼皂苷相关性分析

Table 8 Correlation analysis between exchangeable fraction elements and polyphyllin in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	伪原薯 蕈皂苷 Pseudoprotodioscin	重楼皂苷 VII Paris VII	重楼皂苷 H Paris H	重楼皂苷 VI Paris VI	重楼皂苷 II Paris II	薯蕈皂苷 Dioscin	纤细薯 蕈皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
VP	0.182	-0.324	-0.368	-0.226	-0.008	-0.081	-0.217	-0.528 **	-0.471 *
K	-0.010	-0.519 **	-0.530 **	-0.417 *	0.277	-0.137	-0.003	-0.396 *	-0.422 *
Na	0.106	0.083	0.104	0.143	-0.087	-0.264	-0.357	-0.411 *	-0.304
Mg	-0.238	0.358	0.387 *	0.424 *	-0.382 *	-0.120	-0.284	0.007	0.104
Al	-0.210	-0.228	-0.099	-0.144	-0.310	0.703 **	0.102	0.604 **	0.344
Ca	-0.053	0.093	0.048	0.064	0.049	-0.087	-0.041	-0.029	-0.034
Fe	-0.009	-0.250	-0.205	-0.243	-0.130	0.832 **	-0.174	0.539 **	0.304
Cu	-0.001	-0.121	-0.077	0.139	-0.032	0.043	-0.206	-0.132	-0.214
Zn	-0.064	-0.106	-0.064	-0.096	-0.226	0.044	-0.117	-0.206	-0.105
Mn	0.236	-0.014	0.037	-0.002	-0.263	-0.179	-0.372	-0.364	-0.426 *
Ba	-0.232	0.171	0.299	0.428 *	-0.258	-0.230	-0.096	-0.113	-0.043
Co	0.081	-0.037	0.032	0.148	-0.010	-0.029	-0.044	-0.148	-0.154
Ni	-0.042	0.141	0.240	0.319	-0.293	0.045	-0.193	-0.013	-0.057
Se	-0.234	0.586 **	0.727 **	0.555 **	-0.466 *	-0.314	-0.197	-0.005	-0.026
Sb	0.195	-0.105	-0.125	-0.202	0.159	0.050	0.043	-0.150	-0.197

注:交换态中未检测出 Mo 元素,故未做相关性分析。

Note: Mo elements were not detected in the commutative state, so no correlation analysis was done.

由表 9 可知,在伪原薯蕈皂苷这一分析项下,铁锰氧化态 Mn 元素与之呈极显著正相关;综合重楼皂苷 VII、H、K 元素皆与之呈极显著负相关;综合重楼皂苷 I、V、K 元素与它们皆呈显著负相关;Mg、Se 元素与重楼皂苷 H 呈显著正相关,Ba、Se 元素与重楼皂苷 VI 有着显著正相关关系, Mg 元素与重楼

皂苷 VI 呈极显著正相关;Al 元素与重楼皂苷 I、薯蕈皂苷呈显著正相关关系;含量较高的 Ca、Fe 元素与有效成分间无显著的相关性;总而言之,铁锰氧化钛 K 元素在重楼皂苷的累积过程中有拮抗作用,铁锰氧化钛 Mg、Mn、Se、Al 元素对重楼皂苷的累积具有促进作用。

表 9 滇重楼根际土壤铁锰氧化态元素与重楼皂苷相关性分析

Table 9 Correlation analysis between Fe-Mn oxide fraction elements and polyphyllin in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	伪原薯蓣皂苷 Pseudoprotodioscin	重楼皂苷 VII Paris VII	重楼皂苷 H Paris H	重楼皂苷 VI Paris VI	重楼皂苷 II Paris II	薯蓣皂苷 Dioscin	纤细薯蓣皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
P	0.190	-0.360	-0.296	-0.224	-0.017	0.202	-0.146	-0.171	-0.255
K	0.180	-0.506 **	-0.488 **	-0.322	0.244	-0.064	-0.089	-0.412 *	-0.422 *
Mg	-0.263	0.345	0.409 *	0.512 **	-0.367	-0.136	-0.246	0.005	0.132
Al	0.140	-0.186	-0.014	-0.055	-0.245	0.446 *	-0.081	0.426 *	0.084
Ca	0.059	0.144	0.238	0.364	-0.230	-0.117	-0.250	-0.190	-0.119
Fe	0.172	-0.045	0.119	0.081	-0.242	0.072	0.083	0.192	0.008
Zn	-0.040	0.029	0.180	0.229	-0.341	-0.003	-0.075	-0.162	-0.075
Mn	0.534 **	-0.142	-0.138	-0.018	0.083	-0.137	-0.304	-0.171	-0.274
Ba	0.036	0.160	0.304	0.482 *	-0.230	-0.229	-0.217	-0.185	-0.107
Co	0.151	-0.110	-0.049	0.078	0.096	-0.213	-0.134	-0.166	-0.029
Ni	0.294	-0.071	0.036	0.244	-0.169	-0.028	-0.210	-0.372	-0.374
Se	-0.121	0.263	0.432 *	0.395 *	-0.380	-0.025	-0.031	0.143	0.085
Mo	-0.091	-0.086	-0.130	-0.056	0.167	-0.080	0.088	-0.114	-0.156
Sb	0.382 *	-0.170	-0.167	-0.155	0.264	-0.032	-0.007	-0.135	-0.285

注:铁锰氧化态中未检测出 Na、Cu 元素,故未做相关性分析。

Note: Na and Cu elements were not detected in the oxidation state of iron and manganese, so correlation analysis was not done.

由表 10 可知,有机态 Sb 元素与伪原薯蓣皂苷呈极显著正相关关系;在重楼皂苷 VII、VI 的分析项下,元素 K 皆与之呈显著负相关。在重楼皂苷 I 和薯蓣皂苷的分析项下,元素 K 皆与之呈显著正相关,元素 Al 皆与之呈极显著正相关;在重楼皂苷 VI

的分析项下,元素 Mn、Bb、Se 皆与之呈极显著正相关;Se 元素与重楼皂苷 II 呈极显著负相关;总而言之,有机态 K 和 Se 元素对不同的重楼皂苷呈现不同的作用,既有拮抗作用又有促进作用,而有机态 Al、Mn、Ba、Sb 元素对重楼皂苷的累积具有促进作用。

表 10 滇重楼根际土壤有机态元素与重楼皂苷相关性分析

Table 10 Correlation analysis between organic fraction elements and polyphyllin in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	伪原薯蓣皂苷 Pseudoprotodioscin	重楼皂苷 VII Paris VII	重楼皂苷 H Paris H	重楼皂苷 VI Paris VI	重楼皂苷 II Paris II	薯蓣皂苷 Dioscin	纤细薯蓣皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
P	0.281	-0.112	-0.006	0.062	-0.015	0.344	-0.196	0.252	0.059
K	-0.110	-0.425 *	-0.355	-0.474 *	0.260	0.402 *	0.225	0.455 *	0.326
Mg	0.099	-0.027	-0.010	-0.015	0.097	0.031	-0.077	0.035	-0.104
Al	0.029	-0.165	-0.037	-0.034	-0.241	0.774 **	-0.242	0.584 **	0.294
Ca	-0.051	0.265	0.368	0.413 *	-0.198	-0.126	-0.112	0.109	0.079
Fe	0.443 *	-0.042	0.019	0.122	-0.005	0.112	-0.208	0.044	-0.143
Cu	-0.121	0.099	0.253	0.306	-0.169	0.094	0.003	0.193	0.097
Zn	0.005	-0.039	-0.033	-0.024	-0.199	0.025	-0.243	-0.205	-0.117
Mn	0.181	0.349	0.403 *	0.492 **	-0.233	-0.194	-0.314	-0.057	0.115
Ba	-0.160	0.196	0.326	0.498 **	-0.286	-0.106	-0.177	-0.071	0.037
Co	0.118	0.348	0.389 *	0.474 *	-0.310	0.034	-0.270	0.032	-0.057
Ni	0.049	0.151	0.235	0.316	-0.167	0.105	-0.339	-0.041	-0.232
Se	-0.152	0.479 *	0.669 **	0.614 **	-0.561 **	-0.079	-0.155	0.148	0.155
Mo	-0.170	-0.085	0.028	0.269	-0.181	-0.103	-0.243	-0.259	-0.243
Sb	0.520 **	-0.187	-0.174	-0.175	0.279	0.007	-0.032	-0.108	-0.256

注:有机态中未检测出 Na 元素,故未做相关性分析。

Note: Na was not detected in the organic state, so no correlation analysis was done.

由表 11 可知,在伪原薯蓣皂苷的分析项下,残渣态元素 Sb 与之呈极显著正相关;在重楼皂苷 VII 的分析项下,元素 K 与之呈显著负相关;重楼皂苷 VI 的分析项下,元素 Na 与之呈显著负相关,元素 Se 与之呈显著正相关;重楼皂苷 II 和纤细薯蓣皂苷分

析项下,元素 K 皆与之呈显著正相关;与上述 4 种元素形态相比较而言,残渣态元素整体对重楼皂苷的影响不大。究其原因,残渣态元素大多存在于硅酸盐晶格之中,其存在形式不利于植物的吸收利用。

表 11 滇重楼根际土壤残渣态元素与重楼皂苷相关性分析

Table 11 Correlation analysis between residual fraction elements and polyphyllin in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

元素 Element	伪原薯蓣皂苷 Pseudoprotodioscin	重楼皂苷 VII Paris VII	重楼皂苷 H Paris H	重楼皂苷 VI Paris VI	重楼皂苷 II Paris II	薯蓣皂苷 Dioscin	纤细薯蓣皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
P	0.261	-0.003	0.113	0.240	-0.066	0.184	-0.198	0.099	-0.038
K	-0.047	-0.382 *	-0.359	-0.330	0.425 *	0.214	0.466 *	0.162	0.208
Na	0.074	-0.345	-0.323	-0.450 *	0.200	0.341	-0.039	0.134	-0.123
Mg	0.259	-0.089	-0.079	-0.079	0.179	0.033	-0.064	0.107	-0.125
Al	0.291	-0.078	0.031	0.050	0.149	0.104	0.019	0.240	-0.003
Ca	0.216	-0.012	0.022	-0.058	-0.145	-0.018	-0.175	-0.231	-0.285
Fe	0.289	0.099	0.170	0.251	0.032	-0.082	-0.116	-0.056	-0.229
Cu	0.020	0.065	0.229	0.249	0.009	-0.052	0.021	-0.042	-0.067
Zn	-0.115	-0.039	0.027	-0.027	-0.106	-0.099	-0.135	-0.136	-0.039
Mn	0.200	-0.190	-0.160	-0.189	-0.137	0.003	-0.227	-0.235	-0.285
Ba	-0.110	0.075	0.176	0.359	-0.035	-0.166	0.037	-0.134	0.011
Co	-0.231	0.043	0.167	0.101	-0.046	0.250	0.042	0.329	0.098
Ni	0.010	-0.234	-0.196	-0.110	0.052	0.070	-0.163	-0.194	-0.263
Se	-0.111	0.214	0.367	0.408 *	-0.186	-0.082	0.031	0.107	0.080
Mo	-0.007	-0.094	-0.048	0.150	0.038	-0.028	-0.168	-0.123	-0.192
Sb	0.645 **	-0.190	-0.161	-0.044	0.296	-0.003	-0.065	-0.098	-0.166

由表 12 可知,铁锰氧化态 Mn 元素,有机态和残渣态的 Sb 元素皆与伪原薯蓣皂苷呈极显著正相关;交换态 K 与铁锰氧化态 K 元素,皆与重楼皂苷 VII、H 呈极显著的负相关关系;水溶态和交换态 Se 元素与重楼皂苷 H、VI 呈极显著的正相关关系;水

溶态 Ba 元素,铁锰氧化态 Mg 以及有机态 Mn、Ba 元素皆与重楼皂苷 VI 呈极显著的正相关;交换态 Al、Fe 和有机态 Al 元素皆与薯蓣皂苷、重楼皂苷 I 呈极显著正相关关系;总的来说,滇重楼纤细薯蓣皂苷的形成受根际土壤无机元素的影响不大。

表 12 滇重楼根际土壤各化学形态重点元素与重楼皂苷相关性分析

Table 12 Correlation analysis between key elements of various chemical forms and polyphyllin in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

化学形态 Chemical form	元素 Element	伪原薯蓣皂苷 Pseudoprotodioscin	重楼皂苷 VII Paris VII	重楼皂苷 H Paris H	重楼皂苷 VI Paris VI	重楼皂苷 II Paris II	薯蓣皂苷 Dioscin	纤细薯蓣皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
水溶态 Water soluble	P	0.104	-0.385 *	-0.390 *	-0.294	0.043	-0.102	-0.178	-0.495 **	-0.449 *
	K	0.020	-0.458 *	-0.487 *	-0.334	0.228	-0.159	-0.06	-0.457 *	-0.467 *
	Co	-0.142	0.454 *	0.423 *	0.473 *	-0.385 *	-0.167	-0.183	-0.125	-0.095
	Ba	-0.203	0.234	0.337	0.496 **	-0.320	-0.184	-0.145	-0.177	-0.066

续表 12(Continued Tab. 12)

化学形态 Chemical form	元素 Element	伪原薯 蕈皂苷 Pseudopro- todiocsin	重楼 皂苷 VII Paris VII	重楼 皂苷 H Paris H	重楼 皂苷 VI Paris VI	重楼 皂苷 II Paris II	薯蕈皂苷 Dioscin	纤细薯 蕈皂苷 Gracillin	重楼皂苷 I Paris I	重楼皂苷 V Paris V
交换态 Exchange-able frac- tion	Se	-0.136	0.444 *	0.634 **	0.621 **	-0.473 *	-0.170	-0.233	0.036	0.095
	P	0.182	-0.324	-0.368	-0.226	-0.008	-0.081	-0.217	-0.528 **	-0.471 *
	K	-0.010	-0.519 **	-0.530 **	-0.417 *	0.277	-0.137	-0.003	-0.396 *	-0.422 *
	Al	-0.210	-0.228	-0.099	-0.144	-0.310	0.703 **	0.102	0.604 **	0.344
	Fe	-0.009	-0.250	-0.205	-0.243	-0.130	0.832 **	-0.174	0.539 **	0.304
铁锰氧化态 Fe-Mn Oxide fraction	Se	-0.234	0.586 **	0.727 **	0.555 **	-0.466 *	-0.314	-0.197	-0.005	-0.026
	K	0.180	-0.506 **	-0.488 **	-0.322	0.244	-0.064	-0.089	-0.412 *	-0.422 *
	Mg	-0.263	0.345	0.409 *	0.512 **	-0.367	-0.136	-0.246	0.005	0.132
	Mn	0.534 **	-0.142	-0.138	-0.018	0.083	-0.137	-0.304	-0.171	-0.274
	Se	-0.121	0.263	0.432 *	0.395 *	-0.38	-0.025	-0.031	0.143	0.085
有机态 Organic fraction	Al	0.140	-0.186	-0.014	-0.055	-0.245	0.446 *	-0.081	0.426 *	0.084
	K	-0.110	-0.425 *	-0.355	-0.474 *	0.260	0.402 *	0.225	0.455 *	0.326
	Al	0.029	-0.165	-0.037	-0.034	-0.241	0.774 **	-0.242	0.584 **	0.294
	Mn	0.181	0.349	0.403 *	0.492 **	-0.233	-0.194	-0.314	-0.057	0.115
	Ba	-0.160	0.196	0.326	0.498 **	-0.286	-0.106	-0.177	-0.071	0.037
残渣态 Residual fraction	Sb	0.520 **	-0.187	-0.174	-0.175	0.279	0.007	-0.032	-0.108	-0.256
	K	-0.047	-0.382 *	-0.359	-0.330	0.425 *	0.214	0.466 *	0.162	0.208
	Na	0.074	-0.345	-0.323	-0.450 *	0.200	0.341	-0.039	0.134	-0.123
	Se	-0.111	0.214	0.367	0.408 *	-0.186	-0.082	0.031	0.107	0.080
	Sb	0.645 **	-0.19	-0.161	-0.044	0.296	-0.003	-0.065	-0.098	-0.166

3 讨论与结论

元素形态是生态地球化学调查与评价的重要内容之一,是研究元素迁移和转化等循环规律的重要基础^[7]。研究表明,水溶态和交换态具有较高的生物有效性,在环境体系中极易迁移和转化而被植物吸收利用^[19]。结合本研究结果,水溶态中的 K 元素含量较高,其作为植物重要的营养元素之一,能够促进滇重楼的光合作用,调节植株体内细胞渗透压,增强植物对不良环境的适应能力。相比于野生滇重楼,栽培品中的 K 元素含量明显较高,说明了栽培地块中土壤肥力较好,这可能与栽培滇重楼的人工施肥有密切关系。但另一重要营养元素 P 在交换态和水溶态中的含量少,在有机态和残渣态中的含量高,在栽培地块的人工处理方面可以适当追施磷肥,提高土壤肥力。对一些有重要作用,但含量少或者是未检测出的元素,也应当采取施肥的措施来进行弥补,在交换态中并未检测出 Mo 元素,但 Mo 元素在滇重楼植株的光合作用、株高、根茎产量等方面

有着积极地促进作用。铁锰氧化态是元素与水合 Fe_2O_3 和 Mn_2O_3 生成结核体的一部分,其稳定度很差,研究表明这一形态重金属易通过还原反应从而被释放出来,对环境具有潜在威胁^[20]。有机态具有较强的化学键,在强氧化条件下才能分解,因此较为稳定^[21]。在这两种化学形态中, Ca、Mg、Al、Fe 等元素的含量较高,说明它们未与上述离子团结合或结合体不稳定,皆未检测出 Na 元素,说明处于游离状态的 Na^+ 在交换态提取过程中已被提取。残渣态是元素被包裹在矿物晶格中的一种形态,此形态十分稳定,不易被释放也不易被植物利用,是一种惰性形态^[22]。在本次的研究中,大部分元素以残渣态的形式存在,侧面反映了实际可以被利用的元素含量很低。不同产地各化学形态元素丰富度不一,同一元素的含量也不一致,有些甚至差异明显,这与产地所在地理环境,农业生产方式,栽培以及后期施肥管理等因素有关。对滇重楼野生和栽培品根际土壤中各元素化学形态的研究,直观的反映了土壤元素的有

效含量。

相关性分析表明,滇重楼药材的品质与其根际土壤元素有着密切的关系。营养元素对有效成分的作用不一定是正向的,就如水溶态、铁锰氧化态、交换态中的 P、K 元素,在促进滇重楼植株健康生长的同时也在一定程度上也对其有效成分的累积产生了一定的抑制作用。同一化学形态下的同一元素,对有效成分的作用不一定是单一的,就如有机态 K、Se 元素对有效成分的形成既有拮抗作用又有促进作用。不同化学形态下的不同种元素,对有效成分的作用趋势可能是一致的。就如不同化学形态下的 Al、Ba、Fe、Se 等元素与重楼皂苷呈显著的正相关关系,其中的 Se 元素贡献尤为突出,其交换态、水溶态以及有机态都对重楼皂苷 VI、VII、H 有极大促进作用。同时,Se 元素也是人体必需的微量营养元素^[23],近年来富 Se 产品受到广泛追捧。因此,在滇重楼的人工栽培过程种适当施加 Se 肥,能够提高其药用价值以及经济价值。残渣态元素因其自身特性,不易被植株吸收利用,与各有效成分的相关性也就远低于其他化学形态元素。因此,在进行土壤元素研究时,在研究全量元素的同时,也要注重对元素形态的分析,以便了解土壤元素的有效性。

药用植物的根际土壤,是植株与外界环境进行物质交换的直接媒介,是影响药用植物品质与产量的物质基础。根际土壤中的无机元素在中药材适宜种植区域的选择、规范化种植、品质形成与评价方面扮演着重要角色。因此探究各化学形态下的具体元素含量以及各元素与药材有效成分之间的关系就显得格外重要。本研究初步探究了滇重楼根际土壤各元素形态下的具体元素与重楼皂苷的关系,以期为滇重楼适宜生长区域的选择、规范化种植、品质形成与评价等方面提供参考。而关于不同产地滇重楼根际土壤中各无机元素是如何迁移与转化的相关问题仍需要进一步探究。

参考文献

- 1 Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Vol I (中华人民共和国药典:第一部) [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 271-272.
- 2 Meng W, Du J, Chen T, et al. The chemical constituents and abtineoplastic effects of *Paridis Rhizoma* [J]. Chem Life (生命的化学), 2020, 40: 70-74.
- 3 Nili JJ, Xu Y, Zeng R. Research on optimization of heavy

- building cultivation based on antiviral efficacy ingredients [J]. J Chin Prescrip Drug (中国处方药), 2018, 16: 41-42.
- 4 Xiong W, Chen SR, Xiu GH. Anti-inflammatory and protective effects of continuous intestine administration of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* on intestinal mucosal dysfunction [J]. Yunnan J Tradit Chin Med (云南中医中药杂志), 2017, 38: 68-71.
- 5 Yang T, Zhang XL, Ding XW. Advances studies of element formation impact on food safety [J]. Food Ferment Ind (食品与发酵工业), 2018, 44: 295-303.
- 6 Zhao XH, Wang B, Gong ZN, et al. Recent progress of capillary electrophoresis-inductively coupled plasma-mass spectrometry for element speciation analysis [J]. Nanotechnol Precis Eng (纳米技术与精密工程), 2017, 15: 486-493.
- 7 Yin W. Elemental speciation analysis and its application in environmental protection [J]. Mod Instrum Med Treat (现代仪器与医疗), 2014, 20: 14-19.
- 8 Lei M, Liao BH, Qin PF. Bioavailability evaluation of chemical forms of heavy metals in soil [J]. Ecol Environ Sci (生态环境学报), 2007, 16: 1551-1556.
- 9 Huang D, Yang YQ, Xiao XH. Technology for measuring bioavailability of heavy metals in soil [J]. Mod Chem Ind (现代化工), 2019, 39: 89-94.
- 10 Zhou GH. Recent progress in the study of bioavailability of heavy metals in soil [J]. Geophys Geochem Explor (物探与化探), 2014, 38: 1097-1106.
- 11 Shen XF. Uptake and translocation of inorganic element in *Salvia miltiorrhiza* Bge. [D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine (成都中医药大学), 2016.
- 12 Gu WC, Zhao SX, Yang M, et al. Simultaneous determination of amino acids in *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* fibril from different habitats by UPLC [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2020, 32: 1562-1575.
- 13 Rauret G, Lopez-Sanchez JF, Sahuquillo AS, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials [J]. J Environ Monit, 1999, 1: 57-61.
- 14 Rauret G, Lopez-Sanchez JF, Sahuquillo AS, et al. Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in a sewage sludge amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content [J]. J Environ Monit, 2000, 2: 228-233.
- 15 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Soil and sediment—Sequential extraction procedure of speciation of 13

- trace elements; GB/T25282-2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- 16 Lan QJ. Study on the migration and transformation mechanism of typical heavy metals in sediments in the extinction zone of the Three Gorges reservoir area [D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University(重庆三峡学院), 2019.
 - 17 Gu WC. Quality Evaluation of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* and Correlation between quality and soil elements [D]. Dali: Dali University(大理大学), 2021.
 - 18 Gu WC, Guo DQ, Yang M, et al. Determination of 9 steroidal saponins in rhizome and fibrous roots of wild and cultivated *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* by UPLC [J]. Tradit Chin Drug Res Clin Pharmacol(中药新药与临床药理), 2020, 31:838-847.
 - 19 Wang PD, Duan HL, Xie Y, et al. Research on biological of soil element in wheat-growing regions in Hetao plain, Inner Mongolia [J]. Safe Environ Eng(安全与环境工程), 2015, 22:72-78.
 - 20 Li DM. The release and speciation on arsenic of different types of gold mine tailings in Liaoning Dandong [D]. Beijing: China University of Geosciences(中国地质大学), 2014.
 - 21 Lv WY, Zhou SJ, Huang QN. Assessment of potential ecological risk from heavy metals in sediment in the Changzhou section of the Pearl River [J]. Water Resour Prot(水资源保护), 2009, 25:22-24.
 - 22 Li XL. Enrichment and migration characteristics of cadmium, copper and zinc in sludge composting amended soil and radish [D]. Lanzhou: Lanzhou University(兰州大学), 2017.
 - 23 Bai YL. The theory of plant healthy nutrition and healthy element [J]. J Plant Nutr Fert(植物营养与肥料学报), 2020, 26:1360-1366.
-
- (上接第 1313 页)
- 20 Wang JH, Xue BY, Liang AH, et al. Effects of β -eudesmol, an active constituent from *Rhizoma Atractylodis* on small intestinal movement in rats [J]. Chin Pharm J(中国药学杂志), 2002, 37:28-30.
 - 21 Ohara K, Fukuda T, Ishida Y, et al. β -Eudesmol, an oxygenized sesquiterpene, stimulates appetite via TRPA1 and the autonomic nervous system [J]. Sci Rep, 2017, 7:15785.
 - 22 Hu BH, Shao SH, Zhu HZ, et al. mechanism of β -eucalyptol inhibiting angiogenesis of endothelial cells [J]. Chin J Geriatr Heart Brain Vessel Dis(中华老年心脑血管病杂志), 2022, 24:192-196.
 - 23 Chen TY, Zhang P, Cheng Y. Research progress on determination method, dryness and pharmacological action of atractylone [J]. Chin Tradit Pat Med(中成药), 2022, 44:1902-1905.
 - 24 Cheng Y, Mai JY, Hou TL, et al. Antiviral activities of atractylon from *Atractylodis Rhizoma* [J]. Mol Med Rep, 2016, 14:3704-3710.
 - 25 Han NR, Moon PD, Nam SY, et al. Inhibitory effects of atractylone on mast cell-mediated allergic reactions [J]. Chem Biol Interact, 2016, 258:59-68.