

滇重楼根茎品质与根际土壤因子的相关性分析

王 骞^{1,2}, 邱佩宏¹, 杨 敏², 母茂君^{1,2}, 黄 瑜², 郭冬琴¹, 周 浓^{1*}

1. 重庆三峡学院 生物与食品工程学院, 三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室, 重庆 404120

2. 大理大学药学与化学学院, 云南 大理 671000

摘要:目的 探明野生与移栽滇重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* 根际土壤中基本养分、土壤酶活性与根茎品质的关系, 筛选影响滇重楼活性成分的主导土壤因子, 为滇重楼合理施肥提供参考依据。方法 以采自云贵川 33 个样点的滇重楼为材料, 测定了其根茎品质指标以及生长土壤基本养分含量和土壤酶活性; 分析了根茎品质指标与土壤因子的相关性, 并采用逐步回归分析方法筛选出影响滇重楼根茎品质的主要土壤因子。结果 滇重楼野生品和移栽品在总皂苷、总多糖、总黄酮含量上具有一定的差异, 药材品质具有一定的地域性。所有滇重楼根际土壤样品的酸碱度适中, 基本养分充足、含量丰富, 土壤酶活性高, 适宜于滇重楼的生长发育, 野生地土壤肥力质量优于移栽地。野生滇重楼根茎总皂苷与多酚氧化酶活性呈现出极显著正相关, 总黄酮与 pH 值、脲酶活性呈极显著负相关关系。移栽滇重楼根茎总皂苷与速效钾含量呈现出显著负相关, 总黄酮与蔗糖酶活性呈显著正相关关系, 总多糖与碱性磷酸酶活性呈显著正相关。结论 滇重楼品质主要受到土壤因子综合影响, 在滇重楼野外就地保护或人工栽培过程中, 注意根据实际情况增减土壤各养分的含量及其比例关系。

关键词: 滇重楼; 野生; 移栽; 总皂苷; 总多糖; 总黄酮; 土壤因子; 相关性

中图分类号: R282.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2020)22-5839-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2020.22.022

Correlation analysis between rhizome quality and rhizosphere soil factors of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

WANG Qian^{1,2}, WU Pei-hong¹, YANG Min², MU Mao-jun^{1,2}, HUANG Yu², GUO Dong-qin¹, ZHOU Nong¹

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

2. College of Pharmacy and Chemistry, Dali University, Dali 671000, China

Abstract: Objective To investigate the relationship between basic nutrient, the activity of soil enzyme and the quality of rhizome in the rhizosphere soil of wild and transplanted *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*, and select the primal soil factors affecting the active components of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, and provide the reference for the rational fertilization of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. **Methods** A total of 33 samples of rhizome and soil collected from *P. polyphylla* var. *yunnanensis* in Yunnan, Guizhou and Sichuan were used as materials. The basic nutrient, the activity of soil enzyme and the quality of rhizome of the samples were measured. On this basis, the correlation between the quality of rhizome and soil factor was analyzed. The primal soil factors affecting the quality of rhizome of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* were also selected by using the method of stepwise regression analysis. **Results** There were some differences in the contents of the total saponins, the total polysaccharides and the total flavonoids between the samples of wild and transplanted *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, and there were also regional characteristics in quality between them. In all the rhizosphere soil samples of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, the pH of the soil was moderate, the basic nutrient was sufficient and rich, and the activity of soil enzyme was high, which were suitable for the growth and development of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*. And the soil fertility quality of the wild *P. polyphylla* var. *yunnanensis* was better than the transplanted. The content of total saponins in the wild *P. polyphylla* var. *yunnanensis* was significantly positively correlated with the activity of polyphenol oxidase, and the content of total polysaccharides was significantly negatively correlated with the pH of the rhizosphere soil and the activity of urease. The content of

收稿日期: 2020-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (81260622); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2018jcyjAX0267); 云南省教育厅科学研究基金资助项目 (2018JS413)

作者简介: 王 骞 (1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为药用植物栽培与质量控制。E-mail: 775479372@qq.com

*通信作者 周 浓, 教授, 硕士生导师, 研究方向为药用植物栽培与质量控制。Tel: (023)58576130 E-mail: erhaizn@126.com

total saponins in the transplanted *P. polyphylla* var. *yunnanensis* was negatively correlated with the content of available potassium in rhizosphere soil, the content of total flavonoids was significantly positively correlated with the activity of sucrase, and the content of total polysaccharides was significantly positively correlated with the activity of alkaline phosphatase. **Conclusion** Based on the traditional evaluation, the quality of the transplanted *P. polyphylla* var. *yunnanensis* samples is equal to the wild samples, they can be used as the same in the market. The quality of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* is mainly affected by the soil factors. In the process of protecting wild *P. polyphylla* var. *yunnanensis* and cultivating *P. polyphylla* var. *yunnanensis*, it is need to be careful to increase and decrease the content and the ratio of soil nutrient according to the actual conditions.

Key words: *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; wild; transplanted; total saponin; total polysaccharide; total flavonoid; soil factors; correlation

滇重楼为百合科植物云南重楼 *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* (Franch.) Hand. -Mazz. 的干燥根茎, 是《中国药典》的重楼正品之一, 具有清热解毒、消肿止痛、凉肝定惊之功效^[1]。随着国内外医药界对重楼的需求日益增加, 药材价格飞涨, 巨大的消耗不可避免地要导致野生资源的枯竭, 目前滇重楼的生存状况堪忧^[2-3], 如何保护野生重楼资源, 科学发展滇重楼种植业, 已是当务之急。近年来, 随着对重楼需求量的逐年递增、滇重楼的自然资源匮乏, 人工栽培代替野生资源已成为发展趋势, 国内重楼种植业悄然兴起。据报道^[4], 滇重楼野生资源的生境差异明显, 不同生境下的滇重楼根茎质量差异比较大。诸多学者对滇重楼人工栽培后物候期、产量与品质开展了研究^[5-7], 栽培品的 4 种重楼皂苷含量普遍低于野生品且物候期缩短。因此, 人工栽培过程中滇重楼有效成分的形成与哪些因素相关? 如何在人工栽培中提高滇重楼有效成分含量? 这些问题对于规范化、规模化栽培滇重楼品质提升至关重要。

前期研究发现, 土壤因子在滇重楼主要甾体皂苷形成和积累过程中具有重要作用。杨永红等^[8]研究表明重楼皂苷VII含量与土壤有机质含量和pH值呈正相关, 重楼皂苷I含量与土壤速效磷含量呈负相关, 与土壤速效钾含量呈正相关, 重楼皂苷II含量与土壤有机质和速效钾含量呈正相关。王印等^[9]研究表明总皂苷和总多糖含量与土壤K含量呈显著正相关。何忠俊等^[10]研究表明总皂苷含量与经纬度呈显著负相关, 与土壤阳离子交换量呈显著正相关。因此, 选择适合滇重楼品质形成和积累的土壤条件进行种植是获得优质重楼药材的重要环节。然而, 目前关于滇重楼根茎活性成分含量与其根际土壤环境因子间关系的研究主要集中在不同产地野生资源的比较^[9-10]、不同产地栽培资源的比较^[8]、同一种源不同栽培基地比较实验^[4]等方面, 将野生与栽培(移栽)的关系割裂开来研究, 但未见结合

在一起的报道。为此, 本实验将野生滇重楼与同生境移栽滇重楼的根茎品质与其根际土壤理化性质相结合, 明确根茎总皂苷、总黄酮、总多糖含量与土壤因子相关性, 确定影响滇重楼品质的主要土壤因子, 从而为滇重楼的品质提升及引种栽培提供科学指导。

1 仪器与试剂

1.1 仪器

UV-2450 型紫外可见分光光度计(日本岛津集团); ML204 型分析天平(梅特勒-托利多仪器上海有限公司); FP640 型火焰光度计(上海悦丰仪器仪表有限公司); BS-2F 型振荡培养箱(江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司); PHB-10 型 pH 计(杭州奥龙仪器有限公司)。

1.2 试剂

对照品薯蓣皂苷元(批号 111539-200001)、芦丁(批号 100080-201409)、D-无水葡萄糖(批号 110833-201707)购于中国食品药品检定研究院。蒽酮、无水三氯化铝、二氧化硅、重铬酸钾、硫酸亚铁、甲基红、溴钾酚绿、氢氧化钠、硼酸、碳酸钾、甘油、乙酸铵、尿素、柠檬酸、氢氧化钾、硫酸铵、蔗糖、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、3,5-二硝基水杨酸、酒石酸钾钠、对硝基苯磷酸盐、明矾、高锰酸钾、邻苯三酚、高氯酸、浓硫酸、30%过氧化氢、次氯酸钠、甲醇、乙醇、正丁醇、三氯甲烷、石油醚(60~90℃)、甲苯、苯酚、丙酮、乙醚, 均为国产分析纯。

1.3 供试药材及土壤

滇重楼采集于贵州省安顺市西秀区龙宫镇等地, 由重庆三峡学院生物与食品工程学院周浓教授鉴定为百合科植物云南重楼 *P. polyphylla* Smith var. *yunnanensis* (Franch.) Hand. -Mazz. 的干燥根茎(表1)。滇重楼野生品(S1~S16)、移栽品(S17~S33)新鲜根茎及其根际土壤均按常规方法取样与处理^[8-11], 保证实验结果的一致性、准确性。

表 1 不同产地滇重楼样品信息

Table 1 Sample information of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* from different areas

编号	采集地点	经纬度	海拔/m	采集日期
S1	贵州省安顺市西秀区龙宫镇	26°5'42.15"/105°52'43.28"	1 178	2016-07-13
S2	贵州省安顺市紫云猫营	25°59'5.46"/106°4'50.9"	1 143	2016-07-14
S3	贵州省安顺市西秀区安大广城	26°15'50.06"/106°0'35.28"	1 410	2016-07-15
S4	贵州省清镇市卫城镇坪寨村	26°44'43.78"/106°22'57.08"	1 363	2016-07-16
S5	贵州省黔南州龙里县	26°27'47.29"/106°59'33.64"	1 080	2016-07-17
S6	贵州省兴义市兴仁县战马田村	25°32'46.94"/105°27'35.53"	1 515	2016-07-20
S7	贵州省兴义市七舍镇马格闹村	25°0'40.74"/104°49'10.82"	1 753	2016-07-21
S8	四川省会东县老君滩乡平街村	26°23'32.68"/102°57'55.67"	2 205	2016-08-04
S9	云南省昆明市官渡区大板桥镇一朵云村委会	24°59'19.37"/102°58'43.49"	2 308	2016-08-07
S10	云南省玉溪市易门县二街 15 组	24°58'38.89"/102°12'52.17"	1 893	2016-08-09
S11	云南省楚雄市吕合镇钱粮办事处杨巡部小组	25°07'55.62"/101°22'30.67"	1 871	2016-08-14
S12	云南省保山市隆阳区蒲缥镇黄泥村	25°02'09.58"/99°4'108.31"	2 298	2016-08-18
S13	云南省保山市昌宁县大田坝乡湾岗村	24°94'20.79"/99°56'52.25"	2 074	2016-08-19
S14	云南省大理白族自治州永平县阿海寨村委会海子汪张家组	25°21'27.85"/99°23'14.9"	1 925	2016-08-20
S15	云南省大理白族自治州云龙县漕涧镇铁厂村	23°30'18.65"/99°07'06.31"	2 268	2016-08-21
S16	云南省丽江市玉龙纳西族自治县白沙乡玉湖村	27°01'94.84"/100°22'01.55"	3 200	2016-08-22
S17	贵州省安顺市织金县以那	26°48'33.57"/105°38'57.71"	1 369	2016-07-12
S18	贵州省安顺市紫云猫营	25°59'01.08"/106°04'53.96"	1 148	2016-07-14
S19	贵州省黔南州龙里县大冲村	26°27'47.29"/106°59'33.64"	1 080	2016-07-18
S20	贵州省兴义市七舍镇马格闹村	25°00'40.74"/104°49'10.82"	1 753	2016-07-21
S21	四川省会东县老君滩乡平街村	26°23'43.21"/102°58'06.64"	2 073	2016-08-03
S22	云南省昆明市嵩明县杨林镇老余屯村	25°09'25.07"/103°02'31.33"	1 996	2016-08-08
S23	云南省玉溪市易门县二街 15 组	24°58'38.89"/102°12'52.17"	1 893	2016-08-09
S24	云南省楚雄市吕合镇钱粮办事处杨巡部小组	25°07'55.62"/101°22'30.67"	1 871	2016-08-14
S25	云南省保山市隆阳区蒲缥镇黄泥村委会熊家	25°02'09.58"/99°04'08.31"	2 298	2016-08-16
S26	云南省保山市隆阳区摆菜村	25°11'50.33"/99°19'15.87"	2 321	2016-08-16
S27	云南省保山市龙陵县龙新乡龙新村	24°32'12.82"/98°46'54.28"	1 842	2016-08-17
S28	云南省德宏州芒市江东乡大水沟村	24°29'24.79"/98°20'11.93"	1 936	2016-08-17
S29	云南省保山市昌宁县大田坝乡湾岗村	24°94'20.79"/99°56'52.25"	2 074	2016-08-19
S30	云南省大理白族自治州永平县阿海寨村委会海子汪张家组	25°21'08.71"/99°23'06.52"	1 829	2016-08-20
S31	云南省大理白族自治州云龙县漕涧镇铁厂村	25°34'57.29"/99°07'29.63"	2 172	2016-08-20
S32	云南省丽江市玉龙纳西族自治县白沙乡玉湖村	27°01'94.84"/100°22'01.55"	3 200	2016-08-22
S33	云南省大理白族自治州剑川县羊岑乡	26°48'42.07"/99°80'75.88"	2 944	2016-08-23

2 方法

2.1 根茎品质分析

总皂苷、总黄酮、总多糖的测定分别参照杨晓等^[12]、周浓等^[13-14]的方法基础上并稍加改进,即可。

2.2 根际土壤养分的测定方法和评价标准

5 种土壤养分的测定主要参照鲍士旦^[11]方法进行,采用碱解扩散法测定土壤中速效氮含量,采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定土壤中速效磷含量,采用醋酸铵-原子吸收法测定土壤中速效钾含量,采用重铬酸钾-氧化外加热法测定土壤中有机质

含量,采用常规方法测定 pH 值。同时根据全国第 2 次土壤普查养分分级标准^[15]进行评价。

2.3 根际土壤酶活性的测定

8 种土壤酶活性的测定主要参照松荫^[16]方法的基础上并稍加改进,用离心(5 000 r/min, 5 min)替代滤过。采用靛酚比色法测定土壤中脲酶活性,采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤中蔗糖酶活性,采用对硝基苯磷酸二钠法测定土壤中磷酸酶活性,采用紫外分光光度法测定土壤中过氧化氢酶活性,采用邻苯三酚比色法测定土壤中多酚氧化酶活性,采用改良

茛三酮比色法测定土壤中蛋白酶活性。

2.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 22.0 统计软件对实验数据进行 Pearson 相关分析、因子分析和逐步回归分析。

3 结果与分析

3.1 不同产地滇重楼根茎品质的比较

33 份野生和移栽滇重楼中总皂苷、总多糖、总黄酮的定量分析结果显示(表 2), 总黄酮在 3 种活性成分中含量最低, 3 种活性成分含量部分存在显著性差异 ($P < 0.05$)。野生品中总皂苷量为 11.635 mg/g (S4) ~ 30.464 mg/g (S15), 平均值为 20.410 mg/g, 最高量为最低量的 2.62 倍; 总多糖量为 55.928 mg/g (S14) ~ 266.310 mg/g (S4), 平均值为 155.293 mg/g, 最高量为最低量的 4.77 倍; 总黄酮量为 0.531 mg/g (S7) ~ 2.441 mg/g (S9), 平均值为 1.267 mg/g, 最高量为最低量的 4.60 倍。而移栽品中总皂苷量为 8.232 mg/g (S30) ~ 33.755 mg/g (S17), 平均值为 15.915 mg/g, 最高量为最低量的 4.10 倍; 总多糖量为 118.746 mg/g (S25) ~ 284.473 mg/g (S20), 平均值为 172.456 mg/g, 最高量为最低量的 2.40 倍; 总黄酮量为 0.446 mg/g (S31) ~ 4.120 mg/g (S17),

平均值为 1.088 mg/g, 最高量为最低量的 9.23 倍。整体上来说, 野生品中总皂苷、总黄酮平均含量高于移栽品, 而总多糖平均含量低于移栽品, 同时野生品的含量变化范围小于移栽品, 表明滇重楼人工栽培技术有待进一步探讨。

由表 2 还可知, 不同产地野生与移栽品中 3 种活性成分含量差异较大。结果表明, 野生品总皂苷含量平均值分别为云南省 (21.623 mg/g) > 贵州省 (19.835 mg/g) > 四川省 (14.872 mg/g), 总多糖含量平均值分别为四川省 (199.686 mg/g) > 贵州省 (165.754 mg/g) > 云南省 (140.591 mg/g), 总黄酮含量平均值分别为贵州省 (1.379 mg/g) > 云南省 (1.204 mg/g) > 四川省 (0.982 mg/g)。移栽品总皂苷含量平均值分别为贵州省 (18.694 mg/g) > 云南省 (15.118 mg/g) > 四川省 (14.364 mg/g), 总多糖含量平均值分别为贵州省 (197.877 mg/g) > 云南省 (166.239 mg/g) > 四川省 (134.399 mg/g), 总黄酮含量平均值分别为贵州省 (2.126 mg/g) > 四川省 (1.224 mg/g) > 云南省 (0.731 mg/g)。进一步表明滇重楼的品质受产地、环境因素影响较大, 表现出一定的地域以及生境依赖性。

表 2 不同产地滇重楼中总皂苷、总多糖和总黄酮的含量比较 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 2 Comparison of total saponins, total polysaccharides and total flavonoids in rhizome of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* from different areas ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)			编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)		
	总皂苷	总多糖	总黄酮		总皂苷	总多糖	总黄酮
S1	25.844±0.025 b	183.424±0.086 d	2.437±0.134 a	S18	14.446±0.017 ef	124.245±0.256 k	2.459±0.152 b
S2	29.894±0.087 a	114.460±0.135 i	1.352±0.063 c	S19	13.128±0.050 gh	230.100±0.068 c	0.969±0.028 ef
S3	15.905±0.036 e	223.519±0.043 b	1.505±0.043 b	S20	13.448±0.022 fgh	284.473±0.09119 a	0.956±0.100 ef
S4	11.635±0.013 g	266.310±0.203 a	1.265±0.030 c	S21	14.364±0.051 efg	134.399±0.05909 gh	1.224±0.090 cd
S5	17.765±0.027 e	106.284±0.320 j	0.940±0.041 de	S22	11.806±0.031 ij	219.817±0.089 d	1.067±0.007 de
S6	19.003±0.036 de	81.990±0.122 l	1.625±0.041 b	S23	18.290±0.027 d	153.714±0.225 f	0.501±0.044 ji
S7	18.800±0.015 de	184.289±0.427 d	0.531±0.029 g	S24	10.617±0.044 j	202.864±0.177 e	1.393±0.023 c
S8	14.872±0.014 f	199.686±0.386 c	0.982±0.069 de	S25	19.575±0.007 cd	118.746±0.263 l	0.701±0.024 ghi
S9	11.665±0.033 fg	136.184±0.253 h	2.441±0.221 a	S26	20.682±0.024 c	126.445±0.313 jk	0.820±0.028 fg
S10	19.117±0.025 e	174.131±0.288 e	1.166±0.124 c	S27	23.760±0.061 b	137.718±0.143 g	0.586±0.049 hij
S11	18.921±0.021 de	146.359±0.545 g	1.254±0.057 c	S28	12.580±0.080 hi	231.678±0.744 c	0.484±0.015 j
S12	29.212±0.012 a	205.623±0.095 c	0.841±0.027 ef	S29	11.086±0.026 j	240.396±0.068 b	0.565±0.018 hij
S13	19.717±0.031 cde	151.467±0.156 g	1.309±0.041 c	S30	8.232±0.005 k	150.512±0.089 f	0.467±0.015 j
S14	21.481±0.029 cd	55.928±0.290 m	0.857±0.041 e	S31	10.867±0.018 j	128.859±0.181 ij	0.446±0.043 j
S15	30.464±0.0266 a	158.736±0.519 f	1.137±0.026 cd	S32	19.163±0.001 d	130.703±0.191 hi	1.024±0.050 def
S16	22.410±0.036 c	96.302±0.064 k	0.624±0.047 fg	S33	14.754±0.014 e	153.416±0.112 f	0.718±0.038 gh
S17	33.755±0.031 a	151.791±0.141 f	4.120±0.058 a				

同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同

different lowercase letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level, same as below

3.2 不同产地滇重楼根际土壤化学指标的比较

3.2.1 根际土壤酸碱性的比较 33 份野生和移栽滇重楼根际土壤 pH 的结果 (表 3) 显示, 部分存在显著性差异 ($P < 0.05$)。野生品根际土壤 pH 值在 6.68 (S1) ~7.46 (S7), 平均值为 7.11; 移栽品根际土 pH

值在 6.63 (S29) ~7.46 (S17), 平均值为 7.14。结果表明, 无论野生品还是移栽品滇重楼根际土壤 pH 值均呈酸性或中性, 达到了滇重楼土壤最适 pH 值生长范围 (pH 值为 6.50~7.50)。可见土壤 pH 值对滇重楼产量、品质影响不大, 均能使其生长发育。

表 3 滇重楼不同产地根际土壤 pH 和基本养分含量比较 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)Table 3 Comparison of rhizosphere soil pH and basic nutrient content of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* from different areas ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

编号	pH 值	有机质/(g·kg ⁻¹)	速效氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
S1	6.68±0.02 h	49.305±0.018 gh	113.991±0.014 i	1.278±0.011 l	122.487±0.004 i
S2	7.12±0.03 de	82.279±0.034 cde	147.246±0.006 g	2.204±0.065 j	73.097±0.007 j
S3	7.17±0.06 cd	92.316±0.020 cd	319.545±0.000 a	7.760±0.065 d	126.392±0.003 i
S4	7.02±0.08 fg	51.811±0.041 gh	238.837±0.002 b	5.583±0.045 e	203.483±0.004 h
S5	7.02±0.05 efg	126.719±0.041 a	219.767±0.008 c	4.936±0.017 f	235.043±0.003 g
S6	6.96±0.03 fg	61.482±0.042 fg	167.325±0.028 f	2.158±0.040 jk	203.564±0.149 h
S7	7.46±0.02 a	76.745±0.019 def	127.532±0.058 h	77.386±0.023 b	606.454±0.170 a
S8	7.30±0.07 b	62.202±0.021 fg	123.533±0.014 h	3.037±0.024 hi	213.307±0.016 h
S9	6.92±0.02 g	80.975±0.024 cde	178.354±0.011 e	2.528±0.020 ij	610.444±0.010 a
S10	7.24±0.04 bc	42.015±0.044 hi	99.067±0.007 j	2.852±0.066 hi	359.505±0.004 d
S11	7.05±0.02 ef	37.633±0.016 hi	96.714±0.042 j	1.556±0.020 kl	316.088±0.003 e
S12	7.42±0.05 a	79.625±0.076 fg	163.798±0.043 f	3.153±0.011 h	505.676±0.127 c
S13	7.03±0.05 ef	29.294±0.076 i	184.453±0.018 e	4.264±0.041 g	580.628±0.011 b
S14	7.19±0.02 cd	70.165±0.060 ef	204.056±0.034 d	116.701±0.035 a	590.731±0.003 b
S15	7.20±0.08 cd	114.863±0.111 ab	230.868±0.017 b	8.282±0.010 d	278.519±0.006 f
S16	7.03±0.01 ef	97.989±0.016 bc	144.307±0.039 g	28.037±0.017 c	325.685±0.006 e
S17	7.46±0.04 a	56.834±0.016 f	182.338±0.038 c	82.256±0.034 g	308.148±0.006 m
S18	6.95±0.08 fg	97.635±0.050 b	219.191±0.018 a	33.638±0.022 n	207.490±0.006 n
S19	7.38±0.04 ab	26.655±0.016 h	128.802±0.014 hi	53.038±0.035 k	300.204±0.149 m
S20	7.33±0.06 bc	59.615±0.042 ef	198.243±0.051 b	89.278±0.024 e	877.145±0.005 e
S21	7.17±0.02 de	39.444±0.041 g	134.755±0.026 gh	55.810±0.029 j	1 208.801±0.162 c
S22	7.06±0.09 ef	11.178±0.034 i	195.184±0.008 b	8.268±0.035 p	942.460±0.151 d
S23	7.22±0.07 cd	27.838±0.020 h	124.598±0.020 i	8.777±0.020 p	723.049±0.144 h
S24	7.39±0.03 ab	56.392±0.022 f	146.288±0.012 ef	34.799±0.028 m	628.398±0.121 i
S25	6.69±0.05 h	63.708±0.023 e	109.785±0.004 j	148.212±0.063 a	716.889±0.006 h
S26	7.24±0.04 cd	81.483±0.082 d	108.969±0.025 j	36.650±0.040 l	733.080±0.007 h
S27	6.94±0.04 g	55.071±0.027 f	146.767±0.013 ef	64.194±0.023 i	418.737±0.119 k
S28	6.96±0.03 fg	55.562±0.021 f	215.126±0.005 a	12.156±0.026 o	499.642±0.003 j
S29	6.63±0.12 h	99.579±0.066 b	141.055±0.000 fg	80.777±0.044 h	843.282±0.003 f
S30	7.14±0.06 de	33.771±0.045 g	80.964±0.020 k	133.123±0.028 b	1 329.551±0.004 b
S31	7.24±0.02 cd	98.731±0.057 b	150.048±0.065 ef	111.140±0.046 c	1 365.839±0.004 a
S32	7.40±0.05 ab	91.313±0.083 c	150.629±0.026 e	87.384±0.052 f	331.759±0.006 l
S33	7.23±0.05 cd	140.989±0.012 a	166.592±0.029 d	104.342±0.052 d	784.290±0.117 g

3.2.2 根际土壤基本养分含量的比较 33 份野生和移栽滇重楼根际土壤的 4 种基本养分含量测定结果 (表 3) 显示, 部分存在显著性差异 ($P < 0.05$)。野生品根际土壤的有机质量为 29.294 g/kg (S13) ~126.719 g/kg (S5), 平均值为 72.214 g/kg, 根据全国第 2 次土壤普查制定的土壤养分分级标准^[15]可知, 除 S13 为 3 级、S11 为 2 级外, 其余均为 1 级土壤,

均属于中高等水平范围 (1~3 级)^[8]。而移栽品根际土壤的有机质质量分数为 11.178 g/kg (S22) ~140.989 g/kg (S33), 平均值为 64.459 g/kg, 除 S22 为 4 级、S19 和 S23 为 3 级、S21 和 S30 为 2 级外, 其余均为 1 级土壤。整体上来说, 野生品根际土壤有机质平均含量高于移栽品。

野生品根际土壤的速效氮质量分数为 96.714

mg/kg (S11) ~ 319.545 mg/kg (S3), 平均值为 172.462 mg/kg, 除 S1、S10、S11 为 3 级以及 S2、S7、S8、S16 为 2 级外, 其余均为 1 级土壤, 均属于中高等水平范围 (1~3 级)。而移栽品根际土壤的速效氮质量分数为 80.964 mg/kg (S30) ~ 219.191 mg/kg (S18), 平均值为 152.902 mg/kg, 除 S30 为 4 级、S25 和 S26 为 3 级以及 S19、S21、S23、S24、S27 和 S29 为 2 级外, 其余均为 1 级土壤。整体上来说, 野生品根际土壤速效氮平均含量高于移栽品。

野生品根际土壤的速效磷含量为 1.278 mg/kg (S1) ~ 116.701 mg/kg (S14), 平均值为 16.982 mg/kg, 其中 S7 和 S14 为 1 级, S16 为 2 级, S3、S4 和 S15 为 4 级, S5、S8、S12 和 S13 为 5 级, S1、S2、S6、S9、S10 和 S11 为 6 级。而移栽品根际土壤的速效磷含量为 8.268 mg/kg (S22) ~ 148.212 mg/kg (S25), 平均值为 67.285 mg/kg, 除 S22 和 S23 为 4 级, S28 为 3 级, S18、S24 和 S26 为 2 级外, 其余均为 1 级土壤。整体上来说, 移栽品根际土壤速效磷平均含量高于野生品。

野生品根际土壤的速效钾含量为 73.097 mg/kg (S2) ~ 610.444 mg/kg (S9), 平均值为 333.333 mg/kg, 除 S2 为 4 级、S1 和 S3 为 3 级外, 其余均为 1 级土壤。而移栽品根际土壤的速效钾含量为 207.490 mg/kg (S18) ~ 1 365.839 mg/kg (S30), 平均值为 718.751 mg/kg, 样品均为 1 级土壤。整体上来说, 移栽品根际土壤速效钾平均含量高于野生品。

3.2.3 根际土壤酶活性的比较 33 份野生和移栽滇重楼根际土壤的 8 种土壤酶活性测定结果显示 (表 4), 部分存在显著性差异 ($P < 0.05$)。野生品根际土壤的脲酶活性为 18.532 mg/g (S13) ~ 52.601 mg/g (S7), 平均值为 30.402 mg/g。移栽品根际土壤的脲酶活性为 11.971 mg/g (S22) ~ 38.993 mg/g (S24), 平均值为 26.666 mg/g。整体上来说, 野生品根际土壤脲酶活性平均含量高于移栽品。

野生品根际土壤的蔗糖酶活性为 0.089 mg/g (S13) ~ 5.471 mg/g (S12), 平均值为 2.440 mg/g。移栽品根际土壤的蔗糖酶活性为 0.787 mg/g (S29) ~ 5.434 mg/g (S33), 平均值为 3.247 mg/g。整体上来说, 移栽品根际土壤蔗糖酶活性平均含量高于野生品。

野生品根际土壤的酸性磷酸酶活性为 0.340

mg/g (S2) ~ 1.434 mg/g (S3), 平均值为 0.919 mg/g。移栽品根际土壤的酸性磷酸酶活性为 0.237 mg/g (S19) ~ 1.297 mg/g (S33), 平均值为 0.651 mg/g。整体上来说, 野生品根际土壤的酸性磷酸酶活性平均含量高于移栽品。

野生品根际土壤的中性磷酸酶活性为 0.027 mg/g (S13) ~ 0.109 mg/g (S3), 平均值为 0.071 mg/g。移栽品根际土壤的中性磷酸酶活性为 0.014 mg/g (S22) ~ 0.107 mg/g (S33), 平均值为 0.059 mg/g。整体上来说, 野生品根际土壤的中性磷酸酶活性平均含量高于移栽品。

野生品根际土壤的碱性磷酸酶活性为 0.002 mg/g (S13) ~ 1.576 mg/g (S5), 平均值为 0.595 mg/g。移栽品根际土壤的碱性磷酸酶活性为 0.097 mg/g (S22) ~ 1.058 mg/g (S18), 平均值为 0.478 mg/g。整体上来说, 野生品根际土壤的碱性磷酸酶活性平均含量高于移栽品。

野生品根际土壤的过氧化氢酶活性为 0.533 mg/g (S13) ~ 0.769 mg/g (S15), 平均值为 0.677 mg/g。移栽品根际土壤的过氧化氢酶活性为 0.319 mg/g (S27) ~ 0.726 mg/g (S18), 平均值为 0.585 mg/g。整体上来说, 野生品根际土壤的过氧化氢酶活性平均含量高于移栽品。

野生品根际土壤的多酚氧化酶活性为 2.456 mg/g (S9) ~ 19.704 mg/g (S2), 平均值为 8.552 mg/g。移栽品根际土壤的多酚氧化酶活性为 2.378 mg/g (S22) ~ 18.313 mg/g (S19), 平均值为 10.176 mg/g。整体上来说, 移栽品根际土壤多酚氧化酶活性平均含量高于野生品。

野生品根际土壤的蛋白酶活性为 0.250 mg/g (S11) ~ 0.502 mg/g (S3), 平均值为 0.380 mg/g。移栽品根际土壤的蛋白酶活性为 0.263 mg/g (S22) ~ 0.454 mg/g (S31), 平均值为 0.370 mg/g。整体上来说, 野生品根际土壤蛋白酶活性平均含量稍高于移栽品。

3.3 不同产地滇重楼根际土壤酶活性和土壤养分之间的相关性

16 份野生滇重楼根际土壤酶活性与土壤养分之间的相关性分析结果 (表 5), 两者具有一定的相关性。结果表明, 根际土壤脲酶活性与 pH 值、有机质含量呈显著正相关 ($r = 0.521$ 、 $r = 0.618$, $P < 0.05$), 与速效磷含量呈极显著正相关 ($r = 0.650$, $P < 0.01$); 根际土壤蔗糖酶活性与 pH 值、有机质含

表 4 滇重楼不同产地根际土壤酶活性的比较 ($\bar{x} \pm s, n=3$)Table 4 Comparison of activities of soil enzyme in rhizosphere soil of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* from different areas ($\bar{x} \pm s, n=3$)

编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)						
	脲酶	蔗糖酶	酸性磷酸酶	中性磷酸酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶
S1	24.897±0.012 defg	0.578±0.024 fg	0.508±0.031 g	0.054±0.006 h	0.126±0.019 hi	0.615±0.016 h	3.537±0.015 fgh
S2	31.254±0.013 bcd	2.579±0.053 cd	0.340±0.007 h	0.089±0.004 bc	0.866±0.056 d	0.699±0.010 de	19.704±0.065 a
S3	30.863±0.021 cdef	3.890±0.068 b	1.434±0.026 a	0.109±0.001 a	1.477±0.033 b	0.680±0.019 ef	9.098±0.016 cd
S4	18.825±0.013 defg	0.565±0.035 fg	0.984±0.057 c	0.062±0.008 gh	0.115±0.016 hi	0.595±0.022 hi	5.596±0.024 ef
S5	40.461±0.009 bc	3.781±0.071 b	1.423±0.031 a	0.087±0.003 cd	1.576±0.011 a	0.710±0.009 cd	6.473±0.031 e
S6	20.390±0.028 fg	0.954±0.034 efg	0.937±0.039 d	0.066±0.003 fg	0.052±0.002 ij	0.654±0.011 g	6.626±0.016 de
S7	52.601±0.013 a	5.497±0.042 a	0.981±0.021 cd	0.075±0.012 ef	1.020±0.008 c	0.689±0.003 def	12.336±0.022 c
S8	23.233±0.026 efg	0.988±0.014 ef	0.824±0.020 e	0.058±0.006 gh	0.128±0.002 hi	0.672±0.009 fg	4.439±0.018 efg
S9	21.909±0.021 efg	2.590±0.028 cd	1.051±0.060 c	0.105±0.005 a	0.231±0.037 g	0.702±0.014 cde	2.456±0.015 h
S10	22.547±0.010 efg	1.786±0.093 de	0.668±0.021 f	0.033±0.004 i	0.129±0.002 hi	0.704±0.003 cde	2.920±0.016 gh
S11	18.532±0.009 g	1.611±0.019 e	0.638±0.037 f	0.031±0.002 i	0.142±0.003 h	0.578±0.017 i	5.389±0.056 efg
S12	42.469±0.015 bcd	5.471±0.011 a	1.039±0.031 c	0.079±0.006 cde	0.994±0.025 c	0.725±0.001 bc	15.066±0.064 b
S13	18.532±0.013 g	0.089±0.006 g	0.446±0.021 g	0.027±0.003 i	0.002±0.001 j	0.533±0.011 j	9.355±0.093 c
S14	43.591±0.012 ab	2.868±0.052 c	1.011±0.004 c	0.077±0.002 def	0.421±0.019 f	0.762±0.016 a	9.461±0.023 c
S15	32.925±0.029 bcde	3.135±0.030 bc	1.214±0.045 b	0.098±0.002 ab	1.542±0.014 ab	0.769±0.009 a	14.964±0.027 b
S16	43.301±0.012 ab	2.661±0.035 cd	1.210±0.061 b	0.089±0.007 bc	0.693±0.048 e	0.746±0.011 ab	9.406±0.022 c
S17	36.154±0.089 gh	5.236±0.047 a	0.853±0.080 bc	0.038±0.001 fg	0.740±0.036 e	0.678±0.011 bc	8.686±0.047 g
S18	32.919±0.078 d	5.244±0.053 a	0.707±0.071 ef	0.101±0.002 a	1.058±0.035 a	0.726±0.001 a	13.683±0.039 d
S19	18.593±0.000 hi	1.594±0.065 d	0.237±0.023 l	0.029±0.002 gh	0.289±0.016 h	0.667±0.005 bc	18.313±0.032 b
S20	35.075±0.009 c	5.043±0.072 a	0.709±0.027 ef	0.072±0.004 c	0.853±0.011 c	0.670±0.021 bc	8.378±0.024 g
S21	33.121±0.034 d	5.047±0.032 a	0.582±0.047 hi	0.046±0.006 ef	0.400±0.028 g	0.652±0.012 bcd	10.077±0.116 f
S22	11.971±0.017 k	2.129±0.018 d	0.352±0.025 k	0.014±0.001 i	0.097±0.001 l	0.351±0.021 h	2.378±0.015 k
S23	29.398±0.030 e	3.054±0.018 c	0.376±0.024 k	0.027±0.004 h	0.286±0.009 hi	0.535±0.009 e	12.188±0.078 e
S24	38.993±0.012 a	4.194±0.018 b	0.588±0.032 hi	0.087±0.008 b	0.760±0.006 e	0.680±0.003 bc	19.836±0.012 a
S25	26.361±0.045 f	4.109±0.085 b	0.655±0.030 fgh	0.059±0.005 d	0.379±0.003 g	0.519±0.055 ef	7.915±0.045 gh
S26	33.121±0.034 d	1.815±0.031 d	0.665±0.001 fg	0.062±0.010 d	0.468±0.015 f	0.641±0.009 cd	11.210±0.039 ef
S27	17.552±0.010 i	0.850±0.027 e	0.460±0.006 j	0.058±0.002 d	0.092±0.007 l	0.319±0.026 h	4.824±0.024 j
S28	19.510±0.034 h	2.066±0.169 d	0.5512±0.020 i	0.061±0.005 d	0.137±0.002 k	0.423±0.014 g	6.524±0.018 i
S29	15.693±0.017 j	0.787±0.097 e	0.796±0.040 cd	0.055±0.004 de	0.178±0.001 j	0.487±0.010 f	4.825±0.091 j
S30	18.044±0.068 i	1.671±0.080 d	0.598±0.022 ghi	0.056±0.003 de	0.254±0.006 i	0.639±0.009 cd	16.925±0.103 c
S31	24.599±0.009 g	2.951±0.050 c	0.761±0.016 de	0.060±0.006 d	0.450±0.019 f	0.613±0.017 d	10.331±0.101 f
S32	25.482±0.045 fg	3.983±0.052 b	0.887±0.011 b	0.075±0.002 c	0.812±0.007 d	0.687±0.019 ab	6.729±0.023 hi
S33	36.744±0.041 b	5.434±0.018 a	1.297±0.026 a	0.107±0.006 a	0.904±0.008 b	0.664±0.030 bc	11.671±0.078 e

量呈极显著正相关 ($r=0.642$ 、 $r=0.642$, $P<0.01$); 根际土壤酸性磷酸酶活性与有机质、速效氮含量呈极显著正相关 ($r=0.747$ 、 $r=0.646$, $P<0.01$); 根际土壤中磷酸酶、碱性磷酸酶活性与有机质含量呈极显著正相关 ($r=0.854$ 、 $r=0.869$, $P<0.01$), 与速效氮含量呈显著正相关 ($r=0.586$ 、 $r=0.533$, $P<0.05$); 根际土壤过氧化氢酶活性与有机质含量呈极显著正相关 ($r=0.743$, $P<0.01$); 根际土壤蛋白酶活性与有机质含量和速效氮含量呈极显著正相关 ($r=0.806$ 、 $r=0.718$, $P<0.01$)。17 份移栽滇重楼根际土壤酶活性与土壤养分之间的相关性分析结果 (表 6), 两者具

有一定的相关性。结果表明, 根际土壤脲酶活性与 pH 值呈显著正相关 ($r=0.487$, $P<0.05$); 根际土壤酸性磷酸酶活性与有机质含量呈极显著正相关 ($r=0.869$, $P<0.01$), 与速效磷含量呈显著正相关 ($r=0.501$, $P<0.05$); 根际土壤中磷酸酶活性与有机质含量呈极显著正相关 ($r=0.783$, $P<0.01$); 根际土壤蛋白酶活性与有机质含量呈极显著正相关 ($r=0.793$, $P<0.01$)。

3.4 不同产地滇重楼根茎品质与根际土壤因子的相关性分析

16 份野生滇重楼根际土壤酶活性与土壤养分

表 5 滇重楼野生品根际土壤酶活性与土壤养分含量的相关性

Table 5 Correlation between soil enzyme activities and nutrient contents in rhizosphere soil of wild *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

土壤养分	相关系数							
	脲酶	蔗糖酶	酸性磷酸酶	中性磷酸酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶	蛋白酶
pH	0.521*	0.642**	0.205	0.090	0.372	0.403	0.471	0.057
有机质	0.618*	0.642**	0.747**	0.854**	0.869**	0.743**	0.395	0.806**
速效氮	0.087	0.205	0.646**	0.586*	0.533*	0.153	0.179	0.718**
速效磷	0.650**	0.361	0.177	0.136	0.090	0.386	0.184	-0.001
速效钾	0.308	0.306	0.046	-0.094	-0.140	0.101	-0.013	-0.286

*表示显著相关 ($P < 0.05$); **表示极显著相关 ($P < 0.01$), 下表同* indicates a significant correlation ($P < 0.05$); ** indicates a very significant correlation ($P < 0.01$), same as below tables

表 6 滇重楼移栽品根际土壤酶活性与土壤养分含量的相关性

Table 6 Correlation between soil enzyme activities and nutrient contents in rhizosphere soil of transplanted *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

土壤养分	相关系数							
	脲酶	蔗糖酶	酸性磷酸酶	中性磷酸酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶	蛋白酶
pH	0.487*	0.367	0.066	-0.010	0.319	0.587*	0.450	-0.197
有机质	0.358	0.302	0.869**	0.783**	0.025	0.329	-0.066	0.793**
速效氮	0.115	0.363	0.155	0.228	0.332	-0.083	-0.356	-0.087
速效磷	0.036	0.164	0.501*	0.261	-0.056	0.253	0.031	0.439
速效钾	-0.125	-0.103	0.045	-0.157	-0.113	-0.054	-0.004	0.241

之间的相关性分析结果(表 7), 两者具有一定的相关性。结果表明, 野生品总皂苷含量与多酚氧化酶的活性呈极显著正相关 ($r=0.726$, $P < 0.01$); 总黄酮含量与根际土壤的 pH 值、脲酶活性呈极显著负相关 ($r=-0.748$ 、 $r=-0.623$, $P < 0.01$)。由此可见, 滇重楼野生状态下根际土壤中多酚氧化酶活性

越大, 总皂苷含量越大; 根际土壤 pH 值越大、脲酶活性越大, 总黄酮的含量越少。17 份移栽滇重楼根际土壤酶活性与土壤养分之间的相关性分析结果(表 8), 两者具有一定的相关性。结果表明, 移栽品总皂苷含量与速效钾的含量呈显著负相关 ($r=-0.521$, $P < 0.05$); 总多糖含量与碱性磷酸酶活性呈

表 7 滇重楼野生品根茎品质指标与其根际土壤化学指标的相关系数

Table 7 Correlation coefficient between rhizome quality and rhizosphere soil chemical index of wild *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

土壤因子	相关系数		
	总皂苷	总多糖	总黄酮
pH	0.134	0.216	-0.748**
有机质	0.233	-0.227	-0.249
速效氮	-0.178	0.176	0.023
速效磷	0.016	-0.366	-0.451
速效钾	-0.136	-0.186	-0.217
脲酶	0.360	-0.235	-0.623**
蔗糖酶	0.271	-0.001	-0.456
酸性磷酸酶	-0.238	0.014	0.274
中性磷酸酶	0.107	-0.116	0.030
碱性磷酸酶	0.358	0.011	-0.360
过氧化氢酶	0.353	-0.350	-0.339
多酚氧化酶	0.726**	-0.115	-0.434
蛋白酶	0.058	-0.034	-0.088

表 8 滇重楼移栽品根茎品质指标与其根际土壤化学指标的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between rhizome quality and rhizosphere soil chemical index of transplanted *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

土壤因子	相关系数		
	总皂苷	总多糖	总黄酮
pH	0.190	0.017	0.336
有机质	0.022	-0.264	-0.003
速效氮	0.048	0.371	0.402
速效磷	0.032	-0.268	-0.091
速效钾	-0.522*	-0.020	-0.469
脲酶	0.295	-0.234	0.450
蔗糖酶	0.220	-0.207	0.535*
酸性磷酸酶	0.150	-0.244	0.182
中性磷酸酶	-0.152	-0.188	0.015
碱性磷酸酶	-0.134	0.570*	0.081
过氧化氢酶	-0.010	-0.179	0.399
多酚氧化酶	-0.284	-0.083	0.072
蛋白酶	-0.290	0.072	-0.158

显著正相关 ($r=0.570$, $P<0.05$); 总黄酮含量与蔗糖酶活性呈显著正相关 ($r=0.535$, $P<0.05$)。由此可见, 滇重楼在人工栽培条件下根际土壤速效钾含量越高, 总皂苷含量越低; 根际土壤中碱性磷酸酶活性越高, 总多糖的含量就越高; 根际土壤蔗糖酶越高, 总黄酮含量就越高。

3.5 影响不同产地滇重楼根茎品质的主要土壤因子分析和筛选

虽然滇重楼生长发育、品质形成与其生长土壤因子存在着显著或极显著的相关性, 但是, 土壤因子并非单独影响于滇重楼植株生长发育, 而往往是相互影响、相互制约共同作用于根茎品质。为确定影响滇重楼入药品质的主导因子, 选取变量进行逐步回归分析, 从而得到影响滇重楼品质的主要土壤因子, 结果如表 9、10 所示。从表 9 可以发现, 野生滇重楼有 3 个公共因子: 第 1 个因子主要反映的生态意义是有机质含量、酸性磷酸酶活性、中性磷酸酶活性、蛋白酶活性等; 第 2 个因子主要反映的生态意义是多酚氧化酶活性、蔗糖酶活性、pH 值等; 第 3 个因子主要反映的生态意义是速效磷含量、速效钾含量等。

对表 9 中野生滇重楼土壤因子得分矩阵做权重系数, 得到 3 个公共因子的变量, 对其进行逐步回归分析, 得到分别以总皂苷、总黄酮为因变量, 公共因子 II 为自变量的回归方程: 总皂苷 = $20.419 + 4.114 X_2$; 总黄酮 = $1.267 - 0.308 X_2$ 。结果显示, 野生品总皂苷含量与第 2 个公共因子正相关, 这也就是说, 野生品总皂苷含量与其根际土壤中多酚氧化

表 9 滇重楼野生品方差极大法旋转后的因子负荷矩阵
Table 9 Rotated factor matrix of wild *P. polyphylla* var. *yunnanensis* by Varimax

土壤因子	公共因子		
	I	II	III
pH 值	-0.034	0.675	0.412
有机质	0.843	0.426	-0.012
速效氮	0.775	-0.086	-0.099
速效磷	0.063	0.188	0.813
速效钾	-0.174	0.008	0.846
脲酶	0.362	0.663	0.535
蔗糖酶	0.425	0.704	0.408
酸性磷酸酶	0.889	0.006	0.271
中性磷酸酶	0.851	0.306	0.016
碱性磷酸酶	0.706	0.622	-0.053
过氧化氢酶	0.569	0.487	0.320
多酚氧化酶	0.079	0.878	-0.117
蛋白酶	0.908	0.164	-0.164

表 10 滇重楼移栽品方差极大法旋转后的因子负荷矩阵
Table 10 Rotated factor matrix of transplanted *P. polyphylla* var. *yunnanensis* by Varimax

土壤因子	公共因子			
	I	II	III	IV
pH 值	-0.239	0.822	-0.003	0.292
有机质	0.943	0.022	-0.021	0.038
速效氮	0.200	-0.065	-0.753	0.443
速效磷	0.465	0.028	0.711	0.063
速效钾	-0.004	-0.092	0.766	0.030
脲酶	0.398	0.777	-0.193	-0.044
蔗糖酶	0.437	0.646	-0.203	0.238
酸性磷酸酶	0.885	0.183	0.114	0.265
中性磷酸酶	0.838	0.267	-0.183	-0.136
碱性磷酸酶	-0.065	0.107	-0.048	0.863
过氧化氢酶	0.308	0.874	0.109	-0.045
多酚氧化酶	-0.086	0.723	0.133	-0.532
蛋白酶	0.834	0.046	0.258	-0.225

酶活性等相关, 这与表 7 的相关性分析相对应; 而野生品总黄酮含量与第 2 个公共因子呈负相关, 这也就是说, 野生品总黄酮含量与其根际土壤中 pH 值和脲酶活性等呈负相关, 这与表 7 的相关分析相对应。

从表 10 可以发现, 移栽滇重楼有 4 个公共因子: 第 1 个因子主要反映的生态意义是有机质含量、酸性磷酸酶活性等; 第 2 个因子主要反映的生态意义是 pH 值、过氧化氢酶活性等; 第 3 个因子主要反映的生态意义是速效氮含量、速效磷含量和速效钾含量; 第 4 个因子主要反映的生态意义是碱性磷酸酶活性。

对表 10 中移栽滇重楼土壤因子得分矩阵做权重系数, 得到 4 个公共因子的变量, 对其进行逐步回归分析, 得到分别以总皂苷、总多糖为因变量, 公共因子 III、IV 为自变量的回归方程: 总皂苷 = $15.915 - 1.722 X_3$; 总多糖 = $171.810 + 21.225 X_4$ 。结果显示, 移栽品总皂苷含量与第 3 个公共因子负相关, 这也就是说, 移栽品总皂苷含量与其根际土壤中速效钾含量等相关; 移栽品总多糖含量与第 4 个公共因子正相关, 这也就是说, 移栽品总多糖含量与其根际土壤中碱性磷酸酶活性等相关。这与表 8 的相关性分析相对应。因此, 滇重楼人工栽培条件下施肥过程中注意增减钾肥的用量。

4 讨论

据报道, 滇重楼对土壤环境条件要求较严格, 最适宜区以云贵高原的西南部为主, 为滇重楼的自

然地理分布中心,其中甾体皂苷类、黄酮类、多糖类等化合物生物活性显著(抗肿瘤、抗菌、止血等),可作为评价滇重楼品质的客观指标^[17-18]。研究表明,野生品和移栽品滇重楼根茎中总皂苷、总多糖、总黄酮等 3 类成分含量差异较大,野生品和移栽品中组内 3 类成分的含量比例也相差较大,部分达显著性差异。整体来说,野生品总皂苷、总黄酮平均含量高于移栽品,而总多糖平均含量低于移栽品,说明滇重楼野生品的质量可能优于移栽品,但无显著性差异,此结论需进一步通过药效学验证,与咎珂等^[19]的报道结果相反,可能与野生变家种、采集地点、生长年限及生长环境等有关,有待深入探讨。综合来看,云南、贵州的野生滇重楼总皂苷、总黄酮含量较高,贵州地区的移栽滇重楼总皂苷、总多糖、总黄酮含量较高,根茎品质的地域性明显。

药材的品质除受自身的遗传因素决定外,土壤肥力(土壤因子)是直接影响滇重楼等中药材生物量和活性成分的重要因素之一^[20]。因此,滇重楼品质的优良与其生长环境密切相关,而土壤因子又直接影响其原植物,研究滇重楼根际土壤因子及其与药材活性成分的相关性,确定适宜的土壤条件进行人工栽培是获得优质药材保障,以期今后滇重楼人工栽培地土壤合理培肥的提供指导。结果表明,不同产地野生与移栽滇重楼根际土壤营养状况有差异。野生滇重楼根际土壤的有机质含量、速效氮含量、速效钾含量属于中高等水平范围(1~3 级),但速效磷含量主要属于较缺甚至极缺水平范围(4~6 级),说明野生滇重楼主要生长在有机质丰富、速效氮和速效钾含量较高,而速效磷较低的生长环境,与段艳涛等^[21]的研究结果相似。而移栽滇重楼根际土壤的有机质含量、速效氮含量、速效磷含量、速效钾含量属于中高等水平范围(1~3 级),这可能与当地种植基地在人工栽培过程中坚持使用复合肥有关。总体而言,西南地区野生和移栽滇重楼分布区域的根际土壤酸碱度适中,野生滇重楼根际土壤有机质、速效氮平均含量高于移栽品,移栽滇重楼根际土壤速效磷、速效钾平均含量高于野生品,表明野生滇重楼的土壤肥力水平较移栽品高。因此,当地滇重楼种植户应施用适宜的有机肥和 N 肥,应适度控制栽培基地 P 肥和 K 肥的施用量,可有效提高其药用部位产量及入药品质。

土壤酶是滇重楼生长区域土壤中的生物催化剂,可表征土壤中营养物质、能量代谢旺盛程度和

土壤肥力的有效生物学指标,与其原植物的生长发育之间存在必然联系,从而影响其产量及品质^[22]。本研究结果表明,野生滇重楼根际土壤脲酶、酸性磷酸酶、中性磷酸酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蛋白酶活性平均含量稍高于移栽品,移栽滇重楼根际土壤蔗糖酶、多酚氧化酶活性平均含量高于野生品,其原因可能与群落植被不同^[23]、栽培方式不同^[24]有关,改变了群落的根际土壤生化反应的方向和强度,从而导致野生状态下土壤酶活性较高。该研究结果与段艳涛等^[21]、张静等^[24]的研究结果相近。

相关性和逐步回归分析结果表明,野生品总皂苷与多酚氧化酶活性呈现出极显著正相关,总黄酮与 pH 值、脲酶活性呈极显著负相关关系。移栽品总皂苷与速效钾含量呈现出显著负相关,总多糖与碱性磷酸酶活性呈显著正相关,总黄酮与蔗糖酶活性呈显著正相关关系。根际土壤养分与土壤酶活性密切相关,具有显著相关性,对改善土壤肥力具有一定的积极作用,显著影响滇重楼的生长发育和次生代谢产物的种类、数量,改变了不同生长状态下滇重楼根茎中总皂苷、总多糖和总黄酮含量和累积。说明不同活性成分的形成可能受不同生物合成途径影响,不同的生物合成途径所需的土壤因子也就可能不同,为我国滇重楼产业人工栽培及其产业化发展提供参考依据。因此,研究者应在野外就地保护野生滇重楼或进行人工栽培时,要多注意调节滇重楼土壤中各养分的含量及其比例,适时适当补充相应养分。但它们对滇重楼活性成分形成、积累影响的作用机制需要进一步的深入研究。

综上所述,云贵川野生与移栽滇重楼药材品质与其土壤因子具有一定的相关性,尤其是土壤多酚氧化酶活性、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性对入药品质具有显著影响,说明土壤酶活性较为丰富的生长土壤是形成高品质重楼药材的基础。在实际栽培过程中应根据滇重楼各活性成分与土壤营养的相关性进行合理施肥,还要充分考虑各营养元素吸收过程中存在的协同或拮抗作用,为精准扶贫做出贡献。本实验结果与前人研究结果既有相似也有不同,这正是产地不同对土壤因子和滇重楼生长影响复杂性的表现,也为课题组今后的研究方向提供参考依据。

参考文献

- [1] 中国药典[S].一部 2015.
- [2] 李恒,苏豹,张兆云,等.中国重楼资源现状评价

- 及其种植业的发展对策 [J]. 西部林业科学, 2015, 44(3): 1-7.
- [3] 成莉, 甄艳, 陈敏, 等. 扩大重楼药用资源研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(16): 3121-3124.
- [4] 苏泽春, 王泽清, 李兆光, 等. 不同环境因子种植云南重楼的差异性研究 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1448-1452.
- [5] 赵俊凌, 李学兰, 王艳芳, 等. 云南省不同地区滇重楼4种皂苷含量的比较 [J]. 中华中医药杂志, 2012, 27(8): 2076-2078.
- [6] 吴平, 周单单, 段雪滢, 等. 贵州不同居群滇重楼引种后种质变化研究 [J]. 绿色科技, 2017(15): 118-120.
- [7] 戴雪雯, 冯丽丽, 李海峰. 不同种植基地滇重楼根茎中甾体皂苷有效成分差异的研究 [J]. 中药材, 2018, 41(4): 777-783.
- [8] 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.
- [9] 王印, 何忠俊, 段艳涛, 等. 滇重楼根茎有效成分与土壤钾状况的关系研究 [J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 950-953.
- [10] 何忠俊, 黄希, 梁社往, 等. 滇重楼根茎皂苷含量与生态因子的关系 [J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 409-414.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 杨骁, 张振秋. 重楼中总皂苷的含量测定 [J]. 中华中医药学刊, 2007, 25(11): 2420-2422.
- [13] 周浓, 郭冬琴, 汪开拓, 等. 滇重楼多糖不同提取方法的比较研究 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 326-329.
- [14] 周浓, 张玉莲, 郭冬琴, 等. 正交试验法优选滇重楼总黄酮的提取工艺 [J]. 时珍国医国药, 2014, 25(3): 581-583.
- [15] 易海艳, 马刘峰, 林宁, 等. 新疆叶尔羌河流域棉田土壤养分分析与评价 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 393-396.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [17] 石子为, 杨少华, 张丽霞, 等. 基于地形土壤因子的滇重楼生态适宜性区划研究 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1904-1909.
- [18] 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.
- [19] 咎珂, 高宇明, 崔淦, 等. 基于特征图谱及多指标成分含量的云南重楼野生与栽培品比较研究 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(15): 3011-3016.
- [20] 蒋靖怡, 杨婉珍, 康传志, 等. 中药材栽培地土壤肥力评价 [J]. 中国中药杂志, 2018, 43(4): 847-852.
- [21] 段艳涛, 何忠俊, 梁社往, 等. 滇重楼总皂苷含量和菌根侵染率与土壤因子的关系 [J]. 中国中药杂志, 2011, 36(22): 3091-3095.
- [22] 张新慧, 张恩和, 郎多勇, 等. 不同茬口对当归根际土壤酶活性及其产量和品质的影响 [J]. 中草药, 2011, 42(11): 2322-2325.
- [23] 罗世琼, 黄建国, 袁玲. 野生黄花蒿土壤的养分状况与微生物特征 [J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 868-879.
- [24] 张静, 肖国生, 周浓, 等. 三峡库区栽培重楼属药用植物根际土壤微生物数量和酶活性的变化 [J]. 中国中医药信息杂志, 2016, 23(10): 95-99.