

周新华, 曾平生, 武晓玉, 等. 华重楼野生种群表型变异研究 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(1): 116-124.
ZHOU Xinhua, ZENG Pingsheng, WU Xiaoyu, et al. Phenotypic variations in wild populations of *Paris polyphylla* var. *chinensis*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(1): 116-124.

华重楼野生种群表型变异研究

周新华, 曾平生, 武晓玉, 黄宇涛

(中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心, 江西 分宜 336600)

摘要:【目的】综合分析华重楼 *Paris polyphylla* var. *chinensis* (Franch.) Hara 野生种群的表型变异规律, 为其种质资源保护、药材资源开发利用和繁育改良提供理论支撑。【方法】以我国分布区内 7 个野生华重楼地理种群为研究对象, 对其 17 个表型性状进行系统测量, 利用方差分析、变异系数分析、多重比较分析和相关性分析等多种数理统计分析方法, 探讨其表型变异规律及其与地理气候因子的关系。【结果】除叶片数和花萼片数外, 野生华重楼其他 15 个表型性状在种群间和种群内有显著或极显著的差异; 种群内的变异 (方差分量占比为 52.19%) 大于种群间的变异 (方差分量占比为 26.39%), 表型性状的平均分化系数为 34.27%, 种群内变异是华重楼表型变异的主要来源; 各表型性状的平均变异系数为 17.72%, 变异幅度为 6.83%~29.95%, 花梗长、叶面积、花萼面积和株高的变异幅度远大于平均变异系数, 叶片数、花萼片数、果球横径、果球纵径、果球横纵比和种子千粒质量的变异幅度远小于平均变异系数, 表明华重楼花、叶的数量指标及果球、种子的性状稳定性大于叶片形态性状的稳定性; 相关分析表明, 大多数表型因子与地理气候因子之间存在显著或极显著的相关性。【结论】广东清远地理种群变异最为丰富, 可作为种质资源收集保存的优选对象。

关键词: 华重楼; 种群; 表型变异; 地理因子; 气候因子
中图分类号: S718.46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)01-0116-09

Phenotypic variations in wild populations of *Paris polyphylla* var. *chinensis*

ZHOU Xinhua, ZENG Pingsheng, WU Xiaoyu, HUANG Yutao
(Experimental Center for Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi 336600, China)

Abstract: 【Objective】 To comprehensively analyze the phenotypic variations in wild populations of *Paris polyphylla* var. *chinensis* (Franch.) Hara, and provide a theoretical support for the protection of germplasm resources, development and utilization of medicinal materials, and breeding improvement. 【Method】 The seven wild populations of *P. polyphylla* var. *chinensis* in China were used as materials. Based on the measurement of 17 phenotypic traits, by the analyses of variance, variation coefficient, multiple comparisons and correlation, the phenotypic variation and its relationship with geographical climate factors were discussed. 【Result】 Except the numbers of leaf and calyx, the other 15 phenotypic traits of wild *P. polyphylla* var. *chinensis* showed significant or extremely significant differences among and within populations. The variation within populations (Percentage of variance component was 52.19%) was greater than that among populations (Percentage of variance component was 26.39%). The mean phenotypic differentiation coefficient of phenotypic

traits was 34.27% and the main source of variation was within populations. The average variation coefficient of each phenotypic trait was 17.72% and variation coefficient ranged from 6.83% to 29.95%. The variation ranges of peduncle length, leaf area, calyx area and plant height were higher than the average variation coefficients of these five traits, while those of leaf number, calyx number, fruit transverse diameter, fruit longitudinal diameter, fruit transverse diameter to longitudinal diameter ratio and seed 1 000-grain weight were far less than the mean variation coefficients, indicating that the stabilities of flower and leaf quantitative trait indexes, fruit and seed traits were greater than those of leaf shape traits. Correlation analysis showed that most of the 17 phenotypic traits had significant or extremely significant correlations with the geographical and climatic factors.

【Conclusion】 The wild populations of *P. polyphylla* var. *chinensis* in Qingyuan City, Guangdong Province have the most abundant geographical population variations and can be used as the optimal target for germplasm collection and preservation.

Key words: *Paris polyphylla* var. *chinensis*; population; phenotypic variation; geographical factor; climatic factor

种群内的遗传多样性是种质资源保存的依据。遗传多样性是指种群内基因和基因型的多样性,它体现了物种基因的丰富程度,是研究生态系统多样性和物种多样性的基础^[1-5]。遗传多样性研究通常包括表型、生化、染色体、DNA 和碱基序列等多层次遗传变异研究^[6]。尽管表型性状不能完全等同于基因位点,但利用表型性状研究种群的遗传多样性具有简便、高效、经济、直观和实用等优点^[7-12]。目前,国内外学者利用表型变异已在许多珍稀濒危植物上开展了研究^[13-15],为保护或遗传改良珍稀濒危植物资源奠定了理论基础。

华重楼 *Paris polyphylla* Smith var. *chinensis* (Franch.) Hara 属百合科重楼属的多年生草本植物,作为重楼药材的基源植物收载于 2020 年版《中华人民共和国药典》中,是著名中成药云南白药、宫血宁胶囊、季德胜蛇药等的主要成分,具有非常高的药用和经济价值^[16-19]。华重楼主要分布在我国江苏、浙江、江西、福建、广东、广西、湖北、湖南和四川等南方省份,自然生长于海拔 600~1 350 m 的林下荫处或沟谷边的草丛中^[20]。华重楼作为一种珍贵的中药材,主要以根茎入药,药用活性成分为重楼皂苷,具有抗癌、止血、消炎、镇痛、止咳平喘和免疫调节等作用,常用于治疗蛇毒、乳腺炎、跌打损伤等病症^[21-22]。虽然华重楼具有很高的药用和经济价值,在长江以南省份也偶见人工栽培,但研究主要集中在组培技术^[23-24]、人工栽培^[25]和药用成分分析^[26-27]等方面,而遗传育种的基础性工作地理种群遗传变异少见有相关报道。本文以华重楼 7 个地理种群为研究对象,系统测定叶片、茎、花萼、果球和种子等的 17 个表型性状,运用统计学分析方法,深入研究

种群间和种群内的变异规律,以期为华重楼种质资源保护、药材资源开发利用和繁育改良提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 样品来源与数据的收集

通过查阅中国植物数字标本馆 (<http://www.cvh.ac.cn/>) 和电子版《中国植物志》(<http://www.iplant.cn/frps>) 初步确定华重楼的分布区域后,进一步通过文献检索、咨询当地相关专家和野外实地调查,最终确定华重楼的自然地理分布地,并于 2018 和 2019 年的 9—11 月间进行野生华重楼植株、叶片、花萼、果球和种子的样品采集和数据调查、测量工作。野生华重楼的样品数据采集点分别位于江西省新余市 (JXXY)、浙江省丽水市 (ZJLS)、四川省雅安市 (SCYA)、广东省清远市 (GDQY)、福建省三明市 (FJSM)、湖南省娄底市 (HNLD) 和湖北省宜昌市 (HBYC),共计 7 个地理种群。数据采集时,选择生长情况正常、无明显的病虫害发生、无明显的生长畸形、达到生殖成熟、有正常饱满的果球的单株样品进行调查测量。鉴于华重楼天然种质资源分布稀少,调查时各地理种群单株保有量只需达到 30 株以上、样品单株间隔 10 m 即可。因野生华重楼多分布于深山沟壑,数据收集工作比较困难,故在选择样品单株时,各地理种群只调查 15 株,7 个地理种群共计 105 株。调查测量时,现场记录样点的地理经纬度数据、海拔高度数据,其他气候因子数据通过查询资源学科领域基础科学数据整合与集成应用人地系统主题数据库 (<http://www.data.ac.cn>) 获得,具体数据见表 1。

表 1 7 个野生华重楼地理种群的地理及主要气候因子情况

Table 1 Sample collection information of *Paris polyphylla* var. *chinensis* from different distribution regions and climatic data at the sampling sites

样品采集点 Sample site	种群 Population	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	年均温度/℃ Mean annual temperature	无霜期/d Frost-free period	年日照/h Annual sunshine hour	年降水量/mm Annual precipitation
江西新余 Xinyu in Jiangxi	JXXY	114°37'22"E	27°31'45"N	376	17.7	270	1 655.4	1 594.8
浙江丽水 Lishui in Zhejiang	ZJLS	119°04'18"E	28°38'28"N	1 103	11.3	240	1 635.1	1 598.9
四川雅安 Yaan in Sichuan	SCYA	103°01'57"E	30°30'24"N	1 450	17.0	295	1 519.2	1 350.0
广东清远 Qingyuan in Guangdong	GDQY	112°20'11"E	25°10'10"N	648	18.0	210	2 290.0	1 329.0
福建三明 Sanming in Fujian	FJSM	117°29'18"E	26°33'24"N	548	18.2	260	1 727.1	1 688.0
湖南娄底 Loudi in Hunan	HNLD	112°02'62"E	27°48'05"N	290	17.1	270	1 726.0	1 455.6
湖北宜昌 Yichang in Hubei	HBYC	111°21'19"E	30°27'44"N	400	16.9	275	1 710.5	1 215.5

1.2 表型性状的测定

统计待调查表型性状的野生华重楼单株的叶片数和花萼片数, 摘取其所有叶片和花萼片, 平铺在硬纸板上, 并利用数显游标卡尺测量其叶长、花萼长、叶宽、花萼宽, 同时测量地径、果球横径和果球纵径等指标, 精确到 0.01 mm, 测量结束后, 计算叶片长宽比、花萼长宽比和果球横纵比; 利用便携式叶面积测定仪 (LI-3000C, LI-COR, Lincoln, USA) 测定所有叶面积和花萼面积, 精确到 0.01 cm²; 利用不锈钢卷尺测量每株野生华重楼的株高和花梗长, 精确到 0.1 cm; 采集成熟种子, 人工搓掉红色种皮, 用清水冲洗干净, 置于通风阴凉处, 晾干后及时利用电子分析天平测定每个种群种子的千粒质量, 精确到 0.01 g。以上数据测量, 每个种群选取 5 个样品单株, 重复 3 次, 每个种群测量 15 株, 共计 105 株。

1.3 数据处理

利用社会统计学分析软件 SPSS25.0 对数据进行处理分析。应用表型分化系数、单因素方差分析以及多因素方差分析方法分析种群间和种群内的变异情况; 利用相关分析来探讨表型因子与地理因子的关系。

2 结果与分析

2.1 野生华重楼种群间和种群内的表型变异

野生华重楼种群间和种群内的表型性状变异的方差分析结果见表 2。所选取的 17 个表型性状除叶片数和花萼片数外, 其余 15 个表型性状指标在种群间和种群内都存在显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 的差异, 这说明野生华重楼绝大多数表型性状在种群间和种群内存在广泛的变异。

野生华重楼 7 个地理种群 17 个表型性状的平均值、标准差及多重比较分析结果见表 3。结果显示, 除叶片数和花萼片数在各种群间差异不显著外, 其余 15 个表型性状指标在各种群间均存在显著差异。其中, 四川雅安种群的叶长、花萼长、叶宽、花萼宽、叶面积、花萼面积、株高和地径 8 个表型性状指标数值最大, 与其他 6 个地理种群大多为差异显著; 浙江丽水种群的果球纵径最大, 叶片长宽比和果球横纵比最小; 广东清远种群的花梗长、叶片长宽比和花萼长宽比最大, 果球纵径最小; 湖北宜昌种群的花梗长、叶长、花萼长、花萼宽、花萼长宽比、叶面积、种子千粒质量和地径 8 个表型性状指标为所有种群中最小, 果球横纵比最大; 湖南娄底种群果球横径和种子千粒质量最大; 福建三明

表 2 野生华重楼种群间和种群内全株、果、叶及种子表型性状的方差分析结果¹⁾

Table 2 Variance analysis of phenptypic traits of wholeplant, leaf, fruit and seeds among and within *Paris polyphylla* var. *chinensis*

性状 Trait	均方 Mean square		随机误差 Random error	F	
	种群间	种群内		种群间	种群内
	Among populations	Within populations		Among populations	Within populations
株高 Height	1 060.94	226.26	266.13	4.69**	5.97**
地径 Diameter	6.39	1.32	1.62	4.83**	7.13**
叶片数 No. of leaf	0.53	0.78	0.08	0.68	1.07
叶长 Leaf length	5 728.49	601.72	264.04	9.52**	7.18**
叶宽 Leaf width	1 043.13	43.62	51.48	23.91**	20.99**
叶面积 Leaf area	2 831.39	142.52	138.48	19.87**	3.56*
叶片长宽比 Blade aspect ratio	3.73	0.84	0.15	4.45**	5.39**
花萼片数 No. of calyx	4.52	0.55	1.22	0.82	0.79
花萼长 Calyx length	762.13	49.75	46.97	15.32**	10.32**
花萼宽 Calyx width	119.22	9.90	6.86	12.04**	11.31**
花萼面积 Calyx area	46.00	3.32	2.81	13.86**	7.15**
花萼长宽比 Calyx aspect ratio	0.55	0.13	0.03	4.12**	5.01**
花梗长 Pedicel length	152.91	70.67	25.22	3.16*	6.25**
果球横径 Fruit transverse diameter	89.74	18.79	5.95	4.78**	6.17*
果球纵径 Fruit longitudinal diameter	256.18	25.35	19.35	10.10**	8.33**
果球横纵比 Fruit transverse diameter to longitudinal diameter ratio	0.24	0.11	0.02	21.60**	17.05**
种子千粒质量 Seed 1 000 -grain weight	843.51	69.95	229.20	12.06**	10.87**

1) “*” 和 “**” 分别表示在0.05和0.01水平差异显著(单因素方差分析)

1) “*” and “**” mean significant differences at 0.05 and 0.01 levels respectively(One-way ANOVA)

表 3 野生华重楼 7 个地理种群 20 个表型性状的平均值、标准差及多重比较¹⁾

Table 3 Mean, standard deviation and multiple comparison of 20 phenotypic traits in seven geographical populations of *Paris polyphylla* var. *chinensis*

种群 ²⁾ Population	株高/cm Height	地径/mm Diameter	叶片数 No. of leaf	叶长/mm Leaf length	叶宽/mm Leaf width	叶面积/cm ² Leaf area
JXXY	53.67±17.64ab	8.22±1.17ab	6.33±0.58a	134.91±21.64ab	44.89±10.01b	48.84±17.70b
ZJLS	66.43±8.46a	7.93±0.70abc	6.67±1.15a	121.90±13.43bc	48.31±4.10ab	46.48±7.92b
SCYA	69.20±12.51a	8.63±1.33a	7.00±1.00a	148.38±12.29a	51.85±4.90a	60.28±5.99a
GDQY	49.63±24.01abc	6.47±0.84bcd	6.67±1.53a	114.58±55.20c	32.73±7.84d	30.50±21.37cd
FJSM	35.33±5.81bc	5.29±0.78d	6.33±0.58a	123.02±10.82bc	35.80±3.96cd	34.73±5.96c
HNLD	22.13±2.25c	6.05±0.84cd	6.67±0.58a	112.69±10.17c	38.91±5.91c	34.57±6.84c
HBYC	25.83±2.25c	5.02±0.59d	5.67±0.58a	93.57±6.93d	35.70±7.53cd	26.35±6.28d
种群 ²⁾ Population	叶片长宽比 Blade aspect ratio	花萼片数 No. of calyx	花萼长/mm Calyx length	花萼宽/mm Calyx width	花萼面积/cm ² Calyx area	花萼长宽比 Calyx aspect ratio
JXXY	3.06±0.37bc	5.67±0.58a	49.91±7.87a	19.13±4.13a	7.68±2.56a	2.66±0.34ab
ZJLS	2.53±0.24c	6.67±1.15a	49.34±5.34a	18.46±1.74ab	7.20±1.29a	2.68±0.26a
SCYA	2.89±0.41b	5.80±0.84a	52.06±8.90a	19.23±3.43a	8.03±2.56a	2.73±0.35a

续表 3 Continued table 3

种群 ²⁾	叶片长宽比	花萼片数	花萼长/mm	花萼宽/mm	花萼面积/cm ²	花萼长宽比
Population	Blade aspect ratio	No. of calyx	Calyx length	Calyx width	Calyx area	Calyx aspect ratio
GDQY	3.79±2.18a	5.33±0.58a	38.80±8.31b	13.79±1.90c	4.29±1.37b	2.81±0.42a
FJSM	3.46±0.38ab	4.67±0.58a	36.71±8.41b	13.42±2.52c	3.97±1.59b	2.76±0.52a
HNLD	2.95±0.45bc	5.67±0.58a	39.23±5.24b	16.56±2.48b	5.18±1.42b	2.39±0.25bc
HBYC	2.72±0.51c	4.33±0.58a	34.19±2.86b	13.04±4.75c	4.26±1.16b	2.26±0.48c

种群 ²⁾	花梗长/cm	果球横径/mm	果球纵径/mm	果球横纵比	种子千粒质量/g
Population	Pedicle length	Fruit transverse diameter	Fruit longitudinal diameter	Fruit transverse diameter to longitudinal diameter ratio	Seed 1 000-grain weight
JXXY	18.17±5.03ab	30.45±5.25bc	35.93±7.28ab	0.86±0.10d	100.16±3.00a
ZJLS	19.60±2.15ab	34.09±2.84ab	39.94±3.37a	0.85±0.04d	72.25±2.55b
SCYA	18.60±3.47ab	29.50±4.41c	34.40±4.34bc	0.86±0.08d	73.25±2.55b
GDQY	23.00±15.86a	29.79±3.46bc	26.33±4.40d	1.14±0.12b	77.49±10.10b
FJSM	7.83±0.91ab	28.92±2.65c	30.47±3.37cd	0.96±0.88cd	95.76±4.17a
HNLD	10.43±4.29ab	36.83±6.65a	36.06±5.95ab	1.02±0.11c	109.99±17.00a
HBYC	5.80±1.06b	32.68±2.79abc	26.64±3.94d	1.25±0.19a	68.14±3.37b

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's法);2)JXXY: 江西新余;ZJLS: 浙江丽水;SCYA: 四川雅安;GDQY: 广东清远;FJSM: 福建三明;HNLD: 湖南娄底;HBYC: 湖北宜昌

1) Different lowercase letters in the same column indicated significant differences among different geographical populations ($P<0.05$, Duncan's method); 2) JXXY: Xinyu in Jiangxi; ZJLS: Lishui in Zhejiang; SCYA: Ya'an in Sichuan; GDQY: Qingyuan in Guangdong; FJSM: Sanming in Fujian; HNLD: Loudi in Hunan; HBYC: Yichang in Hubei

种群的果球横径最小，显著小于湖南娄底和浙江丽水种群。

野生华重楼 7 个地理种群的 17 个表型性状的方差分量及其种群间表型分化系数见表 4。17 个表型性状的平均方差分量在种群间占比 26.39%、种群内占比 52.19%、随机误差占比 21.42%，就平均方差分量所占百分比而言，种群间只是种群内的一半，这说明野生华重楼生长表型在种群间的变异远小于种群内的变异；17 个表型性状的平均分化系数种群间的贡献值为 34.27% (即种群内的贡献值为 65.73%)，这就进一步表明，野生华重楼的表型变异主要源于种群内部。

2.2 野生华重楼表型变异特征分析

野生华重楼各地理种群表型性状的变异系数列于表 5。野生华重楼 17 个表型性状在种群内的平均变异系数为 17.72%，变异幅度为 6.83%~29.95%。花梗长、叶面积、花萼面积和株高 4 个表型性状指标的平均变异系数均大于 20%，超过所有表型性状指标的平均变异系数 (17.72%)；叶片数、花萼片数、果球横径、果球纵径、果球横纵比和种子千粒质量 6 个表型性状指标的平均变异系数均小于 14.47%，小于所有表型性状指标的平均变异系数 (17.72%)，表明华重楼叶片数量、花萼数量、果球

和种子的性状稳定性大于其他性状指标的稳定性。进一步比较 7 个地理种群野生华重楼 17 个表型性状指标的平均变异系数可以得到，广东清远、湖南娄底和江西新余 3 个地理种群的变异系数均超过平均变异系数，表明广东清远、湖南娄底和江西新余野生华重楼种群的表型变异和多样性较为丰富；湖北宜昌、浙江丽水、四川雅安和福建三明 4 个地理种群的变异系数均小于平均变异系数，说明湖北宜昌、浙江丽水、四川雅安和福建三明地理种群的表型变异和多样性较广东清远、湖南娄底和江西新余地理种源弱。

2.3 野生华重楼种群表型的地理变异分析

对野生华重楼全株、茎、叶、花、果球和种子 17 个表型性状与样品采集点地理气象因子之间的相关性进行了分析，结果表明，叶长、叶宽和叶面积与样品采集点的经度呈现显著或极显著的负相关关系，说明随着经度的不断增加，野生华重楼叶长、叶宽和叶面积将不断减小；叶宽、叶面积、花萼长、花萼宽、花萼面积和果球纵径与纬度呈现显著或极显著的正相关关系，叶片长宽比和果球横纵比与纬度呈现极显著的负相关关系，这就说明随着纬度的增加，叶宽、叶面积、花萼长、花萼宽、花萼面积、果球纵径将呈现上升趋势，而叶片长宽比、果球横纵

表 4 野生华重楼表型性状的方差分量及种群间表型分化系数

Table 4 Variance component and differentiation coefficients of phenotypic traits among and within populations in *Paris polyphylla* var. *chinensis*

性状 Trait	方差分量			方差分量占比/%			表型分化
	Variance component			Percentage of variance component			系数/%
	种群间	种群内	随机误差	种群间	种群内	随机误差	Phenotypic
	Among populations	Within populations	Random error	Among populations	Within populations	Random error	differentiation coefficient
株高 Height	352.96	464.74	266.13	32.57	42.88	24.55	43.16
地径 Diameter	2.13	2.77	1.62	32.67	42.48	24.85	43.47
叶片数 No. of leaf	0.18	0.72	0.08	18.37	73.47	8.16	20.00
叶长 Leaf length	301.64	829.57	264.04	21.62	59.46	18.92	26.67
叶宽 Leaf width	52.36	88.04	51.48	27.29	45.88	26.83	37.29
叶面积 Leaf area	144.13	262.02	138.48	26.46	48.11	25.43	35.49
叶片长宽比 Blade aspect ratio	0.19	0.97	0.15	14.50	74.05	11.45	16.38
花萼片数 No. of calyx	1.47	1.63	1.22	34.03	37.73	28.24	47.42
花萼长 Calyx length	53.20	90.08	46.96	27.96	47.35	24.68	37.13
花萼宽 Calyx width	7.75	15.81	6.86	25.48	51.97	22.55	32.89
花萼面积 Calyx area	3.14	5.74	2.81	26.86	49.10	24.04	35.36
花萼长宽比 Calyx aspect ratio	0.04	0.16	0.03	17.39	69.57	13.04	20.00
花梗长 Pedicel length	44.11	93.10	25.22	27.16	57.32	15.53	32.15
果球横径 Fruit transverse diameter	8.46	23.80	5.95	22.14	62.29	15.57	26.22
果球纵径 Fruit longitudinal diameter	26.53	41.64	19.35	30.31	47.58	22.11	38.92
果球横纵比 Fruit transverse diameter to longitudinal diameter ratio	0.02	0.03	0.02	28.57	42.86	28.57	40.00
种子千粒质量 Seed 1 000-grain weight	272.61	271.75	229.20	35.24	35.13	29.63	50.08
平均值 Mean				26.39	52.19	21.42	34.27

表 5 野生华重楼种群 17 个表型性状变异系数

Table 5 Variation coefficients of 17 phenotypic traits in *Paris polyphylla* var. *chinensis* populations

性状 Trait	种群 ¹⁾ Population							平均值
	JXXY	ZJLS	SCYA	GDQY	FJSM	HNLD	HBYC	Mean
株高 Height	32.86	12.73	18.08	48.40	16.44	72.02	8.73	29.89
地径 Diameter	14.22	8.86	15.42	27.17	14.79	13.89	11.80	15.16
叶片数 No. of leaf	9.12	17.32	14.29	17.28	9.12	9.12	10.19	12.35
叶长 Leaf length	16.04	11.02	8.28	48.18	8.79	9.03	7.40	15.53
叶宽 Leaf width	22.31	8.48	9.46	23.96	11.05	15.18	21.10	15.93
叶面积 Leaf area	36.24	17.04	9.93	70.08	17.15	19.78	23.81	27.72
叶片长宽比 Blade aspect ratio	12.06	9.35	14.31	57.54	10.96	15.21	18.87	19.76
花萼片数 No. of calyx	10.19	17.32	10.83	14.43	15.75	10.19	17.32	13.72
花萼长 Calyx length	15.76	10.81	17.10	21.42	22.90	13.35	8.38	15.67
花萼宽 Calyx width	21.60	9.42	17.83	13.77	18.75	15.00	36.47	18.98
花萼面积 Calyx area	33.36	17.87	31.85	31.98	39.97	27.35	27.26	29.95
花萼长宽比 Calyx aspect ratio	12.86	9.70	12.68	15.02	19.14	10.61	21.25	14.47
花梗长 Pedicel length	27.71	10.98	18.63	68.72	11.58	41.07	18.25	28.13

续表 5 Continued table 5

性状 Trait	种群 ¹⁾ Population							平均值 Mean
	JXXY	ZJLS	SCYA	GDQY	FJSM	HNLD	HBYC	
果球横径 Fruit diameter	17.26	8.34	14.96	11.63	9.16	18.07	8.55	12.57
果球纵径 Fruit longitudinal diameter	20.25	8.45	12.62	16.72	11.05	16.49	14.79	14.34
果球横纵比 Fruit aspect ratio	11.71	4.73	9.25	10.52	9.26	10.85	15.01	10.19
种子千粒质量 Seed 1 000-grain weight	3.00	3.52	3.52	13.03	4.35	15.45	4.94	6.83
平均值 Mean	18.62	10.94	14.06	29.99	14.72	19.57	16.12	17.72

1) JXXY: 江西新余; ZJLS: 浙江丽水; SCYA: 四川雅安; GDQY: 广东清远; FJSM: 福建三明; HNLD: 湖南娄底; HBYC: 湖北宜昌

1) JXXY: Xinyu in Jiangxi; ZJLS: Lishui in Zhejiang; SCYA: Ya'an in Sichuan; GDQY: Qingyuan in Guangdong; FJSM: Sanming in Fujian; HNLD: Loudi in Hunan; HBYC: Yichang in Hubei

比将呈现下降趋势; 叶长、叶宽、叶面积、花萼长、花萼宽、花萼面积、花萼长宽比、株高和地径与海拔呈现显著或极显著的正相关关系, 果球横纵比和种子千粒质量与海拔呈现极显著的负相关关系, 说明海拔越高, 叶片、花萼、株高、地径也随之越大, 果球横

纵比和种子越小 (表 6); 叶宽、叶面积、花萼长、花萼面积、果球横径和果球纵径与年平均温度呈显著或极显著的负相关关系, 叶片长宽比、花萼宽与年平均温度呈极显著的正相关关系, 说明随着年平均温度的升高, 叶片将变得小而长, 种球也随之变小; 叶

表 6 野生华重楼 17 个表型性状与生态地理因子的相关系数¹⁾
Table 6 Correlation coefficients between 17 phenotypic traits of *Paris polyphylla* var. *chinensis* and ecological geography factors

性状 Trait	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	年均温度 Mean annual temperature	无霜期 Frost-free period	年日照时数 Annual sunshine hour	年降水量 Annual precipitation
株高 Height	-0.123	0.085	0.671**	-0.353	-0.072	-0.109	0.135
地径 Diameter	-0.213	0.172	0.530*	-0.293	0.135	-0.267	0.157
叶片数 No. of leaf	-0.134	-0.074	0.286	-0.077	-0.041	0.007	0.088
叶长 Leaf length	-0.206*	0.072	0.354**	0.010	0.200*	-0.288**	0.188*
叶宽 Leaf width	-0.222**	0.444**	0.530**	-0.365**	0.373**	0.535**	0.133
叶面积 Leaf area	-0.277**	0.301**	0.512**	-0.179*	0.333**	-0.425**	0.154
叶片长宽比 Blade aspect ratio	0.010	-0.340**	-0.114	0.284**	-0.219*	0.324**	0.008
花萼片数 No. of calyx	0.078	-0.230	0.299	-0.317	-0.344	0.152	0.151
花萼长 Calyx length	-0.108	0.267**	0.449**	-0.291**	0.199*	-0.372**	0.210*
花萼宽 Calyx width	-0.075	0.199*	0.314**	0.256**	0.226*	-0.385**	0.255**
花萼面积 Calyx area	-0.136	0.343**	0.386**	-0.268**	0.287**	-0.435**	0.170
花萼长宽比 Calyx aspect ratio	0.022	-0.186	0.229*	-0.011	-0.176	0.118	0.146
花梗长 Pedicel length	-0.071	-0.274	0.312	-0.114	-0.377	0.311	-0.036
果球横径 Fruit transverse diameter	0.059	0.081	-0.176	-0.230*	0.037	-0.063	-0.053
果球纵径 Fruit longitudinal diameter	-0.027	0.328**	0.115	-0.362**	0.390**	-0.495**	0.266*
果球横纵比 Fruit transverse diameter to longitudinal diameter ratio	0.098	-0.337**	-0.317**	0.210	-0.490**	0.594**	-0.423**
种子千粒质量 Seed 1 000-grain weight	0.232	-0.272	-0.535**	0.306	0.178	-0.135	0.498*

1) “*” 和 “**” 分别表示在0.05和0.01水平(双侧)上显著相关
1) “*” and “**” indicated significant correlations at 0.05 and 0.01 levels (double-tail), respectively

长、叶宽、叶面积、花萼长、花萼宽、花萼面积和果球纵径与无霜期呈显著或极显著的正相关关系, 果球横纵比则与无霜期呈现极显著的负相关关系, 说明无霜期越长, 叶片和花萼越大, 果球越大; 叶长、叶面积、花萼长、花萼宽、花萼面积与年日照时数呈显著或极显著负相关关系, 说明日照时间越长, 叶片和萼片越小; 叶长、花萼长、花萼宽、果球纵径和种子千粒质量与年降水量呈显著或极显著正相关, 果球横纵比则与年降水量呈极显著负相关, 这说明年降水量越大, 叶片越长, 种子越大 (表 6)。对表 6 的综合分析发现, 野生华重楼的叶片数、花萼片数和花梗长与 7 个生态地理环境因子无显著相关关系, 说明这些生态地理环境因子对野生华重楼这一物种的种群形态影响不大。

3 讨论与结论

3.1 野生华重楼表型性状的变异来源

通过对野生华重楼 7 个地理种群的 17 个性状和生长表型指标的深入研究发现, 无论是在种群间还是在种群内, 除叶片数和花萼片数外的其他指标均存在显著或极显著的变异, 这与多花黄精 *Polygonatum cyrtonema*^[2,28]、人参 *Panax ginseng*^[29]、毕节小檗 *Berberis guizhouensis*^[30]、八角莲 *Dysosma versipellis*^[31] 等林下经济植物的研究结果类似。通过种群间的表型分化系数分析可知, 种群间的变异远小于种群内的变异, 这就说明种群内的变异是野生华重楼表型变异的主要来源。华重楼 17 个表型性状的变异幅度为 16.38%~50.08%, 平均表型分化系数为 34.27%, 种群间的变异仅贡献 34.27%, 远小于种群内的变异贡献 65.73%, 这一现象出现的可能原因: 一是各种群的自然分布有着极强的区域性, 这就增加了不同种群间的基因交流难度; 二是野生华重楼的生长发育与林下小生境关系密切。综上所述, 野生华重楼种群间的基因交流机会要小于种群内部的基因交流, 说明华重楼的表型变异主要源自于各地理种群内部。

3.2 不同地理种群野生华重楼表型变异丰富度

变异系数在统计学中又称离散系数, 是衡量离散程度的一个归一化量度指标, 离散系数越大, 则说明观测对象的变异越大, 则对应的种群表型变异和多样性越丰富。通过对野生华重楼各地理种源表型指标的变异系数分析发现, 所有指标的变异系数幅度在 6.83%~29.95% 之间, 平均变异系数为 17.72%, 变异系数的变化幅度较大, 种群内部的表型变异程度高, 说明华重楼能够通过种群内部的遗

传变异, 更好地适应环境。

野生华重楼叶面积、花萼面积、株高、地径、果球横径、果球纵径、果球横纵比和种子千粒质量 8 个表型指标的变异系数分别为 27.72%、29.95%、29.89%、15.16%、12.57%、14.34%、10.19% 和 6.83%, 前 3 个指标远大于平均变异系数, 后 5 个指标远小于平均变异系数, 这些指标的稳定性排名依次为种子千粒质量>果球横纵比>果球横径>果球纵径>地径>叶面积>株高>花萼面积, 说明野生华重楼种子的稳定性最高, 果球的稳定性其次, 茎的稳定性排第 3, 叶片和花萼的稳定性最差, 这与多花黄精 *Polygonatum cyrtonema* 这方面性状的研究结果^[2]是类似的。

3.3 野生华重楼表型性状的地理变异规律性

本研究发现, 所选取的野生华重楼 17 个表型性状指标中, 除叶片数、花萼片数和花梗长 3 个表型性状指标与所有地理气象因子无显著相关性外, 其余性状指标均与部分地理气象因子存在显著或极显著的相关性, 这说明地理气象因子对野生华重楼的种群表型影响较大。经度的增加会抑制叶长、叶宽和叶面积的生长, 纬度的增加会促进叶片和果球的生长; 海拔与野生华重楼的叶、茎营养生长呈现正相关关系, 与果球和种子的生殖生长呈现负相关关系, 说明海拔增加会促进营养生长, 抑制生殖生长; 年均温度、无霜期、年日照时长和年降雨量等环境因子均与绝大多数表型指标存在显著或极显著相关性, 说明其表型变异受多个环境因子的共同控制。

3.4 野生华重楼保护策略

华重楼是重楼药材的法定基原, 是许多知名中成药不可或缺的主要组分材料, 随着制药工业的不断发展, 人们对华重楼的需求越来越大。因华重楼人工栽培种植周期长、生境要求苛刻、种植技术难, 人们为了满足需求对其进行掠夺性、毁灭性的采挖, 导致野生资源枯竭, 处于濒危状态。

因此, 开展野生华重楼资源保护的研究是非常有必要的, 笔者结合研究结果, 提出以下保护策略: 首先, 建议将遗传变异多样性丰富的华重楼地理种群原生地——广东清远设定为重点育种保护地; 其次, 严禁破坏野生华重楼的原生环境, 为华重楼种群的恢复提供生境支撑; 第三, 及时开展华重楼人工繁育研究, 争取在短时间内解决种苗繁育问题, 为市场提供充足的人工种苗; 最后, 收集全分布区华重楼种质资源, 建立保存圃, 做好基因资源的抢救性保存工作。

参考文献:

[1] 汪洋, 陈文学, 明安觉, 等. 湖北红椿天然种群小叶表型性状变异研究[J]. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(2): 96-105.

[2] 周新华, 曾平生, 武晓玉, 等. 野生多花黄精种群表型变异研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(6): 99-106.

[3] 李洪果, 陈达镇, 许靖诗, 等. 濒危植物格木天然种群的表型多样性及变异[J]. *林业科学*, 2019, 55(4): 69-83.

[4] 郑孙元, 朱弘, 金思雨, 等. 桂花表型变化的环境依赖特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2): 38-46.

[5] 李因刚, 柳新红, 马俊伟, 等. 浙江楠种群表型变异研究[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(12): 1315-1324.

[6] 罗建勋, 李晓清, 孙鹏, 等. 云杉天然群体的表型变异[J]. *东北林业大学学报*, 2003, 31(1): 9-11.

[7] 彭丽平, 成仿云, 钟原, 等. 凤丹栽培群体的表型变异研究[J]. *植物科学学报*, 2018, 36(2): 170-180.

[8] 赖猛, 胡冬南, 易敏, 等. 晚松人工林株间株内球果及种子形态变异研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(1): 22-28.

[9] 冯延芝, 乔杰, 王保平, 等. 南方低山丘陵区泡桐无性系主要性状的综合选择[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(6): 969-976.

[10] 尹明宇, 朱绪春, 刘慧敏, 等. 西伯利亚杏种质资源花表型变异[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(2): 92-103.

[11] 柳江群, 尹明宇, 左丝雨, 等. 长柄扁桃天然种群表型变异[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1091-1102.

[12] 钱磊, 吴忠锋, 唐昌亮, 等. 16 种羊蹄甲属植物种子表型变异初探[J]. *热带农业科学*, 2017, 37(9): 45-51.

[13] 李珊, 甘小洪, 慈宏艳, 等. 濒危植物水青树叶的表型性状变异[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(5): 687-697.

[14] 杨旭, 杨志玲, 王洁, 等. 濒危植物凹叶厚朴种实特性[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1077-1081.

[15] 沈涛, 申仕康, 张霖, 等. 三七表型变异及其对气候因子的响应[J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(5): 445-455.

[16] 国家药典委员会. 中国药典: 一部[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 271-272.

[17] MAN S L, GAO W Y, ZHANG Y J, et al. Antitumor and antimetastatic activities of rhizoma paridis saponins[J]. *Steroids*, 2009, 74(13/14): 1051-1056.

[18] 尹显梅, 张开元, 蒋桂华, 等. 华重楼皂苷类成分的动态分布规律对药材质量的影响[J]. *中草药*, 2017, 48(6): 1199-1204.

[19] 刘琴, 樊小莉, 杨莉, 等. 四川盆周山地重楼属植物药用资源的筛选及评价[J]. *中草药*, 2019, 50(2): 526-534.

[20] 中国科学院中国植物志编委会. 中国植物志: 第 15 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[21] 赵猛, 李燕敏, 王鹏飞, 等. 华重楼地上部分化学成分研究[J]. *中国药学杂志*, 2018, 53(16): 1342-1346.

[22] 陈铁柱, 文飞燕, 张涛, 等. 华重楼皂苷类化学成分与生态因子的相关性[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2018, 24(9): 46-51.

[23] 周玲, 姚振, 郭永兵, 等. 重楼属植物组织培养研究进展[J]. *北方园艺*, 2017(20): 184-189.

[24] 王跃华, 蒋婷婷, 付伟, 等. 重楼植物的组织培养研究[J]. *时珍国医国药*, 2012, 23(8): 2014-2016.

[25] 段宝忠, 马维思, 刘玉雨, 等. 滇重楼无公害栽培关键技术[J]. *世界中医药*, 2018, 13(12): 2975-2979.

[26] 王林娜, 胡培, 杨光义, 等. 6 种重楼属植物不同部位中 9 种皂苷类成分含量比较[J]. *时珍国医国药*, 2018, 29(11): 2635-2638.

[27] 金琳, 吴钰颖, 戴雪雯, 等. 基于多指标成分含量测定及 HPLC 指纹图谱的多茎重楼品质评价[J]. *中草药*, 2019, 50(13): 3178-3186.

[28] 樊艳荣, 陈双林, 杨清平, 等. 毛竹林下多花黄精种群生长和生物量分配的立竹密度效应[J]. *浙江农林大学学报*, 2013, 30(2): 199-205.

[29] 李翔国, 全炳武, 李虎林, 等. 人参皂苷量变异的研究进展[J]. *中草药*, 2012, 43(11): 2300-2304.

[30] 杨再超, 左经会, 向红, 等. 贵州特有药用植物毕节小檗的形态变异[J]. *热带亚热带植物学报*, 2016, 24(1): 29-36.

[31] 张君诚, 宋育红, 张杭颖. 福建三明珍贵药材八角莲的群落结构及物种多样性[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(12): 48-52.

【责任编辑 李晓卉】