

河南不同野生冬凌草种群的表型多样性及其与环境因子的相关性

马 苗¹, 贾亮亮¹, 王馨慧^{1,①}, 李仓宇^{2,①}

(1. 河南农业大学植物保护学院, 河南 郑州 450002; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:以河南4个主要野生冬凌草 [*Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara] 种群的77株冬凌草为研究对象,采用方差分析、变异分析、相关性分析、主成分分析以及聚类分析法对12个表型性状进行比较,并分析这些表型性状与环境因子的关系。结果表明,野生冬凌草12个表型性状的 F 值均达到极显著水平($P<0.01$),其中,叶柄长宽比的 F 值最大,叶面积和叶形指数的 F 值较大。4个种群12个表型性状的变异系数范围是0.62%~24.50%,均值为9.93%,其中,一级分枝数和叶干质量变异系数的均值较大,均达到18%以上。野生冬凌草叶片、茎部位的表型性状与环境因子间大多呈显著($P<0.05$)或极显著相关;经度、年均温、年降水量、最冷月最低温、土壤pH值和土壤类型与大多数表型性状呈显著或极显著负相关,而纬度、海拔和最热月最高温与大多数表型性状呈显著或极显著正相关。前4个主成分的累计贡献率为90.686%,其中,第1主成分中叶长、叶宽、叶面积、叶周长和叶鲜质量以及第2主成分中叶形指数的特征向量绝对值均大于0.8。聚类分析结果表明:在欧氏距离25处,4个种群的个体被分为2组,商城县和宜阳县种群个体聚为一组,卢氏县和济源市种群个体聚为另一组。综上所述,4个野生冬凌草种群存在较为丰富的表型变异,纬度、经度、年均温、年降水量、最冷月最低温和土壤类型对野生冬凌草的生长有显著影响,叶长、叶宽、叶面积、叶周长、叶形指数、叶鲜质量可作为评价种质资源的主要指标,卢氏县和济源市的野生冬凌草可作为优良种质资源的选育材料。

关键词:野生冬凌草; 表型多样性; 环境因子; 方差分析; 相关性分析; 聚类分析

中图分类号: Q944.5; Q948.11; S567.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)05-0089-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.05.09

Phenotypic diversity of different wild *Isodon rubescens* populations in Henan Province and its correlations with environmental factors MA Miao¹, JIA Liangliang¹, WANG Xinhui^{1,①}, LI Cangyu^{2,①} (1. College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(5): 89-98

Abstract: Taking 77 *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara individuals from four major wild *I. rubescens* populations in Henan Province as research objects, 12 phenotypic traits were compared by methods of variance analysis, variation analysis, correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis, and the relationships between these phenotypic traits and environmental factors were analyzed. The results show that the F values of 12 phenotypic traits of wild *I. rubescens* all reach extremely significant levels ($P<0.01$), among which, the F value of petiole length-width ratio is the largest, while those of leaf area and leaf shape index are relatively large. The range of coefficients of variation of 12 phenotypic traits in four populations is 0.62%–24.50%, with an average of 9.93%, among which, the

收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070304); 河南省自然科学基金项目(242300420488)

作者简介: 马 苗(2000—),女,回族,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事植物群体遗传学和景观基因组学方面的研究。

①通信作者 E-mail: wangxh@henau.edu.cn; neighborhoo@163.com

引用格式: 马 苗, 贾亮亮, 王馨慧, 等. 河南不同野生冬凌草种群的表型多样性及其与环境因子的相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 89-98.

averages of coefficients of variation of number of primary branches and leaf dry mass are the largest, both exceeding 18%. Phenotypic traits of leaves and stems of wild *I. rubescens* mostly show significant ($P < 0.05$) or extremely significant correlations with environmental factors; longitude, annual mean temperature, annual precipitation, min temperature of the coldest month, soil pH value, and soil type show significant or extremely significant negative correlations with most phenotypic traits, while latitude, altitude, and max temperature of the warmest month show significant or extremely significant positive correlations with most phenotypic traits. The cumulative contribution rate of the first four principal components reaches 90.686%, among which, the absolute values of eigenvectors of leaf length, leaf width, leaf area, leaf perimeter, and leaf fresh mass in the first principal component and leaf shape index in the second principal component are all greater than 0.8. The cluster analysis result shows that the individuals from four populations are divided into two groups at a Euclidean distance of 25, with individuals from Shangcheng County and Yiyang County populations are clustered into one group, and individuals from Lushi County and Jiyuan City populations are clustered into the other group. In conclusion, there are relatively rich phenotypic variations among the four wild *I. rubescens* populations, and latitude, longitude, annual mean temperature, annual precipitation, min temperature of the coldest month, and soil type have significant effects on the growth of wild *I. rubescens*, leaf length, leaf width, leaf area, leaf perimeter, leaf shape index, and leaf fresh mass could be used as main indexes for germplasm resource evaluation, and wild *I. rubescens* from Lushi County and Jiyuan City could be used as breeding materials for superior germplasm resources.

Key words: wild *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara; phenotypic diversity; environmental factor; variance analysis; correlation analysis; cluster analysis

冬凌草,学名碎米桠 [*Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara], 隶属于唇形科 (Lamiaceae) 香茶菜属 [*Isodon* (Benth.) Kudo], 为多年生草本或亚灌木植物^[1-2], 主要生长在海拔 100~2 800 m 的偏酸、疏松、腐殖质和有机质含量丰富的壤土和砂壤土中^[3-4]。冬凌草自然分布区较广, 主要分布在河南太行山区, 河北、山西、陕西、江西、四川、贵州、云南、甘肃、湖北、湖南、广西、广东、安徽、浙江等地区也有分布^[5]。冬凌草的干燥地上部位在 1991 年就被列为中药材^[6], 冬凌草可用于治疗咽喉肿痛、扁桃体炎、急性肾损伤和脑脊髓膜炎等病症^[7-8], 对前列腺癌、肺癌、乳腺癌等多种癌细胞有抑制作用^[9-10]; 冬凌草还具有退耕还林、保持水土的生态价值^[11]。冬凌草在花期吐粉量、泌蜜量中等, 是河南省济源市重要的蜜源植物^[12]; 在秋季霜降节气后, 冬凌草全株结满银白色的冰凌, 薄如蝉翼, 具有独特的观赏价值^[13]。

植物表型性状是连接基因型和环境的重要桥梁, 植物表型多样性通常是经过长期的自然选择和环境胁迫而形成, 是植物适应不同生境的生存策略^[14-17]。植物表型性状的观察和分析可以揭示基因型-环境互作对植物生长发育的影响, 并且可以通过调整形态结构、生理机制来适应不同的环境条件, 为遗传育种提供重要依据^[18-21]。目前, 已经有众多学者对铜钱枣 [*Ziziphus nummularia* (Burm. f.) Wight et Arn]^[22]、

石斛属 (*Dendrobium* Sw.) 植物^[23]、多枝黄芪 (*Astragalus polycladus* Bureau et Franch.)^[24]、水松 [*Glyptostrobus pensilis* (Staunton ex D. Don) K. Koch]^[25] 和沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* Linn.)^[26] 等药用植物进行了表型多样性研究, 为植物优良品种选育和资源保护奠定了基础。

药用植物的品质直接影响到中药的品质及其临床治疗效果。判断药用植物是否可靠, 一般从化学成分(有效成分的质量和含量、有害物质含量等)和物理指标(产品的外观性状, 如色泽、质地、大小、整齐度和形状等)2 个方面进行考量^[27]。近年来, 关于冬凌草的研究主要集中在化学成分特性和药理活性作用评估方面^[28-31], 而基于物理指标对优良品种的选育未见报道, 阻碍了冬凌草优良种质资源筛选及种质资源的保护和繁育进程。对河南不同野生冬凌草种群的研究, 有助于了解该地区冬凌草的环境适应性和选育物理指标较好的种源, 结合上述冬凌草化学成分的研究, 最终实现选育和繁育出优良品种的目标。本研究基于河南 4 个主要野生冬凌草种群, 系统研究野生冬凌草入药部位的表型性状变异特征, 分析了野生冬凌草表型性状与环境因子的关系, 并对河南不同野生冬凌草种群的表型多样性进行了评价, 以期了解野生冬凌草表型性状的地理变异规律, 为野生冬凌草选育和繁育优良品种提供理论基础和数据支撑。

1 材料和方法

1.1 材料

研究区位于河南省内,地理位置为北纬 31.38°~36.37°、东经 110.35°~116.65°,土壤类型主要为砂砾土、褐土和棕壤土等。以河南省的济源市(JY)、宜阳县(YY)、卢氏县(LS)和商城县(SC)野生冬凌草种群为研究对象,其基本情况见表1。于2023年7—9月(生长旺盛期)根据种群大小分别随机选取完整健

康的冬凌草20、15、18和24株。经纬度和海拔通过手持GPS仪测量。气象数据来自全球气候数据集(<https://www.worldclim.org/>)近30年的统计结果,对19个生物气候因子数据进行相关性分析,剔除高相关性($|r|>0.8$)的变量,最终筛选出年均温、年降水量、最冷月最低温和最热月最高温4个气候因子。于各种群内按随机网格法选取5个点采集表层0~5 cm的土壤,混匀后使用IN-WSYP便携式土壤pH计(山东来因光电科技有限公司)直接插入湿润土壤中测量土壤pH值,重复测量3次,结果取平均值。

表1 河南4个主要野生冬凌草种群的基本情况

Table 1 Basic situation of four wild populations of *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara in Henan Province

分布地 ¹⁾ Distribution area ¹⁾	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	年均温/℃ Annual mean temperature	年降水量/mm Annual precipitation	最冷月 最低温/℃ Min temperature of the coldest month	最热月 最高温/℃ Max temperature of the warmest month	土壤 pH 值 Soil pH value	土壤 类型 ²⁾ Soil type ²⁾
JY	N35.19°	E112.49°	350	13.79	573	-4.6	30.2	7.92	GS
YY	N34.51°	E112.13°	304	14.14	635	-4.5	30.8	7.86	CS
LS	N34.30°	E111.09°	820	12.22	654	-6.6	29.0	6.21	CS
SC	N31.43°	E115.35°	633	13.20	1 367	3.1	28.2	7.14	BS

¹⁾JY: 济源市 Jiyuan City; YY: 宜阳县 Yiyang County; LS: 卢氏县 Lushi County; SC: 商城县 Shangcheng County.

²⁾GS: 砂砾土 Gravel soil; CS: 褐土 Cinnamon soil; BS: 棕壤土 Brunisolic soil.

1.2 方法

根据文献[32]中的方法选取样株的12个表型性状,并在7—9月对冬凌草表型性状进行测量。使用卷尺(精度1 mm)测量株高(从地面到植株顶端的高度),并统计一级分枝数(从主干生长出的分枝数量);使用游标卡尺(精度0.01 mm)测量植株主干基部的茎粗;选取靠近基部生长健康、无病虫害的成熟叶片3枚,使用YMJ-C叶面积测定仪(浙江托普云农科技股份有限公司)测量叶片的长、宽、面积、周长,并计算叶形指数(叶长与叶宽的比值);使用游标卡尺测量叶柄长、宽,并计算叶柄长宽比;使用AL-104电子天平(精度0.000 1 g)称量叶鲜质量,之后将叶片于105℃杀青30 min,再于80℃烘干至恒质量后称量叶干质量;在9:00—11:00,使用SPAD502 PLUS型叶绿素测定仪(日本Konica Minolta公司)测定叶片叶绿素相对含量(SPAD)。上述指标均设3个重复,结果取平均值。

1.3 数据处理和统计分析

使用EXCEL 2022软件统计数据。使用IBM SPSS Statistics 27.0软件进行变异分析、单因素方差分析和多重比较(最小显著性差异法),检验各表型

性状在不同野生冬凌草种群间的差异显著性。使用IBM SPSS Statistics 27.0软件进行Pearson相关性分析,并进行抽样适合性(KMO)检验以及主成分分析,在进行相关性分析前对土壤类型进行分类编码处理,在进行主成分分析前对所有表型性状数据进行标准化处理。使用IBM SPSS Statistics 27.0软件,并基于欧氏距离进行聚类分析。

2 结果和分析

2.1 不同野生冬凌草种群表型性状变异特征分析

对河南4个野生冬凌草种群12个表型性状进行多重比较,结果见表2。结果显示:4个野生冬凌草种群的株高为39.78~63.16 cm,一级分枝数为4.5~6.2,茎粗为1.76~2.36 mm,叶长为40.82~59.17 mm,叶宽为26.17~39.64 mm,叶面积为554.42~951.95 mm²,叶周长为114.78~160.18 mm,叶形指数为1.47~1.57,叶柄长宽比为12.57~17.42,叶鲜质量为0.14~0.23 g,叶干质量为0.03~0.07 g,叶绿素相对含量为28.86~40.97。济源市(JY)种群的一级分枝数、叶形指数、叶柄长宽比和叶绿素相对含量最大,其中,

表2 河南不同野生冬凌草种群表型性状比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 2 Comparison on phenotypic traits of different wild populations of *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara in Henan Province ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

种群 ²⁾ Population ²⁾	株高/cm Plant height	一级分枝数 Number of primary branches	茎粗/mm Stem diameter	叶长/mm Leaf length	叶宽/mm Leaf width	叶面积/mm ² Leaf area
JY	48.45±7.79b	6.2±1.3a	2.09±0.15c	54.23±6.13b	34.43±3.81b	693.80±10.46b
YY	45.09±8.57b	4.5±1.1b	2.36±0.31a	40.82±3.54d	26.17±2.42d	603.58±39.70c
LS	39.78±3.62c	5.9±1.0a	1.76±0.09d	59.17±5.01a	39.64±3.23a	951.95±109.86a
SC	63.16±4.97a	5.7±1.3a	2.21±0.14b	45.04±4.98c	30.57±3.27c	554.42±74.67d
F 值 F value	54.284 **	13.458 **	45.929 **	50.581 **	55.117 **	127.603 **
种群 ²⁾ Population ²⁾	叶周长/mm Leaf perimeter	叶形指数 Leaf shape index	叶柄长宽比 Petiole length-width ratio	叶鲜质量/g Leaf fresh mass	叶干质量/g Leaf dry mass	叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content
JY	154.53±5.85a	1.57±0.03a	17.42±1.34a	0.18±0.01c	0.06±0.01b	40.97±2.55a
YY	114.78±7.27b	1.56±0.04a	15.56±0.26b	0.20±0.02b	0.07±0.01a	28.86±3.11d
LS	160.18±11.75a	1.49±0.02b	12.57±0.08c	0.23±0.03a	0.06±0.01b	33.22±3.99c
SC	118.11±13.59b	1.47±0.02c	12.78±0.11c	0.14±0.01d	0.03±0.01c	36.27±3.53b
F 值 F value	98.913 **	123.984 **	221.136 **	73.510 **	93.321 **	50.862 **

¹⁾ 同列中不同小写字母表示不同种群间差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between populations. ** ; $P<0.01$.

²⁾ JY: 济源市 Jiyuan City; YY: 宜阳县 Yiyang County; LS: 卢氏县 Lushi County; SC: 商城县 Shangcheng County.

一级分枝数显著($P<0.05$)高于宜阳县(YY)种群,叶形指数显著高于卢氏县(LS)和商城县(SC)种群,叶柄长宽比和叶绿素相对含量显著高于其余3个种群。YY种群的茎粗和叶干质量最大,显著高于其余3个种群;一级分枝数、叶长、叶宽、叶周长和叶绿素相对含量最小,其中,一级分枝数、叶长、叶宽和叶绿素相对含量显著低于其余3个种群,叶周长显著低于JY和LS种群。LS种群的叶长、叶宽、叶面积、叶周长和叶鲜质量最大,其中,叶长、叶宽、叶面积和叶鲜质量显著高于其余3个种群,叶周长显著高于YY和SC种群;株高、茎粗和叶柄长宽比最小,其中,株高和茎粗显著低于其余3个种群,叶柄长宽比显著低于JY和YY种群。SC种群的株高最大,显著高于其余3个种群;叶面积、叶形指数、叶鲜质量和叶干质量最小,显著低于其余3个种群。

方差分析结果(表2)显示:12个表型性状的F值均达到极显著水平($P<0.01$),种群间差异极显著,其中,叶柄长宽比的F值最大,叶面积和叶形指数的F值较大,说明供试4个野生冬凌草种群存在较为丰富的表型变异。

2.2 表型性状变异系数分析

对河南4个野生冬凌草种群表型性状的变异系数进行分析,结果见表3。结果显示:4个野生冬凌草种群12个表型性状变异系数为0.62%~24.50%,均值为9.93%。一级分枝数和叶干质量变异系数的均

值在18%以上,株高、茎粗、叶长、叶宽、叶面积、叶周长、叶鲜质量和叶绿素相对含量变异系数的均值为7%~14%,叶形指数和叶柄长宽比变异系数的均值较小,均小于3%。4个种群中,宜阳县(YY)和商城县(SC)种群表型性状变异系数的均值较大,分别为10.57%和10.55%,济源市(JY)和卢氏县(LS)种群表型性状变异系数的均值较小,分别为9.20%和9.39%。

2.3 相关性分析

2.3.1 表型性状间的相关性分析 结果(表4)显示:多数表型性状间存在极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)相关性。株高与茎粗呈极显著正相关,与叶绿素相对含量呈显著正相关,与叶面积、叶周长、叶形指数、叶鲜质量、叶干质量呈极显著负相关。一级分枝数与茎粗、叶干质量呈显著负相关,与叶长、叶宽、叶周长、叶绿素相对含量呈极显著正相关。茎粗与叶长、叶宽、叶面积、叶周长、叶鲜质量呈极显著负相关,与叶形指数、叶柄长宽比呈显著正相关。叶长与叶宽、叶面积、叶周长、叶鲜质量、叶绿素相对含量呈极显著正相关,与叶干质量呈显著正相关。叶宽与叶面积、叶周长、叶鲜质量呈极显著正相关,与叶绿素相对含量呈显著正相关。叶面积与叶周长、叶鲜质量、叶干质量呈极显著正相关。叶周长与叶鲜质量、叶干质量、叶绿素相对含量呈极显著正相关。叶形指数与叶柄长宽比、叶干质量呈极显著正相关。叶柄长宽比与叶干质量呈极显著正相关,与叶绿素相对含量呈显著

表 3 河南不同野生冬凌草种群表型性状的变异系数
Table 3 Coefficients of variation of phenotypic traits of different wild populations of *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara in Henan Province

种群 ¹⁾ Population ¹⁾	各表型性状的变异系数/% ²⁾ Coefficient of variation of each phenotypic trait ²⁾												
	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>d</i>	<i>l</i> ₁	<i>b</i> ₁	<i>A</i>	<i>C</i>	LSI	<i>l</i> _p / <i>b</i> _p	<i>m</i> ₁	<i>m</i> ₂	SPAD	均值 Average
JY	16.08	21.45	7.18	11.30	11.07	1.51	3.79	1.91	7.69	5.56	16.67	6.22	9.20
YY	19.01	24.50	13.14	8.67	9.25	6.58	6.33	2.56	1.67	10.00	14.29	10.78	10.57
LS	9.11	16.01	5.15	8.47	8.14	11.54	7.34	1.66	0.62	13.11	19.56	12.00	9.39
SC	7.86	22.27	6.54	11.05	10.71	13.47	11.51	1.69	0.85	8.46	22.51	9.73	10.55
均值 Average	13.02	21.06	8.00	9.87	9.79	8.28	7.24	1.96	2.71	9.28	18.26	9.68	9.93

¹⁾ JY: 济源市 Jiyuan City; YY: 宜阳县 Yiyang County; LS: 卢氏县 Lushi County; SC: 商城县 Shangcheng County.

²⁾ *h*: 株高 Plant height; *n*: 一级分枝数 Number of primary branches; *d*: 茎粗 Stem diameter; *l*₁: 叶长 Leaf length; *b*₁: 叶宽 Leaf width; *A*: 叶面积 Leaf area; *C*: 叶周长 Leaf perimeter; LSI: 叶形指数 Leaf shape index; *l*_p/*b*_p: 叶柄长宽比 Petiole length-width ratio; *m*₁: 叶鲜质量 Leaf fresh mass; *m*₂: 叶干质量 Leaf dry mass; SPAD: 叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content. *: *P*<0.05; **: *P*<0.01.

表 4 河南野生冬凌草表型性状相关性分析¹⁾
Table 4 Correlation analysis on phenotypic traits of wild *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara in Henan Province¹⁾

表型性状 Phenotypic trait	表型性状间的相关系数 Correlation coefficient between phenotypic traits										
	<i>h</i>	<i>n</i>	<i>d</i>	<i>l</i> ₁	<i>b</i> ₁	<i>A</i>	<i>C</i>	LSI	<i>l</i> _p / <i>b</i> _p	<i>m</i> ₁	<i>m</i> ₂
<i>n</i>	0.053										
<i>d</i>	0.601 **	-0.291 *									
<i>l</i> ₁	-0.171	0.371 **	-0.458 **								
<i>b</i> ₁	-0.122	0.367 **	-0.502 **	0.983 **							
<i>A</i>	-0.520 **	0.165	-0.606 **	0.844 **	0.850 **						
<i>C</i>	-0.352 **	0.350 **	-0.510 **	0.946 **	0.902 **	0.854 **					
LSI	-0.343 **	-0.056	0.238 *	0.052	-0.128	0.001	0.219				
<i>l</i> _p / <i>b</i> _p	-0.170	0.064	0.260 *	0.055	-0.109	-0.161	0.191	0.863 **			
<i>m</i> ₁	-0.564 **	-0.044	-0.304 **	0.631 **	0.601 **	0.852 **	0.658 **	0.221	0.014		
<i>m</i> ₂	-0.547 **	-0.284 *	0.050	0.267 *	0.166	0.432 **	0.371 **	0.613 **	0.475 **	0.751 **	
SPAD	0.257 *	0.388 **	-0.104	0.320 **	0.286 *	-0.018	0.377 **	0.101	0.277 *	-0.242 *	-0.267 *

¹⁾ *h*: 株高 Plant height; *n*: 一级分枝数 Number of primary branches; *d*: 茎粗 Stem diameter; *l*₁: 叶长 Leaf length; *b*₁: 叶宽 Leaf width; *A*: 叶面积 Leaf area; *C*: 叶周长 Leaf perimeter; LSI: 叶形指数 Leaf shape index; *l*_p/*b*_p: 叶柄长宽比 Petiole length-width ratio; *m*₁: 叶鲜质量 Leaf fresh mass; *m*₂: 叶干质量 Leaf dry mass; SPAD: 叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content. *: *P*<0.05; **: *P*<0.01.

正相关。叶鲜质量与叶干质量呈极显著正相关,与叶绿素相对含量呈显著负相关。叶干质量与叶绿素相对含量呈显著负相关。

2.3.2 表型性状与环境因子间的相关性分析 结果(表 5)显示:除一级分枝数和叶绿素相对含量外的野生冬凌草表型性状与 9 个环境因子大多呈显著或极显著相关。株高与除海拔、年均温和土壤 pH 值外的环境因子均呈极显著相关,其中,与纬度和最热月最高温呈极显著负相关,与其余环境因子呈极显著正相关。一级分枝数与年均温和最热月最高温呈显著负相关。茎粗与除土壤类型外的环境因子呈显著或极显著相关,其中,与年降水量和最热月最高温呈显著正相关,与纬度呈显著负相关,与海拔呈极显著负相关,与其余环境因子呈极显著正相关。叶长、叶宽、叶面积和叶周长与除最热月最高温外的环境因子呈显著或极显著相关,其中,这 4 个表型性状与纬度和海

拔呈显著或极显著正相关,与其余环境因子呈显著或极显著负相关。叶形指数、叶柄长宽比和叶干质量与 9 个环境因子均呈显著或极显著相关,其中,这 3 个表型性状与纬度、年均温、最热月最高温和土壤 pH 值呈显著或极显著正相关,与其余环境因子呈显著或极显著负相关。叶鲜质量与除海拔外的环境因子均呈极显著相关,其中,与纬度和最热月最高温呈极显著正相关,与其余环境因子呈极显著负相关。叶绿素相对含量与经度呈显著正相关,与土壤类型呈极显著负相关。总体上看,野生冬凌草表型性状受多个环境因子的综合影响,其中,纬度、经度、年均温、年降水量、最冷月最低温和土壤类型对野生冬凌草的生长有显著影响。

2.4 主成分分析

结果(表 6)显示:前 4 个主成分(特征值大于 1)的累计贡献率为 90.686%,能反映野生冬凌草 12 个

表型性状的大部分信息。第1主成分的贡献率为42.684%,其中,叶长(0.910)、叶宽(0.877)、叶面积(0.949)、叶周长(0.947)和叶鲜质量(0.822)的特征向量绝对值明显高于其他表型性状,对第1主成分的影响更明显。第2主成分的贡献率为22.435%,其中,叶形指数(0.822)、叶柄长宽比(0.689)和叶干质量(0.789)的特征向量绝对值明显高于其他表型性状,对第2主成分的影响更明显。第3主成分的贡献率为16.685%,其中,叶柄长宽比(0.662)和叶绿素相

对含量(0.793)的特征向量绝对值明显高于其他表型性状,对第3主成分的影响更明显。第4主成分的贡献率为8.882%,其中,株高(0.602)和茎粗(0.608)的特征向量绝对值明显高于其他表型性状,对第4主成分的影响更明显。

2.5 聚类分析

聚类分析结果(图1)显示:在欧氏距离25处,供试4个种群的77株个体被分为2组,其中商城县(SC)和宜阳县(YY)种群个体聚为I组,卢氏县

表5 河南野生冬凌草表型性状与环境因子的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between phenotypic traits of wild *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara in Henan Province and environmental factors

表型性状 Phenotypic trait	与环境因子的相关系数 Correlation coefficient with environmental factors								
	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude	t_a	P_a	t_{min}	t_{max}	土壤 pH 值 Soil pH value	土壤类型 Soil type
<i>h</i>	-0.711 **	0.830 **	0.007	0.154	0.758 **	0.818 **	-0.503 **	0.160	0.541 **
<i>n</i>	0.030	0.013	0.222	-0.275 *	0.004	-0.015	-0.235 *	-0.165	-0.175
<i>d</i>	-0.217 *	0.436 **	-0.582 **	0.693 **	0.253 *	0.410 **	0.228 *	0.626 **	0.184
l_1	0.380 **	-0.476 **	0.390 **	-0.535 **	-0.386 **	-0.484 **	-0.073	-0.427 **	-0.413 **
b_1	0.245 *	-0.404 **	0.534 **	-0.656 **	-0.263 *	-0.396 **	-0.224	-0.559 **	-0.266 *
<i>A</i>	0.469 **	-0.728 **	0.504 **	-0.659 **	-0.527 **	-0.694 **	0.020	-0.619 **	-0.346 **
<i>C</i>	0.567 **	-0.601 **	0.245 *	-0.426 **	-0.562 **	-0.626 **	0.108	-0.302 **	-0.610 **
LSI	0.760 **	-0.450 **	-0.786 **	0.660 **	-0.709 **	-0.529 **	0.866 **	0.700 **	-0.789 **
l_p/b_p	0.669 **	-0.266 *	-0.839 **	0.728 **	-0.587 **	-0.369 **	0.781 **	0.805 **	-0.791 **
m_1	0.620 **	-0.835 **	0.187	-0.338 **	-0.688 **	-0.801 **	0.360 **	-0.357 **	-0.415 **
m_2	0.795 **	-0.770 **	-0.420 **	0.280 *	-0.822 **	-0.783 **	0.807 **	0.244 *	-0.625 **
SPAD	0.025	0.232 *	-0.088	0.046	0.064	0.154	-0.144	0.203	-0.303 **

¹⁾ t_a : 年均温 Annual mean temperature; P_a : 年降水量 Annual precipitation; t_{min} : 最冷月最低温 Min temperature of the coldest month; t_{max} : 最热月最高温 Max temperature of the warmest month. *h*: 株高 Plant height; *n*: 一级分枝数 Number of primary branches; *d*: 茎粗 Stem diameter; l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; *A*: 叶面积 Leaf area; *C*: 叶周长 Leaf perimeter; LSI: 叶形指数 Leaf shape index; l_p/b_p : 叶柄长宽比 Petiole length-width ratio; m_1 : 叶鲜质量 Leaf fresh mass; m_2 : 叶干质量 Leaf dry mass; SPAD: 叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表6 河南野生冬凌草表型性状的主成分分析

Table 6 Principal component analysis on phenotypic traits of wild *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara in Henan Province

主成分 Principal component	各表型性状的特征向量 Eigenvector of each phenotypic trait							特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	株高 Plant height	一级分枝数 Number of primary branches	茎粗 Stem diameter	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	叶面积 Leaf area	叶周长 Leaf perimeter			
1	-0.537	0.284	-0.605	0.910	0.877	0.949	0.947	5.122	42.684	42.684
2	-0.432	-0.447	0.362	-0.232	-0.371	-0.090	-0.080			
3	0.361	0.485	0.244	0.204	0.103	-0.245	0.250			
4	0.602	-0.320	0.608	0.231	0.249	0.076	0.065			

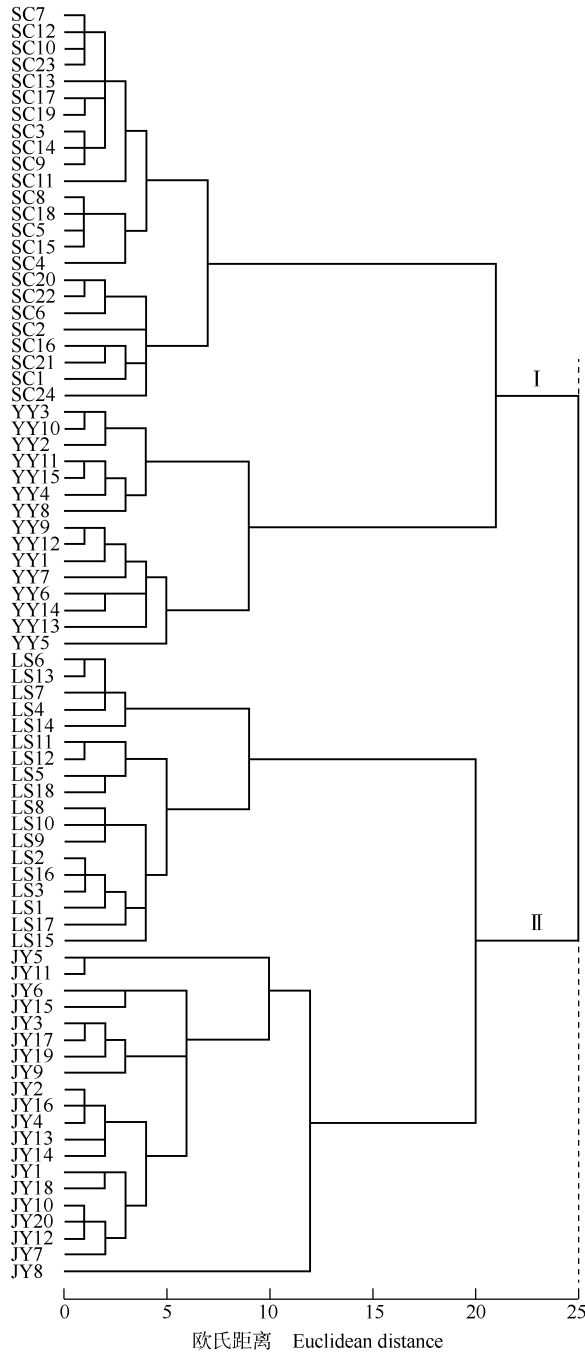
主成分 Principal component	各表型性状的特征向量 Eigenvector of each phenotypic trait					特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	叶形指数 Leaf shape index	叶柄长宽比 Petiole length-width ratio	叶鲜质量 Leaf fresh mass	叶干质量 Leaf dry mass	叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content			
1	0.182	0.093	0.822	0.182	0.153	5.122	42.684	42.684
2	0.822	0.689	0.305	0.822	-0.320	2.692	22.435	65.119
3	0.454	0.662	-0.334	0.454	0.793	2.002	16.685	81.804
4	-0.107	-0.118	0.214	-0.107	-0.076	1.066	8.882	90.686

(LS) 和济源市(JY)种群个体聚为 II 组。在欧氏距离 21 处, I 组可被分为 2 个亚组; 在欧氏距离 20 处, II 组又可被分为 2 个亚组。SC、YY、LS 和 JY 种群个体各自为 1 个亚组。

3 讨论和结论

3.1 野生冬凌草种群表型变异丰富

植物的生长发育受遗传因子和环境因子的共同影响^[33-34]。植物在面临不同生态环境时会产生相应的变异, 从而使植物表型性状产生差异, 最终形成种群间的表型多样性^[35]。高品质药材与其植物表型性状间紧密相连, 合理的植株形态是高品质药材的重要形态表征, 对优良药材的收集、育种具有关键作用^[32]。已有很多学者基于形态指标对药用植物的表型多样性进行了研究, 如铁皮石斛 (*Dendrobium officinale* Kimura et Migo)^[36]、川贝母 (*Fritillaria cirrhosa* D. Don)^[37]、白木香 [*Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng.]^[38] 和黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum* Murray)^[39] 等。表型性状的变异系数反映出植物种质间的个体差异, 变异系数越大, 其表型性状离散程度越大, 表明表型多样性越丰富, 对环境的适应能力越强^[40-41]。当某一性状的变异系数大于 10%, 则表明该性状的分散程度和表型多样性的丰富度较高^[42-43]。本研究结果显示: 河南 4 个野生冬凌草种群 12 个表型性状变异系数为 0.62%~24.50%, 平均变异系数为 9.93%, 大于蒙古岩黄芪 [*Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum* (Turcz.) Turcz. ex Kitog.] (平均变异系数为 6.8%)^[44]、多枝黄芪 (平均变异系数为 8.9%)^[24], 且 *F* 值均达到极显著水平, 说明河南野生冬凌草地上营养器官的表型多样性较为丰富。主要原因是枝条、叶片等营养器官需要进行光合作用, 受环境影响较大^[24]。从种群水平上看, 宜阳县和商城县种群表型性状变异系数的均值较大, 济源市和卢氏县种群表型性状变异系数的均值较小。宜阳县和商城县种群变异较大可能是因为该种源样株采集的范围较广, 所处生境复杂多样 (林下灌木、山坡阳面和路旁等), 进而呈现出显著的表型差异^[45]¹³。而济源市和卢氏县种群变异较小可能是因为该种源地的野生冬凌草长势一般, 且样株多分布在山路两旁。环境因子可引起表型可塑性的分化^[46]。野生冬凌草种群株高、一级分枝数和叶干质量的变异系数较大, 均值大于 10%, 叶形指数和叶柄长宽比的变异系数较小, 均值小于 3%。这可能是由于河南地处暖温带向亚热带过渡区域, 河南野生冬凌草分布区内的温度、土壤湿度及海拔等环境因子差异显著 (伏牛山与



JY: 济源市 Jiyuan City; YY: 宜阳县 Yiyang County; LS: 卢氏县 Lushi County; SC: 商城县 Shangcheng County.

图 1 基于 12 个表型性状的河南野生冬凌草种群的聚类分析
Fig. 1 Cluster analysis on wild populations of *Isodon rubescens* (Hemsl.) H. Hara in Henan Province based on 12 phenotypic traits

大别山区的生境分异)导致的表型可塑性分化。然而,野生冬凌草表型是否受生境异质性影响,尚待后续深入研究。

3.2 野生冬凌草表型性状间的相关性

植物在进化过程中表现出显著的表型相关性,即某种基因型通过不同表型性状间的协同调控,在不同环境条件下呈现差异化的性状表达模式,这种性状间的功能关联是植物适应异质环境的重要进化机制^[47-48]。了解表型性状间的相关性有助于达到通过一种性状间接选择另一种性状的效果,可提高优良植物品种的选育效率,推进育种进程^{[45]37,[49]}。野生冬凌草种群的表型性状相关性分析结果表明多数性状间呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关。其中,叶长、叶宽、叶面积、叶周长、叶鲜质量和叶干质量间总体呈显著或极显著正相关,表明这些性状间的关系较为密切,这与芍药(*Paeonia lactiflora* Pall.)^[50]和春兰[*Cymbidium goeringii* (Rehb. f.) Rehb. f.]^[51]的研究结果相似。因此,在进行野生冬凌草野外采集和良种选育中可通过叶长、叶面积、叶周长等便于测量的表型性状推测其生物量等重要的药材品质,在一定程度上减少了调查与研究的盲目性^[52]。后续可从生化及分子机制方面探究些性状间的内在机制。

不同物种由于对所处环境的适应性和敏感度不同,表现出不同的地理变异模式^[53]。本研究发现,野生冬凌草叶片、茎部位的表型性状与环境因子间大多呈显著或极显著相关。经度、年均温、年降水量、最冷月最低温、土壤 pH 值和土壤类型与大多数表型性状呈显著或极显著负相关,纬度、海拔和最热月最高温与大多数表型性状呈显著或极显著正相关。总体上看,野生冬凌草表型性状受多个环境因子的综合影响,其中,纬度、经度、年均温、年降水量、最冷月最低温和土壤类型对野生冬凌草的生长有显著影响。已有研究结果^[54]表明:气候是影响叶表型变异的关键因子之一。商城县的年降水量明显高于其他 3 个分布地,该分布区内野生冬凌草种群的叶质量显著低于其他 3 个种群,推测野生冬凌草不适合生长在高降水的环境。相较于其他叶片表型性状,野生冬凌草叶干质量变异系数均值最大(18.26%),且叶干质量与纬度、经度、海拔、年降水量、最冷月最低温、最热月最高温和土壤类型均呈极显著相关,推测以叶入药的药材品质可能主要受海拔、降水、温度和经纬度的影响^[32,55]。

3.3 野生冬凌草表型性状筛选

主成分分析可以确定各变量对种群差异的贡献,揭示植物群体间的遗传差异,加快种质资源分类速度^[56-57]。李雁瓷等^[58]采用主成分分析研究秋海棠(*Begonia grandis* Dryand.)的表型多样性,发现花大小、叶大小、叶色、花色和植株大小是秋海棠分类的主要标准和依据。陈百强等^[59]通过主成分分析筛选出叶片长、叶片宽、叶片面积、叶片周长、叶柄长、叶柄宽、叶基角、叶形、叶基形态和秋叶表面颜色作为观赏乌桕[*Triadica sebifera* (Linn.) Small]分类及筛选的重要指标。主成分分析结果显示,野生冬凌草表型性状前 4 个主成分的累计贡献率高达 90.686%,说明这 4 个主成分能客观反映河南产区野生冬凌草 12 个表型性状的绝大部分信息。第 1 主成分中叶长、叶宽、叶面积、叶周长和叶鲜质量以及第 2 主成分中叶形指数的特征向量绝对值均大于 0.8,是影响野生冬凌草表型多样性的关键性状,在未来种质资源调查及分类研究中,可作为重点观测性状。同时也说明叶片表型性状在揭示植物群体间的遗传差异和资源分类方面具有重要作用。

聚类分析广泛应用于植物种质资源的遗传关系和分类研究,为揭示种质个体相关性提供直观的分类方法^[60]。聚类分析结果表明:河南 4 个野生冬凌草种群中,商城县和宜阳县种群个体聚为一组,卢氏县和济源市种群个体聚为另一组。商城县和宜阳县均位于河南省的南部或西南部地区,卢氏县和济源市则位于西北部地区,2 个组地理位置上存在一定的距离,这在一定程度上解释了这一分组模式,反映了不同区域生态环境和气候条件的异质性对野生冬凌草表型性状分化的驱动作用。济源市野生冬凌草种群独特、品质优良,其有效成分冬凌草甲素含量较其他区域高 50%以上^[61],结合聚类分析结果,位于河南西北部的卢氏县和济源市的野生冬凌草在表型性状(如一级分枝数、叶长、叶宽、叶面积和叶周长)上表现出一定优势。因此,卢氏县和济源市的野生冬凌草可作为选育叶长、叶宽、叶面积和叶周长较大的种源。

3.4 结论

综上所述,河南 4 个野生冬凌草种群具有较高的表型多样性,大多数表型性状间呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关。除一级分枝数和叶绿素相对含量外的 10 个表型性状与选取的 9 个环境因子大多呈显著或极显著相关。对表型变异贡献最大的性状

是叶长、叶宽、叶面积、叶周长、叶形指数、叶鲜质量, 是评价野生冬凌草种质资源的主要指标。聚类分析中卢氏县和济源市的野生冬凌草种群个体聚到一起, 且这2个产地野生冬凌草叶表型性状表现优良, 主要特征为一级分枝数、叶长、叶宽、叶面积和叶周长较大。河南省是冬凌草中药资源的重要来源地, 但野生冬凌草的产量和质量因受环境和人为因子影响较大而具有不稳定性, 未来可依靠分子标记辅助技术加强冬凌草优良种质资源筛选的精确度和可靠性。

参考文献:

- [1] 魏玉君, 贺德留, 魏玉玲, 等. 药用植物冬凌草保持水土效益的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 24-27.
- [2] 卫 彤. 冬凌草药渣中纤维素的提取及功能性纤维素膜的制备研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021: 1-15.
- [3] 陈随清, 董成明, 冯卫生. 太行山区冬凌草生态环境及生物学特性研究[J]. 中国野生植物资源, 2005, 24(4): 33-35.
- [4] 常晶晶. 遮荫和增施 UV-B 对冬凌草生长和活性成分的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2021: 1-11.
- [5] 刘 净, 梁敬钰, 谢 韬. 冬凌草研究进展[J]. 海峡药学, 2004, 16(2): 1-7.
- [6] 刘晨江, 赵志鸿. 冬凌草的研究进展[J]. 中国药学杂志, 1998, 33(10): 577-581.
- [7] 宋立人, 洪 恂, 丁绪亮, 等. 现代中药学大辞典: 上册[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001: 729-731.
- [8] 李彩芸, 陈旭雯, 岳飞燕, 等. 冬凌草甲素抗炎机制研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(2): 88-93.
- [9] 彭延延, 施秋萍, 杨大朋, 等. 冬凌草甲素对人乳腺癌细胞侵袭的抑制作用及机制[J]. 苏州大学学报(医学版), 2012, 32(3): 318-321.
- [10] 赵 凡, 钟尊合, 王锦锐, 等. 冬凌草甲素对膀胱癌细胞凋亡作用及其分子机制研究[J]. 中国中西医结合外科杂志, 2023, 29(1): 103-108.
- [11] 魏玉君, 贺德留, 魏玉玲, 等. 药用植物冬凌草保持水土效益的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 24-27.
- [12] 张中印, 刘荷芬, 张金芳, 等. 河南省济源市中药材蜜源植物调查[J]. 蜜蜂杂志, 2007(11): 40-42.
- [13] JIAN Z Y, TANG X M, HU G H. The water and oridonin sources in the ice ribbons of *Isodon rubescens* [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 17077.
- [14] 王文奎, 周春玲, 戴思兰. 毛华菊花朵形态变异[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(3): 92-95.
- [15] LAST L, LÜSCHER G, WIDMER F, et al. Indicators for genetic and phenotypic diversity of *Dactylis glomerata* in Swiss permanent grassland[J]. Ecological Indicators, 2014, 38: 181-191.
- [16] ZHANG Z, YAO Z Y, MA Q Q, et al. A study on the phenotypic diversity of *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) Ying [J]. Pakistan Journal of Botany, 2022, 54(6): 2291-2302.
- [17] DONG X S, CHEN X X, GAI Z S, et al. Phenotypic diversity and variation in natural *Populus euphratica* populations shaped by environmental factors [J]. Contemporary Problems of Ecology, 2023, 16: 230-252.
- [18] TONOSAKI K, FUJIMOTO R, DENNIS E S, et al. Corrigendum: will epigenetics be a key player in crop breeding? [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1157933.
- [19] LAZAREVIĆ B, ŠATOVIĆ Z, NIMAC A, et al. Application of phenotyping methods in detection of drought and salinity stress in basil (*Ocimum basilicum* L.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 629441.
- [20] CALLA B, MORENO J E. VipariNama: combining CRISPR and systemic virus-based vectors for rapid phenotyping of complex plant traits[J]. Plant Physiology, 2021, 186(4): 1754-1756.
- [21] ULLAH F, GAO Y D, SARI İ, et al. Macro-morphological and ecological variation in *Rosa sericea* complex[J]. Agronomy, 2022, 12: 1078.
- [22] UDDIN N, MUHAMMAD N, ALI S S, et al. Characterization of the genetic variability within *Ziziphus nummularia* genotypes by phenotypic traits and SSR markers with special reference to geographic distribution[J]. Genes, 2023, 14: 155.
- [23] 贺漫娟, 代色平, 陈秀萍, 等. 17种石斛属植物表型性状多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(2): 71-79, 90.
- [24] 刘青青, 蔡宗程, 吕亮雨, 等. 三江源地区野生多枝黄耆资源表型性状多样性及与环境因子的相关性分析[J]. 河南农业科学, 2024, 53(8): 61-69.
- [25] 杨晓娟, 梁永延, 王禧龙, 等. 广西野生水松表型多样性及其与地理-气候因子的关系[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(4): 61-70.
- [26] ZHANG K Q, ZHU Z, SHI R R, et al. Phenotypic diversity and seed germination of *Elaeagnus angustifolia* L. in relation to the geographical environment in Gansu Province, China [J]. Agronomy, 2024, 14: 2165.
- [27] 么 厉, 程惠珍, 杨 智. 中药材规范化种植(养殖)技术指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 52-59.
- [28] 李 艳, 郭利敏, 孜白旦·阿不来提, 等. 冬凌草甲素对脑缺血再灌注模型 AMPK/SIRT1/PGC-1 α 信号通路调控研究[J]. 脑与神经疾病杂志, 2024, 32(12): 727-735.
- [29] 贺守第, 孙晨霞, 廖威权, 等. 冬凌草及冬凌草甲素对类风湿关节炎血瘀证小鼠炎症模型的影响[J]. 湖南中医药大学学报, 2024, 44(11): 1984-1990.
- [30] LIU Y J, HE P X, MA X B, et al. The combination of SLC7A11 inhibitor and oridonin synergistically inhibits cervical cancer cell growth by decreasing the NADPH/NADP⁺ ratio [J]. Genes and Diseases, 2025, 12: 101265.
- [31] 姚会枝, 李吉学, 郑海娜. 冬凌草提取物对 CCl₄ 诱导的小鼠急性肝损伤的影响 [J]. 解放军药学学报, 2009, 25(5): 377-379.
- [32] 施桂萍, 王佳恩, 马 莉, 等. 药材品质与药用植物表型性状间相关性研究进展[J]. 中药材, 2024, 47(7): 1853-1861.

- [33] LIU D L, WANG X Q, LI W S, et al. Genetic diversity analysis of the phenotypic traits of 215 sugar beet germplasm resources [J]. Sugar Tech, 2022, 24(6): 1790-1800.
- [34] CHIKH-ROUHOU H, MEZGHANI N, MNASRI S, et al. Assessing the genetic diversity and population structure of a Tunisian melon (*Cucumis melo* L.) collection using phenotypic traits and SSR molecular markers[J]. Agronomy, 2021, 11: 1121.
- [35] 焦振彬, 罗毅波. 群体表型性状研究揭示环境与遗传因素对霍山石斛表型及物种分类的影响[J]. 生物多样性, 2021, 29(8): 1073-1086.
- [36] 刘 练. 贵州栽培铁皮石斛种质资源遗传多样性和化学成分差异分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024: 10-53.
- [37] 杨泽敏, 王 业, 吴宇涵, 等. 川贝母种质资源的表型多样性及综合评价[J]. 中草药, 2025, 56(2): 635-646.
- [38] 赵 翮, 赵树进. 白木香群体的表型多样性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 117-122.
- [39] 杨 荣. 基于表型及 SNP 标记的黑果枸杞种质资源评价与新品种选育[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024: 17-34.
- [40] STOJNIĆ S, ORLOVIĆ S, MILJKOVIĆ D. Intra- and interprovenance variations in leaf morphometric traits in European beech (*Fagus sylvatica* L.) [J]. Archives of Biological Sciences, 2016, 68(4): 781-788.
- [41] 王娅丽, 李 毅. 祁连山青海云杉天然群体的种实性状表型多样性[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 355-362.
- [42] PÉLABON C, HILDE C H, EINUM S, et al. On the use of the coefficient of variation to quantify and compare trait variation [J]. Evolution Letters, 2020, 4(3): 180-188.
- [43] LIGARRETO G A, DEL PILAR PATIÑO M, MAGNITSKIY S V. Phenotypic plasticity of *Vaccinium meridionale* (Ericaceae) in wild populations of mountain forests in Colombia [J]. Revista de Biología Tropical, 2011, 59(2): 569-583.
- [44] 周媛媛, 周向睿, 周志宇, 等. 不同株龄蒙古岩黄芪表型性状的变异特征[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 134-141.
- [45] 石蓉蓉. 甘肃省不同种源沙枣表型多样性-观赏性及抗旱性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [46] NICOTRA A B, ATKIN O K, BONSER S P, et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate [J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(12): 684-692.
- [47] ALFARO R I, FADY B, VENDRAMIN G G, et al. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 333: 76-87.
- [48] PICHANCOURT J B, VAN KLINKEN R D. Phenotypic plasticity influences the size, shape and dynamics of the geographic distribution of an invasive plant [J]. PLoS ONE, 2018, 7(2): e32323.
- [49] 芮文婧, 王晓敏, 张倩男, 等. 番茄 353 份种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 园艺学报, 2018, 45(3): 561-570.
- [50] 钱景扬, 卢莉莉, 李 芹, 等. 中国芍药品种资源表型性状多样性分析[J]. 园艺学报, 2025, 52(2): 349-364.
- [51] 魏晓羽, 刘 红, 瞿 辉, 等. 158 份春兰种质资源的表型多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(2): 398-411.
- [52] NORMAN P E, TONGOONA P, SHANAHAN P E. Determination of interrelationships among agr-morphological traits of yams (*Discorea* spp.) using correlation and factor analyses[J]. Journal of Applied Biosciences, 2011, 45: 3059-3070.
- [53] ZENG Y F, ZHANG J G, ABUDUHAMITI B, et al. Phylogeographic patterns of the desert poplar in Northwest China shaped by both geology and climatic oscillations [J]. BMC Evolutionary Biology, 2018, 18: 75.
- [54] 冯 云, 张 韫, 范少辉, 等. 12 种竹子的叶表型变异及其与环境因子的关系 [J]. 西北林学院学报, 2024, 39(1): 147-153.
- [55] POORTER H, NIKLAS K J, REICH P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. New Phytologist, 2012, 193: 30-50.
- [56] 郑国保, 马 玲, 撤志明, 等. 不同生育期水分胁迫条件下宁夏枸杞果实的主成分分析与综合评价 [J]. 节水灌溉, 2022(1): 47-51, 57.
- [57] 姜楠南, 孙 音, 刘凤栾, 等. 女贞种质资源 ISSR 分析与抗寒优株选育[J]. 经济林研究, 2021, 39(2): 18-26.
- [58] 李雁瓷, 付乃峰, 孙加芝, 等. 秋海棠 (*Begonia grandis*) 的种内表型多样性[J]. 植物研究, 2021, 41(5): 775-788.
- [59] 陈百强, 曹受金, 沈 鑫, 等. 观赏乌柏品种表型多样性分析及综合评价[J]. 分子植物育种, 2022, 20(12): 4108-4120.
- [60] 张强强, 梁 赛, 王 艳, 等. 基于表型性状和 SSR 标记的 57 份辣椒种质遗传多样性分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(4): 356-366.
- [61] 于红卫. 河南药茶 天坛山冬凌草茶 [J]. 河南农业, 2022(34): 65.

(责任编辑: 郭严冬)