

红棕杜鹃不同海拔种群的表型多样性研究

苏应雄¹, 张 雪¹, 王文礼², 赵云勇³, 王跃华¹, 申仕康^{1*}

(1 云南大学 生命科学学院, 昆明 650091; 2 云南大学 生态学与环境学院, 昆明 650091; 3 云南轿子山国家级自然保护区管理局, 昆明 650000)

摘 要: 为了揭示高山杜鹃群体在不同海拔梯度上的表型变异程度和变异规律, 以云南轿子山国家级自然保护区天然分布的 5 个海拔梯度红棕杜鹃种群为研究对象, 通过对其 12 个性状的测量, 分析不同海拔梯度下红棕杜鹃种群的表型多样性。结果表明: (1) 调查的 12 个性状中 5 个存在显著差异, 占总表型性状的 41.67%; 各性状变异系数(CV)的大小分布在 8.51%~34.32%之间; 相对极差(R')分布在 38.04%~100%之间, 低海拔种群(P1 和 P2)的表型性状变异丰富、极端变异高, 而中、高海拔种群(P3、P4、P5)的表型性状变异和极端变异程度较低。(2) Shannon-Weaver 多样性指数分析表明, 轿子山红棕杜鹃不同海拔种群存在丰富的表型多样性, 5 个海拔种群的平均表型多样性指数为 2.453 4, 12 个表型性状的平均多样性指数为 4.076 3。(3) 相关性分析表明, 花序宽和花柄长与海拔呈显著负相关, 其它性状与海拔相关性并不显著。(4) 聚类分析表明, 红棕杜鹃不同海拔种群可以聚为明显的 2 支。研究认为, 轿子山自然保护区红棕杜鹃不同海拔种群的环境异质性是影响其表型变异的主要因素。

关键词: 红棕杜鹃; 表型多样性; 海拔; 遗传变异; 保护

中图分类号: Q348

文献标志码: A

Phenotypic Diversity of *Rhododendron rubiginosum* Populations at Different Altitudes

SU Yingxiong¹, ZHANG Xue¹, WANG Wenli²,
ZHAO Yunyong³, WANG Yuehua¹, SHEN Shikang^{1*}

(1 School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2 School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China; 3 Jiaozi Mountain National Nature Reserve of Yunnan Province, Kunming 650000, China)

Abstract: In order to reveal the phenotypic diversity and variation pattern of Alpine *Rhododendron* species, we measured 12 phenotypic traits of *Rhododendron rubiginosum* natural populations at five different altitudes in Jiaozi Mountain National Natural Reserve of Yunnan Province and studied the levels of phenotypic diversity by using ANOVA analysis, correlation analysis and cluster analysis. The results indicated that: (1) there were significant differences in phenotypic variations among and within populations. Coefficient of variation (CV) of these traits ranged from 8.51% to 34.32%, and RHL (R') ranged from 38.04% to 100%. High phenotypic variations were occurred in the relative low elevation populations (P1 and P2), while low degree of variations occurred in the moderate and high elevation populations (P3, P4 and P5). (2) Based on the Shannon-Weaver diversity index (H') analysis, the mean phenotypic diversities index of

收稿日期: 2016-11-29; 修改稿收到日期: 2017-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(31560224, 31360155)

作者简介: 苏应雄(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事植物种质保护研究。E-mail: 1158750114@qq.com

* 通信作者: 申仕康, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植物种质保护与系统进化研究。E-mail: ssk168@ynu.edu.cn 或 yunda123456@126.com

5 sample elevation populations was 2.453 4, and the mean phenotypic diversity index of 12 phenotypic traits was 4.076 3. It indicated that there were richness phenotypic diversity in *R. rubiginosum* populations. (3) The correlation analysis showed that there were significant correlations among these traits. There were significant negative correlations between elevation and FSL and IW. However, there was no significant correlation between elevation and other traits. (4) The 5 sampled populations of *R. rubiginosum* could be divided into two groups according to the UPGMA cluster analysis. Therefore, the trait variations of natural populations at different altitudes were affected mainly by micro-environmental heterogeneity of different *R. rubiginosum* populations.

Key words: *Rhododendron rubiginosum*; phenotypic diversity; elevation; genetic diversity; conservation

植物的表型特征是其长期进化过程中遗传与环境因素综合作用的结果,同时也是物种适应性进化的外在表现形式^[1-2],因此,通过植物表型多样性的分析可以揭示群体的遗传规律与变异大小^[3],同时,与分子水平上表现出的遗传多样性相比,植物表型多样性随海拔变化表现更为直接,也被越来越多的人关注^[3-6]。随着海拔的升高,环境温度和资源可获得性均会降低,降水量和太阳辐射量增加,植被呈现垂直带性变化^[7],此外,海拔变化导致的环境异质性也会影响物种的表型特征与繁殖策略^[8],并进一步影响其遗传变异^[9]。因此,通过对不同海拔梯度上植物表型多样性的研究,不仅可以了解物种的遗传变异,还可以为深入探讨物种对异质化生境的适应性提供科学依据。

杜鹃属(*Rhododendron*)为中国和喜马拉雅植物区系中的大属之一,中国西南地区(云南、四川、西藏)是该属植物重要的现代分布和演化中心。杜鹃花是世界著名的四大高山花卉之一,具有重要的园艺价值和经济价值。同时,本属植物也是森林植被的重要组成部分,特别是在高山及亚高山植被中是重要的建群种类^[10]。近年来,国内外对杜鹃属植物的研究主要集中在其遗传多样性、繁殖生物学、种子生理生态以及引种栽培等方面^[11-13],但是高山杜鹃表型多样性对海拔梯度的响应研究则鲜见报道。本

研究选取云南轿子山自然保护区杜鹃属、亮鳞杜鹃亚组中的红棕杜鹃(*Rhododendron rubiginosum*)为目标种,通过对其繁殖器官和营养器官的 12 个性状进行测量与分析,探明其表型多样性对海拔梯度的响应,有助于了解该物种在群体间和群体内的表型变异以及随海拔变化的表型响应,同时可以探究影响物种群体表型特性和表型多样性变化的因素,为该物种的种质保护、资源评估和可持续开发利用提供基础。

1 材料和方法

1.1 实验样地及红棕杜鹃种群选择

云南轿子山国家级自然保护区位于滇中北部,地处昆明市东川区和禄劝县交界处,地理坐标位于 E102°48'49"~102°58'50",N26°0'23"~26°10'20"之间,海拔 2 300~4 340 m,是滇中地区最高的山地。轿子山国家级自然保护区植物资源丰富,区内共有维管植物 153 科 485 属 1 070 种(亚种、变种),保护区植被的垂直分布受坡向、坡度和小气候环境等因素的影响,植被类型交错分布明显,主要有暖性针叶林、暖性灌丛、半湿润常绿阔叶林、中山湿性常绿阔叶林、落叶阔叶林、山顶苔藓矮林、寒性针叶林、寒性灌丛、寒温性草甸等植被类型^[14-16]。

2015~2016 年期间在云南轿子山国家级自然保

表 1 云南轿子山国家自然保护区红棕杜鹃不同海拔种群概况

Table 1 General situations of 5 sampled altitudinal populations of *Rhododendron rubiginosum* in Jiaozi Mountain Nature Reserve, Yunnan Province

种群 Population	样本数 Sample number	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	生境 Habitat
P1	12	102°19'0.20"	26°03'50.1"	2 810	杜鹃与灌木林 <i>Rhododendron</i> and other shrub forest
P2	12	102°48'56.8"	26°03'40.6"	2 915	多种杜鹃混交林 <i>Rhododendron</i> mixed forest
P3	12	102°49'07.5"	26°03'49.0"	3 015	红棕杜鹃林 <i>R. rubiginosum</i> forest
P4	12	102°49'19.4"	26°03'32.5"	3 115	红棕杜鹃林 <i>R. rubiginosum</i> forest
P5	12	102°49'32.9"	26°03'35.0"	3 215	红棕杜鹃林 <i>R. rubiginosum</i> forest

护区内对红棕杜鹃进行多次野外实地调查,调查发现,轿子山国家级自然保护内红棕杜鹃主要生长于海拔 2 800~3 360 m 的山地区域。本研究根据其海拔分布,选择 5 个间隔 100 m 海拔高度的样地作为试验样地。根据每个实验样地种群大小,随机选取 12 株红棕杜鹃植株作为一个种群处理,并对种群内各植株的表型性状进行实地测量,并采用 GPS 记录各采集样地的经纬度和海拔(表 1)。

1.2 表型性状的选取与测定

选取花序花朵数(FN)、花序宽(IW)、单花花径(SFL)、花瓣长(FPL)、花柄长(FSL)、雄蕊最长长度(SLL)、雄蕊最短长度(SSL)、雌蕊长(PL)、子房长(OL)、叶柄长(LSL)、叶长(LL)、叶宽(LW)共 12 个表型性状,分别对随机选取的不同海拔(AL)梯度各种群内生长良好、无明显病虫害的植株进行测定。其中花序宽、花序宽、单花花径、花瓣长、叶长、叶宽采用直尺测量,花柄长、雄蕊最长长度、雄蕊最短长度、雌蕊长、子房长、叶柄长等性状采用游标卡尺测量。

1.3 数据处理

将 5 个种群 144 个个体的 12 个表型性状作为特征量,运用采用 SPSS 22 (SPSS Inc. Chicago Il-liong) 中的 One-way ANOVA 程序进行分析,分别计算不同性状的平均值、平方和、均方、标准差、标准

误差、 F 值和显著水平。采用表型特征变异系数(CV)和相对极差(R')反映种群间的离散程度, $R'=R_i/R_o$,其中 R_i 表示种群内极差, R_o 表示总极差。多样性指数采用 Shannon-Weaver 信息指数(H'),即 $H'=-\sum P_i \ln P_i$, P_i 为某性状第 i 个代码值出现的概率。并采用 Pearson 相关性分析的方法分析 12 组性状间、海拔与不同性状间的相关性关系。计算欧氏距离系数,采用非加权配对算术平均法(UP-GMA)进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 红棕杜鹃不同海拔种群的表型性状特征

红棕杜鹃各表型性状在不同海拔种群中存在较明显的差异性,且不同性状表现不同。方差分析表明(表 2),12 个性状中单花花径(SFL)、雌蕊长(PL)、叶柄长(LSL)、叶长(LL)和子房长(OL)在不同海拔种群中呈显著性差异($P<0.05$),其它 7 个性状则并未达到显著性差异。红棕杜鹃 12 个表型性状中,花序宽(IW)、最长雄蕊长度(SLL)最大的是低海拔种群(P1);而花序花朵数(FN)则在高海拔种群(P5)达到最大值。

2.2 红棕杜鹃不同海拔种群的表型变异

变异系数的大小可以反映表型性状的变异程度,

表 2 红棕杜鹃不同海拔种群表型特征
Table 2 Phenotypic characteristics of 5 sampled populations in *R. rubiginosum*

表型形状 Phenotypic trait	种群 Population					方差分析 Variance analysis	
	P1	P2	P3	P4	P5	F	P
FN	7.25±1.29	7.17±1.27	6.25±1.29	6.58±1.24	7.58±1.16	2.228	0.078
IW	9.20±2.20	8.62±2.10	8.05±0.85	8.62±1.48	7.67±0.93	1.598	0.188
SFL	4.14±0.73	4.26±0.71	3.70±0.31	4.33±0.47	3.87±0.42	2.841	0.033
FPL	3.02±0.50	3.34±0.28	3.12±0.31	3.18±0.29	3.11±0.26	1.514	0.211
FSL	1.41±0.48	1.43±0.36	1.23±0.32	1.27±0.20	1.11±0.35	1.687	0.166
SLL	2.84±0.31	2.81±0.42	2.74±0.26	2.81±0.41	2.67±0.33	0.492	0.741
SSL	1.57±0.38	1.65±0.35	1.51±0.24	1.61±0.24	1.48±0.27	0.675	0.612
PL	3.29±0.28	3.58±0.29	2.96±0.73	3.33±0.50	3.23±0.28	2.676	0.041
OL	0.45±0.05	0.53±0.06	0.50±0.09	0.43±0.05	0.47±0.06	4.742	0.002
LSL	1.16±0.34	1.16±0.18	0.95±0.22	1.18±0.17	0.96±0.19	3.004	0.026
LL	6.27±0.98	6.35±1.33	6.53±0.97	7.06±0.98	6.67±0.90	1.070	0.038
LW	2.83±0.46	2.70±0.67	2.73±0.39	2.88±0.49	2.55±0.38	0.794	0.534

注: FN. 花朵数;IW. 花序宽;SFL. 单花花径;FPL. 花瓣长;FSL. 花柄长;SLL. 最长雄蕊;SSL. 最短雄蕊;PL. 雌蕊长;OL. 子房长;LSL. 叶柄长;LL. 叶长;LW. 叶宽;AL. 海拔。下同

Note: FN. Flowers number;IW. Width of inflorescence;SFL. Flower diameter ;FPL. Petal length; FSL. Flower stalk length;SLL. Longest Stamen length;SSL. Short stamen length;PL. Pistil length;OL. Ovary length;LSL. Leaf stalk length;LL. Leaf length;LW. Leaf width;AL. Altitude . The same as below

表 3 红棕杜鹃各海拔种群变异系数及离散系数

Table 3 CV and R' of 5 sampled populations in *R. rubiginosum*

性状 Trait	种群 Population										平均值 Mean	
	P1		P2		P3		P4		P5		CV R'	
	CV	R'	CV	R'	CV	R'	CV	R'	CV	R'		
FN	17.77	66.67	17.68	66.67	20.61	83.33	18.84	66.67	15.36	66.67	18.05	70.00
IW	23.89	79.35	24.42	78.26	10.60	34.78	17.20	55.43	12.11	38.04	17.64	57.17
SFL	17.58	83.33	16.65	79.17	8.39	41.67	10.75	66.67	10.77	58.33	12.83	65.83
FPL	16.41	100.00	8.51	52.94	10.13	70.59	9.07	64.71	8.51	52.94	10.53	68.24
FSL	34.32	95.00	24.77	60.00	25.64	55.00	15.91	35.00	31.85	60.00	26.50	61.00
SLL	10.97	66.67	14.90	93.33	9.52	53.33	14.52	100.00	12.21	73.33	12.42	77.33
SSL	24.09	93.33	21.07	80.00	16.11	53.33	14.87	60.00	18.31	66.67	18.89	70.67
PL	8.64	57.14	8.19	71.43	9.86	78.57	14.94	92.86	11.63	100.00	10.65	80.00
OL	10.28	46.15	10.72	65.38	18.16	100.00	11.22	50.00	12.37	57.69	12.55	63.84
LSL	29.55	90.91	15.38	54.55	23.54	63.64	14.63	50.00	19.42	54.55	20.50	62.73
LL	15.58	72.00	21.09	88.00	14.93	60.00	13.87	66.00	13.53	54.00	15.80	68.00
LW	16.27	47.83	24.72	91.30	14.16	56.52	17.11	65.22	15.00	56.52	17.45	63.48
平均值 Mean	18.78	74.87	17.34	73.42	15.14	62.56	14.41	64.38	15.09	61.56	16.15	67.36

变异系数越大说明该群体变异幅度越大,表型多样性越丰富;反之,则表明群体变异幅度越低,表型多样性低^[17]。由表 3 可知,红棕杜鹃不同表型性状的平均变异系数顺序为:FSL > LSL> SSL> FN> IW> LW> LL> SFL> OL> SLL> PL> FPL。各表型性状中平均变异系数最大的为花柄长(FSL)(CV = 26. 5%),最小的是花瓣长(FPL,CV = 10. 53%)。表明各性状中花瓣长(FPL)相对稳定,而花柄长(FSL)性状变异较大。同一性状在不同海拔种群中的变异程度,以及同一海拔种群内不同性状的变异性差别也较大。整体来看,红棕杜鹃不同海拔种群中 CV 值表现为:P1>P2>P3>P5>P4。

相对极差 R' 的大小代表着群体间的极端变异程度高低,R' 值越大代表表型极端离异程度越大。由表 3 可知,红棕杜鹃 5 个海拔种群中 12 个性状的 R' 值依次为:PL> SLL> SSL> FN> FPL> LL > SFL> OL> LW> LSL> FSL> IW。而在不同海拔种群上,红棕杜鹃 12 个表型性状的 R' 值表现为:P1> P2> P4> P3> P5(表 3)。表明 P1、P2 种群的表型性状变异丰富、极端变异高,P3、P4、P5 种群的表型性状变异、极端变异程度较低。

2.3 红棕杜鹃不同海拔种群的 Shannon-Weaver 多样性

表 4 显示,红棕杜鹃 5 个海拔种群的 Shannon-Weaver 多样性指数介于 2. 426 5~2. 463 0 之间,平均多样性指数为 2. 453 4,表明其具有较高的多样性。其中 P3 种群的表型多样性最高,为 2. 463 0;P5

表 4 不同海拔红棕杜鹃种群以及表型性状的 Shannon-Weaver 多样性

Table 4 Shannon-Weaver information index based on phenotypic characters of *R. rubiginosum*

项目 Item		H'
种群 Population	P1	2. 455 2
	P2	2. 459 5
	P3	2. 463 0
	P4	2. 462 9
	P5	2. 426 5
	均值 Mean	2. 453 4
表型性状 Phenotypic traits	FN	4. 080 0
	IW	4. 080 0
	SFL	4. 089 7
	FPL	4. 079 8
	FSL	4. 058 5
	SLL	4. 089 6
	SSL	4. 078 7
	PL	4. 089 7
	OL	4. 079 9
	LSL	4. 079 6
	LL	4. 062 7
	LW	4. 047 2
平均值 Mean		4. 076 3

种群的表型多样性最小,为 2. 426 5。5 个种群 H' 值变化趋势为:P3>P4>P2>P1>P5,但是不同海

表 5 红棕杜鹃各表型性状及海拔的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of phenotype traits and altitude in 5 sampled populations of *R. rubiginosum*

性状 Trait	AL	FSL	FPL	IW	FN	SLL	SSL	PL	OL	SFL	LL	LW	LSL
AL													
FSL	-0.299*	1											
FPL	0.010	0.439**	1										
IW	-0.265*	0.485**	0.446**	1									
FN	0.009	-0.084	-0.094	0.227	1								
SLL	-0.148	0.250	0.485**	0.297*	-0.312*	1							
SSL	-0.108	0.315*	0.565**	0.288*	-0.148	0.742**	1						
PL	-0.140	0.286*	0.590**	0.346**	-0.139	0.732**	0.673**	1					
OL	-0.108	-0.006	0.122	-0.118	-0.217	0.054	0.150	0.121	1				
SFL	-0.116	0.309*	0.589**	0.414**	-0.124	0.460**	0.467**	0.565**	-0.051	1			
LL	0.205	0.213	0.309*	0.391**	0.125	0.233	0.193	0.199	-0.193	0.386**	1		
LW	-0.110	0.283*	0.105	0.251	-0.100	0.114	0.067	0.019	0.068	0.258*	0.372**	1	
LSL	-0.216	0.190	0.121	0.387**	0.410**	0.028	0.157	0.145	-0.074	0.128	0.375**	0.156	1

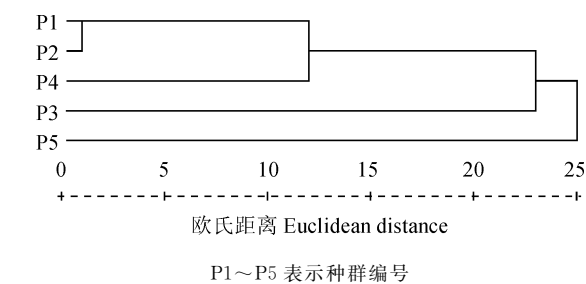


图 1 基于 12 个表型特征的红棕杜鹃 5 个海拔种群 UPGMA 聚类分析
P1—P5 mean the code of populations
Fig. 1 UPGMA derived dendrogram based on Euclidean distance of the 12 phenotype traits in 5 sampled *R. rubiginosum* populations

拔之间的 Shannon-Weaver 多样性指数差异并不大(表 4)。12 个表型性状间 Shannon-Weaver 多样性指数均较高,平均值高达 4.076 3,但是不同性状之间的差异性亦不大,表明红棕杜鹃 12 个表型性状存在丰富的表型多样性。

2.4 红棕杜鹃表型性状相关性分析

采用 Pearson 相关性分析计算 12 组性状之间的相关性系数。结果(表 5)显示,12 组性状两两之间大都表现出显著正相关关系,个别性状之间呈显著负相关($P<0.05$,表 5)。共有 17 对相关性的达到极显著水平($P<0.01$),表明这些性状在对环境的适应中表现出很强的相互调节作用。红棕杜鹃与海拔的相关性分析显示 12 个性状中,花序宽(IW)、花柄长(FSL)、雄蕊最长长度(SLL)、雄蕊最短长度(SSL)、雌蕊长(PL)、叶宽(LW)、子房长(OL)、单花花径(SFL)、叶柄长(LSL)9 个性状与海拔成负相

关,其中花序宽(IW)和花柄长(FSL)表现出与海拔显著的负相关($P<0.05$)。

2.5 红棕杜鹃不同海拔种群表型性状聚类分析

基于 12 个表型特征指标性状对红棕杜鹃 5 个不同海拔种群进行 UPGMA 聚类分析结果(图 1)表明,5 个海拔种群总体上划分为 2 支,其中最高海拔的 P5 种群单独聚为 1 支,其它 4 个海拔梯度种群聚为 1 支,而在 P1~P4 的 4 个种群中,P3 种群单独聚为一支,而低海拔的 P1 和 P2 种群聚为 1 支,并与 P4 聚在一起。

3 讨论

植物物种的表型性状既有变异性又有稳定性,这与该物种本身的遗传特性及其所处的环境密切相关^[18]。由于海拔梯度包含了温度、水分、光照等诸多环境因子的综合影响,尤其是温度在海拔梯度上的变化速率要比纬度梯度上快 1 000 倍^[19-20],因此,海拔梯度上的植物物种多样性格局一直是生态学家关注的焦点问题。本研究中,红棕杜鹃 5 个海拔种群 12 个性状中,5 组在不同海拔群体中呈显著差异;不同海拔种群中,各表型性状特征变异系数(CV)、相对极差(R')和 Shannon-Weaver 多样性指数(H')均表现出较大的差异性,表明不同海拔的红棕杜鹃种群具有较丰富的表型多样性。

红棕杜鹃 5 个海拔种群的 12 个性状平均变异系数为 16.15%,各海拔种群的变异系数介于 14.41%~18.78%之间,这与川西云杉(*Picea bal-fouriana*) (15.96%)、茶条槭(*Acer ginnala*)

(15.16%)等植物在不同海拔上种群表型性状的变异系数相当^[21,3]。植物表型变异系数(CV)反应表型的离散程度,而相对极差(R')则反映极端变异程度,综合红棕杜鹃不同海拔种群的变异系数变化趋势($P1>P2>P3>P5>P4$)和相对极差变化趋势($P1>P2>P4>P3>P5$)分析表明,该物种表型性状在种群 P1 和 P2 中存在较高变异,表型极端离异程度也较高;而其它 3 个种群变异程度较低,表型的极端离异程度也较低。野外实地调查发现,P1、P2 种群处于红棕杜鹃在轿子山国家级自然保护区海拔分布的下缘,植株稀生于其他灌木林、小乔木林林下,不同植株甚至同一植株不同部位所受光照、风力等差异较大,同时,P1、P2 种群位于保护区边缘,种群受人为干扰较严重,同时,通过聚类分析亦发现,P5 种群单独聚为一支,而 P1 和 P2 种群则聚在一个分支上,表明上述因素所引起的环境异质性可能是导致红棕杜鹃 P1、P2 种群表型变异较大的主要原因。

物种表型多样性沿海拔梯度的变化模式比较复杂,与其自身遗传变异及所处环境密切相关^[3,5,6,8,22]。基于 Shannon-Weaver 指数对红棕杜鹃不同海拔种群及不同表型性状的多样性指数分析来看,红棕杜鹃不同海拔及表型形状的平均多样性指数分别为 2.453 4 和 4.076 3,其远高于不同海拔茶条槭种群的表型多样性指数^[3],表明云南轿子山不同海拔红棕杜鹃具有丰富的表型多样性,同时也

反映这些表型性状对区域生态环境及不同海拔梯度具有较好的适应性。相关性分析表明,红棕杜鹃 12 个性状中仅有花序宽 IW 和花柄长 FSL 与海拔表型出显著的负相关($P<0.05$),其它性状与海拔相关性均不显著,这与司国臣等^[22]对秦岭山区太白杜鹃(*R. purdomii*)的研究结果相似,可能是由于花序宽(IW)和花柄长(FSL)作为繁殖器官表征中较保守的特征,且受温度影响较大,受其他环境因素限制较小的原因。另外,植物在适应和演化过程中,不同形态性状之间往往通过相互调节达到适应环境的目的,一个形态性状的改变亦直接或间接导致其他形状的变化。本研究中,红棕杜鹃 12 个表型性状之间,大部分性状相关性达到显著和极显著水平,反映这些性状在对环境的适应中表现出极强的相互调节作用,这与董文婧等^[2]对云南樱花(*Prunus yunnanensis*)的研究相似。

综上所述,云南轿子山国家级自然保护区红棕杜鹃有较高的表型多样性水平,而且其表型变化对环境有较强适应性,5 个海拔种群中,低海拔种群(P1 和 P2)的表型性状变异丰富、极端变异高,而中、高海拔种群(P3、P4、P5)的表型性状变异和极端变异程度较低。红棕杜鹃大部分表型性状与海拔的相关性并不显著,5 个不同海拔红棕杜鹃种群可以聚为明显的 2 支。综合野外生境与种群生存调查认为,红棕杜鹃不同海拔种群的环境异质性是影响其表型变异格局的主要因素。

参考文献:

- [1] 宋杰,李世峰,关文灵,等. 云南含笑天然居群的表型多样性分析[J]. 西北植物学报,2013,33(2):272-279.
SONG J, LI S F, GUAN W L, *et al.* Phenotypic diversity of natural populations of *Michelia yunnanensis*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(2):272-279.
- [2] 董文婧,申仕康,王跃华,等. 都市园林植物云南樱花的表型多样性研究[J]. 广西植物,2016,36(3):349-354.
DONG W J, SHEN S K, WANG Y H, *et al.* Phenotypic diversity of urban landscape plant *Prunus yunnanensis*[J]. *Guihaia*, 2016, 36(3):349-354.
- [3] 王丹,庞春华,王玮玲,等. 茶条槭不同海拔种群的表型多样性[J]. 云南植物研究,2010,32(2):117-125.
WANG D, PANG C H, WANG Y L, *et al.* Phenotypic diversity of *Acer ginnala* (Aceraceae) populations at different altitude [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2010, 32(2):117-125.
- [4] ZHAO L L, ZHANG Y, LUO T Q, *et al.* Morphological and genetic variations of *Sophora davidii* populations originating from different altitudes in the Mountains of southwestern China[J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2016, 224:1-6.
- [5] 李海东,任宗昕,王红,等. 二型花柱植物海仙花报春花部性状随地理梯度的变异[J]. 生物多样性,2015,23(6):747-758.
LI H D, REN Z X, WANG H, *et al.* Variation in floral traits of distylous *Primula poissonii* (Primulaceae) along geographic gradients[J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(6):747-758.
- [6] 徐杨,周丽,徐玉兰,等. 云南松不同海拔群体的针叶性状表型多样性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2016,31(1):109-114.
XU Y, ZHOU L, XU Y L, *et al.* Needle phenotypic variation among populations of *Pinus yunnanensis* at different altitude [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2016, 31(1):109-114.
- [7] HODKINSON I D. Terrestrial insects along elevation gradients: species and community responses to altitude[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2005,

80:489-513.

[8] 吴云,张霓雯,刘光立,等. 海拔对全缘叶绿绒蒿植株性状和花特征的表型选择分析[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(7): 1 443-1 449.

WU Y,ZHANG N W,LIU L G,*et al.* Phenotypic selection on plant traits and floral traits at different altitudes for *Meconopsis integrifolia*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(7): 1 443-1 449.

[9] OHSAWA T,IDE Y J. Global patterns of genetic variation in plant species along vertical and horizontal gradients on mountains[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, **17**: 152-163.

[10] SHEN S K,WU F Q,WANG Y H,*et al.* Seed germination and seedling emergence in the extremely endangered species *Rhododendron protistum* var. *giganteum*—the world’s largest *Rhododendron* [J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2015, **216**:65-70.

[11] 庄平,郑元润,邵慧敏,等. 杜鹃属植物迁地保育适应性评价[J]. 生物多样性, 2012, **20**(6): 665-675.

ZHUANG P,ZHENG Y R,SHAO H M,*et al.* An assessment on the adaptability of *Rhododendron* plants under *ex situ* conservation [J]. *Biodiversity Science*, 2012, **20**(6): 665-675.

[12] 申仕康,吴富勤,王跃华,等. 杜鹃属植物人工繁殖与引种栽培研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, **41**(20): 37-40.

SHEN S K,WU F Q,WANG Y H,*et al.* Advance researches on artificial propagation, introduction and cultivation of genus *Rhododendron* L. [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, **41**(20): 37-45.

[13] WU F Q,SHEN S K,WANG Y H,*et al.* Genetic diversity and population structure of an extremely endangered species: the world’s largest *Rhododendron* [J]. *AoB Plants*, 2015, **7**, plu082.

[14] 余昌元 云南轿子山自然保护区生物多样性特点及保护[J]. 林业调查规划, 2015, **30**(4): 40-44.

YU C Y. The characteristics of the biodiversity and the protection of Jiaozi Mountain Nature Reserve in Yunnan [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2015, **30**(4): 40-44.

[15] 李朝阳,杜凡,姚莹,等. 轿子山自然保护区杜鹃群落植物多样性研究[J]. 西南林学院学报, 2010, **30**(3): 34-37, 49.

LI C Y,DU F,YAO Y,*et al.* Study on plant diversity of *Rhododendron* community in Jiaozishan Nature Reserve[J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2010, **30**(3): 34-37, 49.

[16] 陈自然. 云南轿子山自然保护区的杜鹃花科植物资源[J]. 国土与自然资源研究, 2013, **6**: 76-78.

CHEN Z R. The plant resource of Ericaceae in Yunnan Jiaozi Mountains Nature Reserve [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2013, **6**: 76-78.

[17] 王文森. 变异系数——一个衡量离散程度简单而有用的统计指标[J]. 中国统计, 2007, **6**: 41-42.

WANG W S. Coefficient of variation—a simple and useful statistical indicators to measure discrete degree [J]. *China Statistics*, 2007, **6**: 41-42.

[18] 杨继. 植物种内形态变异的机制及其研究方法[J]. 武汉植物学研究, 1991, **9**(2): 185-195.

YANG J. Intraspecific variation in plant and the exploring methods [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1991, **9**(2): 185-195.

[19] 朱珣之,张金屯 中国山地植物多样性的垂直变化格局[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(7): 1 480-1 486.

ZHU X Z,ZHANG J T. Altitudinal patterns of plant diversity of China Mountains [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, **25**(7): 1 480-1 486.

[20] 冯建孟,王襄方,方精云,等. 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局[J]. 山地学报, 2006, **24**(1): 110-116.

FENG J M,WANG X P,FANG J Y,*et al.* Altitudinal patterns of plant diversity and community atructure on Yulong Mountains, Yunnan, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, **24**(1): 110-116.

[21] 辜云杰,罗建勋,吴远伟,等. 川西云山天然种群表型多样性[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(2): 291-301.

GU Y J,LUO J X,WU Y W,*et al.* Phenotypic diversity in natural population of *Picea balfouriana* in Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**(2): 291-301.

[22] 司国臣,张延龙,赵冰,等. 太白杜鹃天然居群的表型多样性[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(8): 1 560-1 566.

SI G C,ZHANG Y L,ZHAO B,*et al.* Phenotypic variation of natural populations in *Rhododendron purdomii* in Qinling Mountains [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(8): 1 560-1 566.

(编辑:潘新社)