

青海野生中国沙棘资源表型性状多样性分析

刘青青,李雄杰,马亚琼,成美佳,王晨兆,高佩,马福林,郝静雯,刘瑞,冶贵生,马玉花

(青海大学农牧学院, 西宁 10016)

摘要:为探究青海省野生中国沙棘资源表型性状多样性,本研究以青海省10个地区150份野生中国沙棘为材料,对其12个表型性状进行了表型多样性分析。结果表明:青海省内中国沙棘资源具有丰富的表型多样性,12个表型性状的变异系数为16.49%~58.76%。其中地径、树高和刺长是变异较大的性状,变异系数均超50%。相关性分析显示,除树高、分枝、地径以及叶宽与其他性状间没有显著的相关关系外,其他性状均存在显著或极显著的相关关系。同时,中国沙棘表型性状与纬度和海拔有一定的相关关系,且不同性状受地理因子影响也不同,其中叶片性状受影响最大。主成分分析筛选出4个特征值大于1的主成分,累计贡献率为86.35%,包含了中国沙棘表型性状的大部分信息,百果重对中国沙棘表型性状多样性的影响最大;聚类分析结果显示,在欧式距离15处,可将供试材料分为3个类群。上述结果表明青海中国沙棘资源的表型性状具有丰富的多样性,具有极大的开发利用潜力。本研究为中国沙棘优良种质资源的选育及保存提供了科学依据。

关键词:中国沙棘;表型性状;多样性;

Phenotypic Diversity Analysis of *Hippophae rhamnoides* subsp. *Sinensis* wild Germplasm in Qinghai Province

LIU Qing-qing, LI Xiong-jie, MA Ya-qiong, CHENG Mei-jia, WANG Cheng-zhao, GAO Pei, MA Fu-lin, HAO Jing-wen, LIU Rui, YE Gui-sheng, MA Yu-hua

(College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016)

Abstract: In order to explore the phenotypic diversity of wild *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* resources in Qinghai province, 150 wild seabuckthorn resources from 10 regions in Qinghai province were collected and 12 phenotypic traits were analyzed. The results showed that seabuckthorn represented rich phenotypic diversity, with the coefficient of variation of 12 phenotypic characters ranged from 16.49% to 58.76%. Especially, three trait including ground diameter, tree height and thorn length were observed with great variations, showing the coefficient of variation of over 50%. Correlation analysis revealed significant or extremely significant correlations among all characters except tree height, branch, ground diameter and leaf width. The phenotypic traits were observed correlating with latitude and altitude. The different traits were affected by different geographical factors, among which the leaf traits were largely affected. Four principal components with eigenvalues greater than 1 were revealed by principal component analysis, showing the cumulative contribution rate of 86.35%. Fruit weight was detected with the greatest effect on phenotypic traits diversity. The results of cluster analysis showed that at 15 Euclidean distances, these genotypes could be divided into three groups. These results indicate abundant phenotypic diversity in population of seabuckthorn resources in Qinghai, with great potential for exploitation and

第一作者研究方向为生态修复相关研究。E-mail: 2994573423@qq.com

通讯作者: 马玉花, 研究方向为森林培育理论与技术、植物资源开发利用, E-mail: qhxnmyh@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(31660071), 青海省科技厅项目(2017-ZJ-734), 青海省“高端创新人才千人计划”项目

Fundation projects: National Natural Science Foundation of China (31660071), Qinghai Provincial Science and Technology Department Project (2017-ZJ-734), Qinghai Province "High-end Innovation Talents Thousand Talents Program" project

utilization. This study provided a scientific basis for the breeding and preservation of excellent germplasm resources of *Hippophae rhamnoides* subsp. *Sinensis*.

Keywords: *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*; phenotypic traits; diversity analysis;

中国沙棘 (*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*) 是胡颓子科沙棘属的落叶性灌木或乔木^[1], 是我国现存数量最多、地理分布最广的沙棘属植物^[2]。中国沙棘是一种耐寒耐旱的植物^[3-4], 其根系十分发达, 根系上存在大量的根瘤菌, 不仅为沙棘提供了氮源, 同时能使无机态氮素转化为有机态氮素保存在土壤里, 从而起到改良土壤的作用^[5]。中国沙棘的果实口感酸甜, 是一种食用性极高的水果^[6], 并含有大量的氨基酸和各种维生素, 是一个“营养宝库”^[7]。此外, 中国沙棘的叶片也富含大量生物活性成分^[8-9]。因而对中国沙棘的研究和开发利用具有极高的经济价值、生态价值和社会价值。

近年来, 由于土壤条件恶化、自然资源过度开采等原因, 造成中国沙棘资源量大幅下降, 因此, 迫切需要对野生中国沙棘资源进行保护^[10-11]。多样性研究是中国沙棘资源保护的前提, 表型多样性能够直接反映其群体的遗传多样性且具有简单直观的特点, 被广泛的应用于遗传多样性的研究中^[12-13]。吴琼等^[14]通过对中国沙棘的种子、果实、叶片等表型性状进行研究, 发现中国沙棘的叶片、种子、果实性状都受到纬经度的影响, 当经纬度值越小, 中国沙棘的叶片变短、宽度变窄; 果实变大且果柄变短; 此外种子、果实性状等与海拔高度也有关, 海拔越高, 果实形状越向梨型转变, 种子也越长越厚。黄铨^[15]以青海、甘肃、陕西、山西、河北等 5 个地区的中国沙棘种质资源为研究对象。对果实颜色、叶长、叶宽、枝条个数等十几个表型性状进行了表型分析, 发现任何一个调查点的各个性状都有复杂多样的随机变异, 为中国沙棘的遗传多样性研究奠定了基础。孙坤等^[16]对山西的中国沙棘种质资源进行了研究, 发现山西北部地区居群的叶片长、叶形系数、种子长、种子厚、果柄长、果实长、果实宽等性状观测平均值较其它地区高, 为山西省中国沙棘的品种选育提供了参考。但是在前期研究中, 对青海省不同地区中国沙棘种质资源的表型研究鲜有报道, 本研究对本次收集的中国沙棘资源的表型性状进行了综合分析, 评价了青海省中国沙棘种质资源的多样性, 以期为中国沙棘优良品种的选育提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

青海省 10 个不同地区的 150 株中国沙棘雌株, 各中国沙棘地区的地理情况如表 1。

表 1 中国沙棘资源调查信息表

Table 1 Survey information of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rousi

编号 Code	来源地 Locality	海拔海拔 (m) Altitude	经度 (°E) Longitude	纬度 (°N) Latitude
1	门源 MY	2713	37.76	101.21
2	玛沁 MQ	3350	34.66	100.76
3	班玛 BM	3510	32.92	100.85
4	互助 HZ	2596	36.96	101.85
5	祁连 QL	3170	38.13	100.29
6	同德 TD	3320	34.74	100.80
7	民和 MH	2080	36.19	102.74
8	湟源 HY	3010	36.77	101.24
9	大通 DT	2468	37.25	101.46
10	贵南 GN	3540	35.70	101.08

注: MY: Menyuan, MQ:Maqing, BM:Banma, HZ:Huzhu,QL:Qilian,TD:Tongde, MH:Minghe, HY:Huangyuan, DT:Datong, GN:Guinan

1.2 数据测量

于 2020 年 8 月至 9 月及 2021 年 8 月至 9 月在青海省门源、玛沁、班玛、互助、祁连、同德、民和、湟源、大通和贵南共 10 个中国沙棘集中分布区随机取样, 每个地区选取 15

株生长健壮、无病虫害的中国沙棘雌性植株，每两株之间距离间隔 20 m 以上，测量每株表型数据。测高器测量树高、冠幅（统一为南北方向测量）、地径等指标，对每株分枝数进行统计并作记录（以地面第一个分枝处为准），选取每株中国沙棘植株的 20 片叶片（枝条的上中下部位均匀采集），用游标卡尺（精度为 0.01 mm）测定其叶长和叶宽，计算其叶形指数（叶形指数=叶长/叶宽）。同时每株中国沙棘随机抽取 20 粒果实，用游标卡尺测定果实的长度、宽度，并计算果形指数（果形指数=果实纵径/果实横径）。用电子天平称量随机抽取的 100 粒果实的重量（百果重）。

1.3 数据分析

测定数据利用 Microsoft office excel 2010 和 SPSS 26.0 进行变异分析、主成分分析、相关性分析和聚类分析等。

2 结果与分析

2.1 表型性状变异分析

对 150 个中国沙棘材料进行表型性状调查，共观测中国沙棘的 12 个表型指标。对所调查的植株表型变异性状进行统计，结果见表 2。由表 2 可知，12 个表型数据变异幅度在 16.49%~58.76%之间，变异范围较大，变异系数由大到小的性状排列顺序为：刺长、树高、地径、冠幅、分枝数、叶形指数、百果重、叶长、叶宽、果实横径、果实纵径、果形指数。其中刺长的变异系数最大，为 58.76%，最长 100.46mm,最短 1.87mm。表明中国沙棘的刺长在表型性状中变异最为丰富，其次为树高，变异系数为 51.63，最高 7.50m,最矮 0.60m。果实纵径和果形指数的变异较小，其变异系数分别为 16.49%和 19.54%，果实纵径最长和最短分别为 8.79mm、2.35mm，果形指数最大和最小分别为 22.30、0.38。可见果实变异程度较低。

表 2 150 份中国沙棘样本表型性状的变异情况
Table2 Variation of phenotypic traits in 150 *H.rhamnoides* subsp. *sinensis*

表型性状 Phenotypic traits	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准差 standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
冠幅 crown width /m	4.50	0.40	1.54	0.71	45.81
地径 Ground diameter/cm	15.10	0.60	4.71	2.38	50.63
树高 Plant height /m	7.50	0.60	2.13	1.10	51.36
分枝数 branches	4.00	1.00	1.41	0.62	43.65
百果重 Hundred fruit weight/g	26.04	3.50	14.10	5.42	38.43
果实纵径 Longitudinal diameter/mm	8.79	2.35	5.68	0.94	16.49
果实横径 Fruit diameter /mm	9.47	2.42	6.04	1.22	20.12
果形指数 Fruit Shape Index	2.30	0.38	0.96	0.19	19.54
叶长 Leaf length /mm	91.54	5.76	42.11	10.99	26.10
叶宽 Leaf width /mm	12.51	0.68	6.52	1.56	23.88
叶形指数 Leaf Shape Index	81.60	0.80	6.73	2.73	40.61
刺长 Length of thorn/mm	100.46	1.87	28.28	16.62	58.76

对所调查的中国沙棘植株表型性状进行平均值、标准差的计算以及多重比较分析，根据

表 3 可知，果实的各性状在居群间表现出较大的差异，果实纵径平均值最大的是同德县居群（6.89mm），平均值最小的是门源县居群（4.62mm）除班玛县居群以外，其他居群之间均存在显著差异；果实横径平均值最大的是班玛县居群（6.95mm），显著高于其他居群。平均值最小的是门源县居群（4.27mm）；果形指数平均值最大的是门源县居群（1.11），门源县和贵南县居群的果形指数显著高于其他居群。平均值最小的是民和县居群（0.83），玛沁县、祁连县和大通县居群之间没有显著差异。

叶片各性状中，叶长叶宽平均值最小的均为玛沁县居群，分别为 32.89mm 和 5.95mm。叶长平均值最大的是民和县居群（50.27mm），民和县居群和湟源县居群的叶长没有显著差异，均显著高于其他居群。叶宽平均值最大的是湟源县居群（7.65mm），显著高于其他居群。门源县、玛沁县、大通县以及贵南县的叶宽没有显著差异，互助县、祁连县和同德县居群之间也没有显著差异；民和县居群的叶形指数平均值最大（8.29），显著高于其他居群。叶形指数平均值最小的是班玛县居群（5.60）。

冠幅的差异在各群体中表现比较明显，祁连县居群的冠幅平均值最大(1.96m)，显著高于其他居群。贵南县居群冠幅平均值最小(0.89)，显著低于其他居群。互助县、民和县、湟源县以及大通县居群的冠幅没有显著差异；祁连县居群的地径平均值最大（6.63cm），民和县居群的地径平均值最小（3.33cm），玛沁县、班玛县、民和县、以及贵南县居群之间的地径没有明显差异，祁连县居群和大通县居群与其他居群之间存在显著差异；树高平均值最大的是祁连县居群，平均值最小的是贵南县居群（1.49m），门源县、玛沁县、班玛县民和县以及湟源县居群之间没有显著差异；分枝平均值最大的是班玛县居群（1.71），平均值最小的是门源县居群（1.14）；百果重平均值最大的是祁连县居群（18.22g），平均值最小的是贵南县居群(6.22g)，其中祁连县、湟源县和大通县居群之间没有明显差异；刺长平均值最大的是门源县居群（32.90mm），平均值最小的是民和县居群（20.68mm），门源县与祁连县之间，班玛县、湟源县与大通县居群之间没有明显差异。

由此可以看出，中国沙棘植株表型性状各居群间差异显著，湟源县中国沙棘植株生长发育显著优于其他居群，互助县、祁连县次之。

表 3 中国沙棘各居群性状多重比较结果

Table 3 Multiple comparison results of characters of *Hippophae rhamnoides* subsp. *Sinensis* populations

表型性状	门源	玛沁	班玛	互助	祁连	同德	民和	湟源	大通	贵南
Phenotypic traits	MY	MQ	BM	HZ	QL	TD	MH	HY	DT	GN
冠幅	1.13±	1.38±	1.54±	1.81±	1.96±	1.14±	1.79±	1.86±	1.86±	0.89±
crown width /m	0.16cd	0.19bc	0.11abc	0.14ab	0.13a	0.09c	0.26ab	0.18ab	0.12ab	0.05d
地径	4.50±	3.73±	4.14±	5.97±	6.63±	4.29±	3.33±	4.49±	6.26±	3.60±
Ground diameter/cm	0.43bc	0.49c	0.41c	0.16ab	0.66a	0.27bc	0.23c	0.47bc	0.56a	0.50c
树高	1.75±	1.75±	1.92±	2.35±	4.12±	1.67±	1.95±	1.90±	2.39±	1.49±
Plant height /m	0.15bcd	0.38bcd	0.10bcd	0.24bc	0.38a	0.15cd	0.14bcd	0.17bcd	0.27b	0.08d
分枝	1.14±	1.53±	1.71±	1.47±	1.33±	1.33±	1.33±	1.20±	1.63±	1.40±
branches	0.06b	0.14ab	0.13a	0.13ab	0.19ab	0.29ab	0.19ab	0.11ab	0.02ab	0.08ab
百果重	6.62±	12.61±	16.13±	14.77±	18.22±	14.91±	14.85±	18.20±	17.83±	6.42±
Hundred fruit weight/g	0.23c	1.20b	1.05ab	1.94ab	1.52a	1.86ab	1.95ab	1.51a	1.12a	0.25c
果实纵径	4.62±	6.26±	6.21±	5.73±	5.87±	6.89±	4.78±	6.08±	6.04±	5.20±
Longitudinal diameter/mm	0.33f	0.65b	0.57bc	0.58d	0.44d	0.64a	0.49f	0.71c	0.62c	0.36e
果实横径	4.27±	6.62±	6.95±	6.29±	6.44±	6.76±	5.79±	6.89±	6.44±	4.89±
Fruit diameter /mm	0.45g	0.64bc	0.69a	0.61d	0.53cd	0.78ab	0.47e	0.69a	0.61cd	0.20f
果形指数	1.11±	0.95±	0.91±	0.92±	0.93±	1.04±	0.83±	0.88±	0.94±	1.10±
Fruit Shape Index	0.23a	0.09c	0.05cd	0.03cd	0.08c	0.16b	0.06e	0.09d	0.08c	0.06a
叶长	41.22±	32.89±	38.79±	46.09±	42.19±	44.72±	50.27±	49.17±	43.79±	39.67±
Leaf length /mm	3.51ef	3.72h	2.04g	1.08b	5.80de	3.37bc	4.68a	4.05a	3.82cd	2.84fg
叶宽	6.12±	5.95±	7.04±	6.60±	6.76±	6.72±	6.86±	7.65±	6.16±	6.06±
Leaf width /mm	0.50d	0.31d	0.56b	0.44c	0.65c	0.58c	0.69bc	0.45a	0.39d	0.47d
叶形指数	6.94±	5.73±	5.60±	7.23±	6.37±	7.08±	8.29±	6.60±	7.38±	6.80±
Leaf Shape Index	0.53bcd	0.65f	0.46f	0.86bc	0.80e	0.80bcd	1.23a	0.53de	0.55b	0.57cde
刺长	32.90±	31.76±	29.81±	26.76±	32.36±	24.37±	20.68±	28.19±	29.21±	26.08±
Length of thorn/mm	3.85a	1.35ab	1.38abc	1.34bc	3.18a	2.65cd	2.23d	2.41abc	1.58abc	1.57c

注：表中的 a,b,c,d,e,f,g,h 为多重比较的 Duncan 表示值，字母相同的表示差异不显著。

Note: a, b, c, d, e, f, g, h in the table are Duncan values for multiple comparisons, and the difference in letters with the same letter is not significant.

2.2 表型性状相关性分析

对中国沙棘的 12 个表型数据的均值进行相关性分析（表 4）。结果表明，百果重与果实横径（0.867**）、果实横径与果实纵径（0.848**）均呈极显著正相关；百果重与果形指数（-0.797**）呈极显著负相关；果形指数与冠幅（-0.707*）、果形指数与果实横径（-0.652*）均呈负显著相关；冠幅与百果重（0.635*）呈正显著相关；叶长与叶形指数（0.758*）呈正显著相关；刺长与叶形指数（-0.699*）呈负显著相关；叶宽、分枝、地径、树高与其他表型之间均未呈现出显著相关关系。由此可见，在一定程度上果实纵径越长，果实横径越长，百果重值越大，果形指数越小。

表 4 中国沙棘表型性状相关性分析
Table 4 Correlation analysis of phenotypic characters of *Hippophae rhamnoides* subsp. *Sinensis*

	百果重	刺长	冠幅	地径	树高	分枝	果实纵	果实横	果形	叶长	叶宽	叶形
	Hundre	Length	crown	Ground	Plant	branche	径	径	指数	Leaf	Leaf	指数
百果重	1											
Hundre												
刺长	-0.057	1										
Length												
冠幅	0.635*	-0.185	1									
crown												

地径	0.458	0.321	0.543	1								
Ground												
树高	0.105	0.197	0.402	0.45	1							
Plant												
分枝	0.352	0.062	0.103	0.415	-0.069	1						
branche												
果实纵	0.58	0.088	-0.064	0.207	-0.088	0.406	1					
径												
果实	0.867*	-0.05	0.314	0.234	-0.078	0.454	0.848*	1				
横径	*						*					
果形	-0.797*	0.273	-0.707*	-0.148	0.049	-0.285	-0.157	-0.652*	1			
指数	*											
叶长	0.368	-0.63	0.585	0.189	-0.031	-0.312	-0.19	0.068	-0.428	1		
Leaf												
叶宽	0.603	-0.267	0.377	0.001	-0.079	-0.274	0.247	0.538	-0.603	0.628	1	
Leaf												
叶形指	-0.024	-0.699*	0.388	0.082	-0.044	-0.172	-0.464	-0.334	-0.12	0.758*	-0.003	1
数比												

注：*为显著相关（ $P<0.05$ ），**为极显著相关（ $P<0.01$ ）。

Note: * is significant correlation ($P<0.05$), ** is very significant correlation ($P<0.01$).

2.3 中国沙棘表型性状主成分分析

对中国沙棘的 12 个表型性状进行主成分分析，结果见表 5、图 1 和图 2。由表 5 可知，前 4 个主成分累计贡献率为 86.35%。从图 1 可以看出从第 5 个成分开始，特征值逐渐趋于平缓，说明前 4 个成分确实可以反映出中国沙棘材料的大部分遗传信息。第 1 主成分特征值为 4.25，其贡献率为 35.42%，其中影响较大（特征向量绝对值较大）的性状为百果重（0.95）、果形指数（-0.86）和果实横径（0.81），说明主成分 1 的主要反映的是种子的性状。第 2 主成分的贡献率为 25.16%，这一主成分中影响较大的原始变量主要是叶形指数（-0.86）、叶长（-0.77）、果实纵径（0.68）和刺长（0.67）。说明第二主成分主要与叶片性状有关，第 3 主成分贡献率为 15.65%，在这一主成分中地径（0.74）、树高（0.76）特征向量值较大，说明这一主成分主要反映的是与中国沙棘树体形态相关性状。第 4 主成分贡献率为 10.12%，这一主成分中分枝（-0.72）是影响最大性状。由以上分析可以看出，百果重、果形指数和叶形指数是对主成分分析影响最大的几个表型性状。

表 5 主成分相关分析

Table 5 Principal component correlation analysis				
表型性状	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
Phenotypic traits	The first principal component	The second principal component	The third principal component	The fourth principal component
百果重	0.95	0.22	0.01	0.04
Hundred fruit weight				
刺长	-0.27	0.67	0.38	0.38
Length of thorn				
冠幅	0.75	-0.30	0.48	0.04
crown width				
地径	0.45	0.21	0.74	-0.11
Ground diameter				
树高	0.09	0.04	0.76	0.34
Plant height				

分枝				
branches	0.30	0.54	0.15	-0.72
果实纵径				
Longitudinal diameter	0.46	0.68	-0.30	-0.05
果实横径				
Fruit diameter	0.81	0.50	-0.29	-0.01
果形指数				
Fruit Shape Index	-0.86	0.08	0.11	0.04
叶长				
Leaf length	0.56	-0.77	-0.02	0.06
叶宽				
Leaf width	0.69	-0.20	-0.37	0.51
叶形指数				
Leaf Shape Index	0.15	-0.86	0.15	-0.39
特征值				
Eigenvalues	4.25	3.02	1.88	1.22
贡献率				
Contribution rate	35.42	25.16	15.65	10.12
累积贡献率				
Cumulative contribution rate	35.42	60.58	76.22	86.35

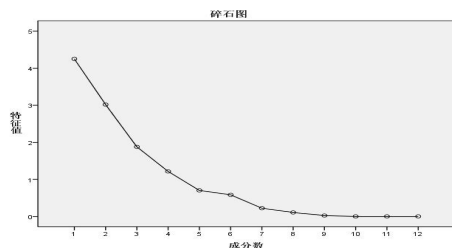


图 1 表型性状主成分分析

Fig.1 Principal component analysis of phenotypic traits

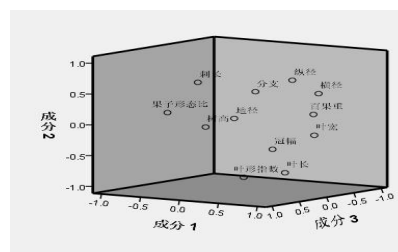


图 2 各组成成分图

Fig.2 Component diagram

2.4 聚类分析

基于欧式距离法对中国沙棘各居群进行系统聚类分析，结果见图 3。由图 3 可见在欧式距离 10 处，将 10 个居群分为 4 组，互助县、同德县、民和县和湟源县居群为一组，班玛县、祁连县与大通县居群为一组，门源县居群和贵南县居群为一组，玛沁县居群为一组。在欧式距离 15 处，将全部材料分为 3 个组，玛沁县居群为一组，门源县和贵南县居群为一组，互助县、同德县、民和县、湟源县、祁连县、大通县和班玛县居群为一组。在欧式距离 20 处，将 10 个居群分为 2 组，玛沁县、门源县和贵南县居群为一组，互助县、同德县、民和县、湟源县、祁连县、大通县和班玛县居群为一组。

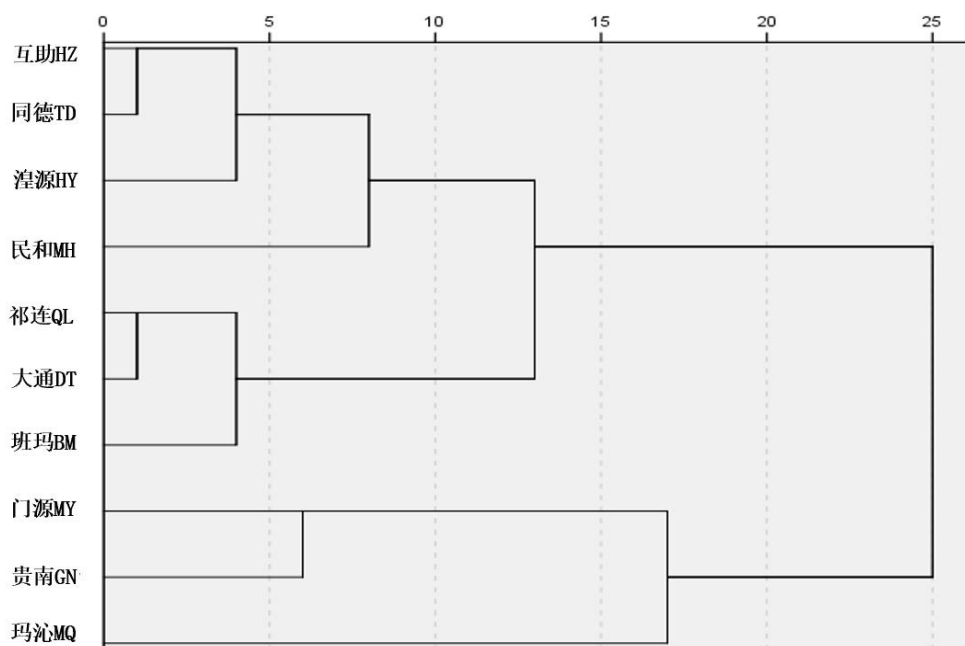


图 3 10 个居群的聚类图

Fig.3 Cluster diagram of 10 populations

2.5 中国沙棘表型性状与地理因子间的相关分析

对中国沙棘的表型性状与海拔和经纬度进行相关性分析（表 6），分析发现经度与所有的表型性状之间均不存在显著的相关关系；纬度与叶长（0.67*）呈现显著正相关；纬度与刺长（-0.70*）呈现显著负相关；海拔与叶长（-0.65*）呈现显著负相关；纬度与叶形指数间呈现极显著正相关（0.83**）；海拔与叶形指数间呈现极显著负相关（-0.82**）。由此可见，经度不影响中国沙棘表型性状，地理因子对中国沙棘影响最大的表型性状是叶长和叶形指数。

表 6 中国沙棘表型性状与生态因子间的相关分析

Table 6 Correlation analysis between phenotype traits and ecological factors in *Hippophae rhamnoides* subsp. *Sinensis*

表型性状 Phenotypic traits	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude
百果重 Hundred fruit weight	0.02	-0.02	-0.18
刺长 Length of thorn	0.20	-0.70*	0.35
冠幅 crown width	0.37	0.25	-0.51
地径 Ground diameter	0.61	-0.21	-0.20
树高 Plant height	0.53	-0.28	-0.11
分枝 branches	-0.56	-0.12	0.20
果实纵径 Longitudinal diameter	-0.46	-0.55	0.51
果实横径 Fruit diameter	-0.40	-0.24	0.20

果形指数	0.05	-0.39	0.41
Fruit Shape Index			
叶长	0.41	0.67*	-0.65*
Leaf length			
叶宽	-0.09	0.11	-0.04
Leaf width			
叶形指数	0.47	0.83**	-0.82**
Leaf Shape Index			

3 讨论

3.1 中国沙棘植株表型性状各居群间变异情况、相关性主成分分析

植物受自身遗传物质和环境共同作用的影响，导致表型性状具有一定的变异性^[17-19]。表型性状可以直接反映出植物的遗传多样性，对植物优良品种的选育具有重要意义^[20-22]。因此很多学者都利用形态学标记研究植物的多样性，已有学者通过对中国沙棘的果实、叶片和种子等形态指标对表型多样性进行了研究^[23-25]。本研究在其基础上再加入中国沙棘的冠幅、树高和刺长等性状来研究其表型多样性，使研究结果更加准确可靠。本研究中，分布于不同地理环境的中国沙棘在不同居群间的性状表型值存在显著差异，这是由于其自身的遗传因素以及长期的环境异质性共同作用的结果。变异系数可反映变异程度和稳定性，变异系数越大，表明其变异程度越高，对环境的适应能力越强^[26]。本研究中变异系数的变化范围为16.49%~58.76%，变异大小顺序为：刺长（58.76%）>树高（51.36%）>地径（50.63%）>冠幅（45.81%）>分枝数（43.65%）>叶形指数比（40.61%）>百果重（38.43%）>叶长（26.10%）>叶宽（23.88%）>果实横径（20.12%）>果形指数（19.54%）>果实纵径（16.49%）。这与郭学斌、吴琼对山西中国沙棘天然种群表型性状研究中刺长变异系数最大、果形指数变异较小结果一致^[24,27]，出现这种现象的原因可能是因为中国沙棘的果实是生殖器官，受遗传因素的影响大于环境因素，而叶片需要进行光合作用，所以受环境影响较大^[28]。

相关性分析是检验性状间关联性的重要方法，对提高选种效率与育种进程具有重要意义^[29]。本研究有8对显著相关关系，其中百果重与果实横径、果实横径与果实纵径均呈极显著正相关；这与郭学斌^[27]研究的山西省中国沙棘表型多样性的结果相同。本研究中百果重与冠幅显著相关，表明中国沙棘的冠幅越大，果实纵横径越长，果实质量越高。表明在今后的中国沙棘果实资源开发利用工作中，要注意收集冠幅大的群体。

3.2 中国沙棘植株表型性状各居群间表型性状主成分及聚类分析

中国沙棘植株表型性状主成分及聚类分析对于揭示种质遗传多样性及种群生态学分析具有极其重要理论和实践价值。主成分分析是对多个性状进行综合分析，以便得到较为简便的结果^[30]，直观揭示群体间的遗传差异，有效指导目标亲本选育，有利于种质资源的分类^[31]。在本研究中，中国沙棘的12个性状中提取了4个主成分，累积贡献率达到了86.35%，综合分析，对中国沙棘表型多样性起主要作用的性状是百果重、果形指数以及叶形指数。南吉斌等^[32]对沙棘属植物表型多样性的研究中发现，引起中国沙棘表型变异的性状分别有叶形系数、果序重和果形指数，这与本文得出的结果有一定的相似性。

聚类分析能分析出不同种质资源的起源和亲缘关系，为植物的遗传多样性研究提供理论基础^[33]。本研究中聚类分析结果发现，在欧式距离15处，将全部材料分为3个组群，玛沁为一类，门源和贵南为一类，班玛、互助、祁连、同德、民和、湟源、大通为一类。门源没与距离较近的大通归为一类，却与距离较远的同德归为一类。表明中国沙棘天然种群的表型性状和遗传多样性可能不依赖于经纬度。这与范英明等得出的华北落叶松群体聚类的结果与地理分布格局不完全符合的结论一致^[34]这是由于影响植物表型多样性的因素是多方面的，其变异规律极其复杂，是环境和基因共同影响的结果^[35-37]。

3.3 中国沙棘植株表型性状各居群间表型性状与生态因子间的相关分析

多数情况下,植物表型性状的地理变异较为复杂。由于所处环境的多样性,植物随地理变化可能会发生连续变异、随机变异等不同类型的变异模式^[38]。如重要绿化树种无患子表型性状的变异主要由地理纬度和年平均气温导致^[39]。本研究中纬度与叶形指数间存在极显著正相关,海拔与叶形指数间存在极显著负相关,说明一定程度下纬度越大,海拔越低,叶形指数越高,叶片越细长。这与蒋欣梅等人得出的海拔与老山芹植株的叶形指数呈极显著负相关的研究结果一致^[40],推测可能是由于沙棘处于高海拔地区更为恶劣的生长环境时,主要通过叶片形态的改变来适应环境。吴琼^[24]等人的研究表明随海拔升高,沙棘果实增大,而在本研究中沙棘果实与海拔并无明显关系,可能是因为采样地区中国沙棘彼此之间的基因交流导致,同时也可能因为本研究采样的海拔梯度不明显导致,采样地区的环境并未因为海拔有明显变化。后续可增加海拔梯度明显的相关实验。

4 结论

(1) 通过对中国沙棘 12 个表型性状的多重比较和方差分析表明,各个表型性状在不同居群间都表现出不同程度的差异性。12 个性状的变异系数范围为 16.49%~58.76%。其中,植株的刺长、树高、地径和冠幅是变异较大的性状。

(2) 表型性状相关性分析表明,除树高、分枝、地径以及叶宽与其他性状间没有显著的相关关系外,其他性状之间都存在一定程度的相关性;表型性状与地理环境因子相关性分析中,地理因子对中国沙棘影响最大的表型性状是叶长和叶形指数。

(3) 主成分分析最终得出 4 个主成分,累积贡献率达到 86.35%。百果重、果形指数和叶形指数是对主成分分析影响最大的几个表型性状。

(4) 聚类分析将玛沁为一类,门源和贵南为一类,班玛、互助、祁连、同德、民和、湟源、大通为一类。

参考文献:

- [1] Wang L Y,Wang J,He C Y,Zhang J G,Zeng Y F. Characterization and comparison of chloroplast genomes from two sympatric *Hippophae* species (Elaeagnaceae) [J]. Journal of Forestry Research,2020,32:1-32.
- [2] 李多伟,王义潮,晋坤贞.中国沙棘营养器官结构特征及其与生境关系的研究[J].西北大学学报,1996,6(03):247-249.
Li D W,Wang Y C,Jin K Z.Structural characteristics of vegetative organs of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* and their relationship with habitat[J]. Journal of Northwest University,1996,6(03):247-249.
- [3] Cao Z, Li T, Li G, Liu C H, Gao H Y,Dai G H,Xiao Z Y,Li S L. Modular growth and clonal propagation of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in response to irrigation intensity[J]. Journal of Forestry Research, 2016,27(5):1019-1028.
- [4] 胡杜娟,胡建忠,魏学智.不同沙棘品种的抗旱性比较[J].北方园艺,2017,(07):27-30.
Hu D J,Hu J Z,Wei X Z. Comparison of drought tolerance of different seabuckthorn cultivars[J].Northern Horticulture,2017,(07): 27-30.
- [5] 姚彤.内蒙古沙棘产业发展现状及其对风沙的生态响应[J].中国果树,2022,(05):104-108.
Yao T. Development status of seabuckthorn industry in Inner Mongolia and its ecological response to aeolian sand[J].China Fruits,2022,(05):104-108.
- [6] Chen S Y, Zhang X Z. Characterization of the complete chloroplast genome of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) [J]. Conservation Genet Resour, 2017,9:623-626.
- [7] Eva I,Martina B,Margarita T,Olga G,Olena V,Jan B.Biological properties of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) derived products[J]. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria,2020,19(2):195-205.
- [8] Liu X,Yang Z J,Chen D Q,Zhang Z F.Comparative Analysis of Antioxidants in *Hippophae rhamnoides* L. Leaves by UPLC[J]. Medicinal Plant,2017,(05):23-26.
- [9] 蔡爽,阮成江,杜维,丁健,韩平,王海明.沙棘叶片、果肉和种子中黄酮类成分的差异[J].植物资源与环境学报,2019,28(04):58-67.
Cai S,Ruan C J,Du W,Ding J,Han P,Wang H M. Differences of flavonoids in leaves, pulp and seeds of seabuckthorn[J].Journ

- l of Plant Resources and Environment,2019,28(04):58-67.
- [10] 何士敏,袁小娟,汪建华.中国沙棘属植物资源及其开发利用现状[J].现代农业科学,2008(11):87-92.
- He S M,Yuan X J,Wang J H. The plant resources of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* and its development and utilization status[J]. Modern Agricultural Sciences,2008(11):87-92.
- [11] 胡建忠,温秀凤,王东健.新疆开展沙棘资源建设与开发利用工作的调研与建议[J].中国水土保持,2021(09):16-18.
- Hu J Z,Wen X F,Wang D J. Investigation and suggestions on the construction and development and utilization of seabuckthorn resources in Xinjiang[J].China Soil and Water Conservation,2021(09):16-18.
- [12] Li Y, Shi Y S, Cao Y S,Wang T Y. A phenotypic diversity analysis of maize germplasm preserved in China[J]. Maydica, 2002, 47(2):107-114.
- [13] 薛延桃,陆平,史梦莎,孙昊月,刘敏轩,王瑞云.新疆、甘肃黍稷资源的遗传多样性与群体遗传结构研究[J].作物学报,2019,45(10):1511-1521.
- Xue Y T,Lu P,Shi M S,SUN H Y, Liu M X,Wang R Y.Genetic diversity and population genetic structure of millet resources in Xinjiang and Gansu[J].Acta Cropsinica,2019,45(10):1511-1521.
- [14] 吴琼. 中国沙棘、云南沙棘表型多样性研究[D].甘肃: 西北师范大学,2007.
- Wu Q. Study on Phenotypic diversity in *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* and *H. rhamnoides* subsp. *Yunnanensis* with a discussion on origin of *H. goniocarpa*[D].Gansu:Northwest Normal University,2007.
- [15] 黄铨.中国沙棘的性状变异与演化趋势[J].国际沙棘研究与开发,2003,1(02):6-12.
- Huang Q. Trait variation and evolution trend of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* at Ziwoiling,Gansu[J].International Seabuckthorn Research and Development,2003,1(02):6-12.
- [16] 孙坤,陈纹,马瑞君, 陈学林.子午岭中国沙棘亚居群的遗传多样性研究[J].兰州大学学报,2004, 40(03):72-75.
- Sun K, Chen W, Ma R J, Chen X L.A study on the Genetic diversity of *Hippophae rhamnoides* ssp.[J].Journal of Lanzhou University,2004,40(03):72-75.
- [17] 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(02):185-195.
- Yang J. Mechanism and research method of intraspecific morphological variation in plants[J].Wuhan Botanical Research,1991,9(02):185-195.
- [18] 李陈建,孙玉兰,王玉祥,陈爱萍,张博.50份黄花苜蓿种质资源农艺性状的遗传多样性分析[J].新疆农业大学学报,2022,45(03):173-181.
- Li C J, Sun Y L, Wang Y X, Chen A P, Zhang B.Genetic diversity of agronomic traits of 50 *Medicago falcata* L.germplasm [J].Journal of Xinjiang Agricultural University,2022,45(03):173-181.
- [19] 尹婷婷,李莉萍,孟岩,王玉祥,谷丽丽,张博.22份披碱草属种质资源的表型多样性分析[J].分子植物育种,2022,20(07):2409-2419.
- Yin T T, Li L P, Meng Y, Wang Y X, Gu L L, Zhang B.Phenotypic diversity analysis of germplasm resources of 22 *Elymus* spp.Germplasm resources[J].Molecular Plant Breeding,2022,20(07):2409-2419.
- [20] 段九菊,梁峥,贾民隆,宋卓琴,张超,曹冬梅.山西省萱草属野生资源的表型多样性分析[J].植物资源与环境学报,2021,30(06):29-38.
- Duan J J,Liang Z,Jia M L,Song Z Q,Zhang C,Cao D M. Phenotypic diversity analysis of wild resources of *Hemerocallis* in Shanxi Province[J].Journal of Plant Resources and Environment,2021,30(06):29-38.
- [21] Liu D L,Wang X Q,Li W S,Li J J,Tan W B,Xing W. Genetic Diversity Analysis of the Phenotypic Traits of 215 Sugar Beet Germplasm Resources[J]. Sugar Tech,2022,24(6), 1790-1800.
- [22] Nawel B,Antonio L,Abderrahmane D,Abdelkader M,Antonio M,Concetta L,Majda K S,Lakhdar K,Francesco S.Analysis of genetic diversity and population structure in Saharan maize populations using phenotypic traits and SSR markers[J].Genetic Resources and Crop Evolution,2019,66(1),243-257.
- [23] 师瑞瑞,覃金兰,李少斌.2个不同海拔中国沙棘天然种群的表型多样性研究[J].长江大学学报,2019,16(08):92-96.
- Shi R R, Qin J L, Li S B.Phenotypic diversity of two natural populations of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* at different altitudes[J].Journal of Yangtze University,2019,16(08):92-96.
- [24] 吴琼,孙坤,张辉,陈纹,苏雪,陈学林.山西省中国沙棘天然居群表型多样性研究[J].西北师范大学学报,2007,43(2):78-84.

- Wu Q, Sun K, Zhang Hui, Chen W, Su X, Chen X L. Study on phenotypic diversity of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in Shanxi Province[J]. Journal of Northwest Normal University, 2007, 43(2): 78-84.
- [25] 康永善. 沙棘属植物生物学和化学[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2000.
- Lian Y S. Biology and chemistry of sea buckthorn plants[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 2000.
- [26] 董胜君, 王若溪, 张皓凯, 陈建华, 刘立新, 于庆福. 不同种源东北杏果实表型性状多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(06): 42-50.
- Dong S J, Wang R X, Zhang H K, Chen J H, Liu L X, Yu Q F. Analysis on diversity of fruit phenotypic characters of *Armeniaca mandshurica* from different provenances[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2020, 29(06): 42-50.
- [27] 郭学斌. 山西省中国沙棘天然种群优树表型变异研究[J]. 林业科学研究, 2021, 34(04): 111-119.
- Guo X B. Phenotypic variation of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* natural population in Shanxi Province[J]. Forest Research, 2021, 34(04): 111-119.
- [28] 张深梅, 奚建伟, 洪俊彦, 夏国华, 李岩, 黄兴召, 朱先富, 黄坚钦. 大别山山核桃果实与叶片性状的表型多样性研究[J]. 林业科学研究, 2020, 33(01): 152-161.
- Zhang S M, Xi J W, Hong J Y, Xia G H, Li Y, Huang X Z, Zhu X F, Huang J Q. Phenotypic diversity of fruit and leaf traits of pecan in Dabie Mountain[J]. Forest Research, 2020, 33(01): 152-161.
- [29] 赵小强, 徐明霞, 陆晏天, 白明兴, 何小娟, 彭云玲. 甘肃省近年来玉米品种主要性状的演化及育种方向分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(02): 526-537.
- Zhao X Q, Xu M X, Lu Y T, Bai M X, He X J, Peng Y L. Evolution and breeding direction analysis of main traits of maize varieties in Gansu Province in recent years[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(02): 526-537.
- [30] 郑国保, 马玲, 耿志明, 李苗, 刘淑瑛, 臧妮妮, 孙莹, 马小荣. 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(01): 47-51.
- Zheng G B, Ma L, Yao Z M, Li M, Liu S Y, Zang Y N, Sun Y, Ma X R. Principal component analysis and comprehensive evaluation of wolfberry fruits under water stress in different growth periods[J]. Water-saving irrigation, 2022(01): 47-51.
- [31] 姜楠南, 孙音, 刘凤荣, 王媛, 卢洁, 杨传祥, 房义福. 女贞种质资源 ISSR 分析与抗寒优株选育[J]. 经济林研究, 2021, 39(02): 18-26.
- Jiang N N, Sun Y, Liu F L, Wang Y, Lu J, Yang C X, Fang Y F. ISSR cluster analysis and selection of superior cold resistant strain of *Ligustrum lucidum* germplasm resources[J]. Economic Forest Research, 2021, 39(02): 18-26.
- [32] 南吉斌, 杨广环, 吴天彧, 林玲. 西藏 3 种沙棘属植物抗旱性比较研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(01): 37-47.
- Nan J B, Yang G H, Wu T Y, Lin L. Comparative study on drought resistance of three species of sea buckthorn plants in Tibet[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2021, 49(01): 37-47.
- [33] 常婧, 潘丕克, 姜冬. 辽宁地区软枣猕猴桃表型性状多样性研究[J]. 辽宁林业科技, 2020, 46(3): 18-23.
- Chang J, Pan P, Jiang D. Research on phenotypic diversity of *Actinidia arguta* in Liaoning [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2020, 46(3): 18-23.
- [34] 范英明, 董明亮, 党磊, 张鸿景, 齐帅征, 赵健, 张金凤. 华北落叶松全分布区天然群体的球果变异分析研究[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(06): 1531-1541.
- Fan Y M, Dong M M, Dang L, Zhang H J, Qi S Z, Zhao J, Zhang J F. Phenotypic variation Analysis on cone in Entire natural population of *Larix principis-rupprechtii* mayr[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(06): 1531-1541.
- [35] 薛成, 李波卡, 雷天宇, 山红艳, 孔宏智. 生物多样性起源与进化研究进展[J]. 生物多样性, 2022, 30(10): 38-51.
- Xue C, Li B K, Lei T Y, Shan H Y, Kong H Z. Research progress on the origin and evolution of biodiversity[J]. Biodiversity Science, 2022, 30(10): 38-51.
- [36] 杨海龙, 王晖, 雷锦超, 蔡金洋. 浙江省早籼稻种质资源的表型多样性分析与评价[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(08): 1571-1581.
- Yang H L, Wang H, Lei J C, Cai J Y. analysis and evaluation of Phenotypic diversity of early indica rice germplasm resources in Zhejiang Province[J]. Zhejiang Journal of Agricultural Sciences, 2022, 34(08): 1571-1581.
- [37] 黄稚清, 吴林源, 高筱钰, 丁释丰, 肖观康, 秦新生, 冯志坚. 62 份紫花风铃木的表型多样性分析[J]. 福建农业学报, 2022, 37(09): 1156-1166.
- Huang Z Q, Wu L Y, Gao X Y, Ding S F, Xiao G K, Qin X S, Feng Z J. Phenotypic diversity of 62 *Handroanthus impetigibosus*

plants[J].Fujian Journal of Agricultural Sciences,2022,37(09):1156-1166.

[38] 刘润红,白金连,包含,农娟丽,赵佳佳,姜勇,梁士楚,李月娟.桂林岩溶石山青冈群落主要木本植物功能性状变异与关联[J].植物生态学报,2020,44(08):828-841.

Liu R H, Bai J L, Bao H, Nong J L, Zhao J J, Jiang Y, Liang S C, Li Y J. Variation and correlation in functional traits of main woody plants in the cyclobalanopsis glauca in the karst hills of Guilin,southwest China[J].Chin J Plant Ecol,2020,44(08):828-841.

[39] 刁松锋,邵文豪,姜景民,董汝湘,孙洪刚.基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究[J].生态学报,2014,34(06):1451-1460.

Diao S F, Shao W H, Jiang J M, Dong R X, Sun H G. phenotypic diversity in natural population of Sapindus mukorossi based on fruit and seed traits[J].Acta Ecological Sinica,2014,34(06):1451-1460.

[40] 蒋欣梅,王金华,于锡宏,刘舒娅,张颖.不同海拔高度对老山芹营养成分及形态的影响[J].东北农业大学学报,2017,48(05):21-27.

Jiang X M,Wang J H,Yu X H,Liu S Y,Zhang Y. Effects of different altitudes on nutrient and character indexes of Heraclenm dissectum Ledeb.[J].Journal of Northeast Agricultural University,2017,48(05):21-27.