

# 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 810016)

**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。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; 多样性分析

## Phenotypic Traits 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 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%. Hundred fruit weight was detected with the greatest effect on phenotypic traits diversity. These results indicate abundant phenotypic diversity in population of seabuckthorn resources in Qinghai, with great potential for exploitation and utilization. This study provided a scientific basis for the breeding and preservation of excellent germplasm resources of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*.

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

收稿日期: 2023-01-15 修回日期: 2023-02-01 网络出版日期: 2023-03-14

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230115001>

第一作者研究方向为高寒草地生态与环境研究、植物资源开发利用, E-mail: 2994573423@qq.com

通信作者: 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: qhxnmh@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

**Foundation 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

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<sup>[1]</sup>,是我国现存数量最多、地理分布最广的沙棘属植物<sup>[2]</sup>。中国沙棘是一种耐寒耐旱的植物<sup>[3-4]</sup>,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<sup>[5]</sup>。中国沙棘的果实口感酸甜,是一种食用性极高的水果<sup>[6]</sup>,并含有大量的氨基酸和各种维生素,是一个“营养宝库”<sup>[7]</sup>。此外,中国沙棘的叶片也富含大量生物活性成分<sup>[8-9]</sup>。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<sup>[10-11]</sup>。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<sup>[12-13]</sup>。吴琼<sup>[14]</sup>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、果实性状都受到经纬度的影响,当经纬度变小,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,果实形状逐渐向梨型转变,种子也越长越厚。黄铨<sup>[15]</sup>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<sup>[16]</sup>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他地区高,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

试验材料为150株中国沙棘雌株,来源于青海省10个居群,居群的地理情况如表1。

表1 中国沙棘资源居群信息表

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

编号 Code	居群 Population	海拔(m) Altitude	东经(°) East longitude	北纬(°) North 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

MY: Menyuan; MQ: Maqing; BM: Banma; HZ: Huzhu; QL: Qilian; TD: Tongde; MH: Minghe; HY: Huangyuan; DT: Datong; GN: Guinan; The same as below

### 1.2 数据测量

分别于2020–2021年8–9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,测量植株表型数据。用测高器测量树高、冠幅(统一为南北方向测量)、地径等指标;以地面第一个分枝处为准,调查每株分枝数;每株选取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)测量叶长和叶宽,计算其叶形指数(叶形指数=叶长/叶宽);同时每株随机抽取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

利用Excel 2010和SPSS 26.0对调查数据进行变异分析、主成分分析、相关性分析等。

## 2 结果与分析

### 2.1 表型性状变异分析

由表2可知,12个表型性状变异系数为16.49%~58.76%,变异范围较大,变异系数由大到小的排列顺序为: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>果形指数>果实纵径;其中刺长的变异系数最大为58.76%,最长为100.46 mm,最短为1.87 mm,表明刺长在表型

性状中变异最为丰富。其次为树高,变异系数为 51.63%,最高为 7.50 m,最矮为 0.60 m。果实纵径和果形指数的变异较小,变异系数分别为 16.49%

和 19.54%,果实纵径最长和最短分别为 8.79 mm、2.35 mm,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

Table 2 Variation of phenotypic traits in 150 *H.rhamnoides* subsp. *sinensis*

表型性状 Phenotypic traits	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Average	标准差 SD	变异系数(%) CV
冠幅(m) Crown width	4.50	0.40	1.54	0.71	45.81
地径(cm) Ground diameter	15.10	0.60	4.71	2.38	50.63
树高(m) Plant height	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(g) Hundred fruit weigh	26.04	3.50	14.10	5.42	38.43
果实纵径(mm) Longitudinal diameter	8.79	2.35	5.68	0.94	16.49
果实横径(mm) Fruit diameter	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(mm) Leaf length	91.54	5.76	42.11	10.99	26.10
叶宽(mm) Leaf width	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(mm) Length of thorn	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居群为 6.89 mm,最小的是门源居群为 4.62 mm;果实横径平均值最大的是班玛居群为 6.95 mm,显著高于其他居群,最小的是门源居群为 4.27 mm;果形指数平均值最大的是门源居群为 1.11,门源和贵南居群的果形指数显著高于其他居群,最小的是民和居群为 0.83。

叶片各性状中,叶长叶宽平均值最小的均为玛沁居群,分别为 32.89 mm 和 5.95 mm。叶长平均值最大的是民和居群为 50.27 mm,民和居群和湟源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居群为 7.65 mm,显著高于其他居群。叶形指数平均值最大的是民和居群(8.29),显著高于其他居群,最小的是班玛居群(5.60)。

冠幅的差异在各群体中表现比较明显,冠幅平均值最大的是祁连居群为 1.96 m,显著高于其他居群,最小的是贵南居群为 0.89,显著低于其他居群,互助、民和、湟源以及大通居群的冠幅没有显著差异;地径平均值最大的是祁连居群为 6.63 cm,最小的是民和居群为 3.33 cm,玛沁、班玛、民和以及贵南居群之间的地径没有明显差异,祁连居群和大通居群与其他居群之间存在显著差异;树高平均值最大的是

祁连居群为 4.12 m,最小的是贵南居群(1.49 m),门源、玛沁、班玛、民和以及湟源居群之间没有显著差异;分枝平均值最大的是班玛居群(1.71),最小的是门源居群(1.14);百果重平均值最大的是祁连居群(18.22 g),最小的是贵南居群(6.42 g),其中祁连、湟源和大通居群之间没有明显差异;刺长平均值最大的是门源居群(32.90 mm),最小的是民和居群(20.68 mm),门源与祁连之间,班玛、湟源与大通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,湟源居群植株生长发育显著优于其他居群,互助、祁连次之。

## 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\*)、刺长与叶形指数(-0.699\*)均呈显著负相关;冠幅与百果重(0.635\*)、叶长与叶形指数(0.758\*)均呈显著正相关;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,百果重越大,果形指数越小。

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

表中同行小写字母为多重比较的 Duncan 表示值, 字母相同的表示差异不显著

The lowercase letters in the same row in the table represent the Duncan values for multiple comparisons, and the difference in letters with the same letter is not significant

表 4 中国沙棘表型性状相关性分析

Table 4 Correlation analysis of phenotypic traits of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*

表型性状 Phenotypic traits	百果重 Hundred fruit weight	刺长 Length of thorn	冠幅 Crown width	地径 Ground diameter	树高 Plant height	分枝 Branches	果实纵径 Longitudinal diameter	果实横径 Fruit diameter	果形指数 Fruit shape index	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	叶形指数 Leaf shape index
百果重 Hundred fruit weight	1											
刺长 Length of thorn	-0.057	1										
冠幅 Crown width	0.635*	-0.185	1									
地径 Ground diameter	0.458	0.321	0.543	1								
树高 Plant height	0.105	0.197	0.402	0.450	1							
分枝 Branches	0.352	0.062	0.103	0.415	-0.069	1						
果实纵径 Longitudinal diameter	0.580	0.088	-0.064	0.207	-0.088	0.406	1					
果实横径 Fruit diameter	0.867**	-0.050	0.314	0.234	-0.078	0.454	0.848**	1				
果形指数 Fruit shape index	-0.797**	0.273	-0.707*	-0.148	0.049	-0.285	-0.157	-0.652*	1			
叶长 Leaf length	0.368	-0.630	0.585	0.189	-0.031	-0.312	-0.190	0.068	-0.428	1		
叶宽 Leaf width	0.603	-0.267	0.377	0.001	-0.079	-0.274	0.247	0.538	-0.603	0.628	1	
叶形指数比 Leaf shape index	-0.024	-0.699*	0.388	0.082	-0.044	-0.172	-0.464	-0.334	-0.120	0.758*	-0.003	1

\* 为显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\* 为极显著相关 ( $P < 0.01$ )

\* is significant correlation ( $P < 0.05$ ); \*\* is highly 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和图1。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主要反映的是果实性状。第2主成分的贡献率为25.16%,其中影响较大的性状主要是叶形指数(-0.86)、叶长(-0.77)、果实纵径(0.68)和刺长(0.67),说明第2主成分主要与叶片性状有关。第3主成分贡献率为15.65%,其中地径(0.74)、树高(0.76)特征值较大,说明这一主成分主要反映的是与树体形态相关性状。第4主成分贡献率为10.12%,其中分枝(-0.72)是影响最大的性状。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较大的表型性状。

表5 主成分相关分析

Table 5 Principal component correlation analysis

表型性状 Phenotypic traits	第1 主成分 PC1	第2 主成分 PC2	第3 主成分 PC3	第4 主成分 PC4
百果重 Hundred fruit eight	0.95	0.22	0.01	0.04
刺长 Length of thorn	-0.27	0.67	0.38	0.38
冠幅 Crown width	0.75	-0.30	0.48	0.04
地径 Ground diameter	0.45	0.21	0.74	-0.11
树高 Plant height	0.09	0.04	0.76	0.34
分枝 Branches	0.3	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
叶形指数比 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

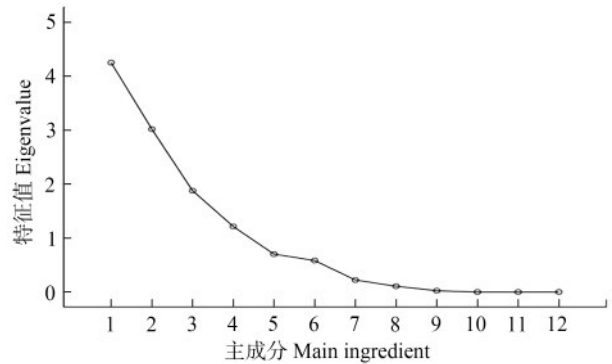


图1 表型性状主成分分析

Fig.1 Principal component analysis of phenotypic traits

### 2.4 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),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;纬度与叶形指数呈现极显著正相关(0.83\*\*),与叶长(0.67\*)呈现显著正相关,与刺长(-0.70\*)呈现显著负相关;海拔与叶形指数间呈现极显著负相关(-0.82\*\*),与叶长(-0.65\*)呈现显著负相关。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较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 phenotypic 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 Fruit shape index	0.05	-0.39	0.41
叶长 Leaf length	0.41	0.67*	-0.65*
叶宽 Leaf width	-0.09	0.11	-0.04
叶形指数 Leaf shape index	0.47	0.83**	-0.82**

## 3 讨论

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<sup>[17-19]</sup>。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<sup>[20-22]</sup>。已有很多学者通过中国

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<sup>[23-25]</sup>。本研究在前人研究基础上增加了冠幅、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表型性状存在显著差异,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<sup>[26]</sup>。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(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%)。这与吴琼等<sup>[24]</sup>、郭学斌<sup>[27]</sup>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,出现这种现象的原因可能是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,受环境影响较大<sup>[28]</sup>。

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<sup>[29]</sup>。本研究性状间有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<sup>[27]</sup>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。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。

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<sup>[30]</sup>,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<sup>[31]</sup>。本研究从中国沙棘的12个性状中提取了4个主成分,累积贡献率达到了86.35%。结果显示,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<sup>[32]</sup>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,这与本研究得出的结果有一定的相似性。

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<sup>[33]</sup>。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<sup>[34]</sup>。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<sup>[35]</sup>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,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。吴琼等<sup>[24]</sup>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,同时也可能因为本研究采样的海拔梯度不明显,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试验。

## 4 结论

中国沙棘12个表型性状的多重比较和方差分析结果表明,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。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;地理环境因子对中国沙棘影响较大的表型性状是叶长和叶形指数。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较大的表型性状。

## 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). *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. *西北大学学报*, 1996, 6(3): 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. *Journal of Northwest University*, 1996, 6(3): 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. *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. *北方园艺*, 2017(7): 27-30  
Hu D J, Hu J Z, Wei X Z. Comparison of drought tolerance of different seabuckthorn cultivars. *Northern Horticulture*, 2017(7):

- 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. 中国果树, 2022(5): 104-108  
Yao T. Development status of seabuckthorn industry in Inner Mongolia and its ecological response to aeolian sand. China Fruits, 2022(5): 104-108
- [6] Chen S Y, Zhang X Z. Characterization of the complete chloroplast genome of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.). Conservation Genetics Resources, 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. 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. Medicinal Plant, 2017(5): 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. 植物资源与环境学报, 2019, 28(4): 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. Journal of Plant Resources and Environment, 2019, 28(4): 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. 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. 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. 中国水土保持, 2021(9): 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. China Soil and Water Conservation, 2021(9): 16-18
- [12] Li Y, Shi Y S, Cao Y S, Wang T Y. A phenotypic diversity analysis of maize germplasm preserved in China. 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. 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. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(10): 1511-1521
- [14] 吴琼. 中国沙棘、云南沙棘表型多样性研究. 兰州: 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*. Lanzhou: Northwest Normal University, 2007
- [15] 黄铨. 中国沙棘的性状变异与演化趋势. 国际沙棘研究与开发, 2003, 1(2): 6-12  
Huang Q. Trait variation and evolution trend of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* at Ziwouling, Gansu. International Seabuckthorn Research and Development, 2003, 1(2): 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. 兰州大学学报, 2004, 40(3): 72-75  
Sun K, Chen W, Ma R J, Chen X L. A study on the genetic diversity of *Hippophae rhamnoides* ssp.. Journal of Lanzhou University, 2004, 40(3): 72-75
- [17] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 王广鹏. 中国板栗可溶性糖相关性状多样性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24(2): 493-504  
Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Wang G P. Diversity analysis of soluble sugar-related traits in Chinese chestnut. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(2): 493-504
- [18] 吴昊, 苏万龙, 石美娟, 蒋晓芳, 任海燕, 王永康, 赵爱玲, 李登科. 枣种质果实性状多样性分析与综合评价. 植物遗传资源学报, 2022, 23(6): 1613-1625  
Wu H, Su W L, Shi M J, Jiang X F, Ren H Y, Wang Y K, Zhao A L, Li D K. Analysis and comprehensive evaluation of fruit trait diversity of jujube germplasm. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(6): 1613-1625
- [19] 张磊磊, 范阿棋, 洪梅, 马志华, 陈晋瑞, 赵双印, 郑凯, 吐尔逊·吐尔洪. 647份海岛棉种质资源遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24(1): 307-324  
Zhang L L, Fan A Q, Hong M, Ma Z H, Chen J R, Zhao S Y, Zheng K, Tuer-xun T H. Analysis of genetic diversity of 647 island cotton germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(1): 307-324
- [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. 植物资源与环境学报, 2021, 30(6): 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. Journal of Plant Resources and Environment, 2021, 30(6): 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. 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. 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. 长江大学学报, 2019, 16(8): 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. Journal of Yangtze University, 2019, 16(8): 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. 西北师范大学学报, 2007, 43(2): 78-84  
Wu Q, Sun K, Zhang H, Chen W, Su X, Chen X L. Study on

- phenotypic diversity of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in Shanxi province. *Journal of Northwest Normal University*, 2007, 43(2): 78-84
- [25] 廉永善. 沙棘属植物生物学和化学. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2000: 1-15  
Lian Y S. Biology and chemistry of sea buckthorn plants. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 2000: 1-15
- [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. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(6): 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. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(6): 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. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 111-119  
Guo X B. Phenotypic variation of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* natural population in Shanxi province. *Forest Research*, 2021, 34(4): 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. *林业科学研究*, 2020, 33(1): 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. *Forest Research*, 2020, 33(1): 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. *分子植物育种*, 2020, 18(2): 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. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(2): 526-537
- [30] 郑国保, 马玲, 撤志明, 李苗, 刘淑瑛, 臧娅妮, 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. *节水灌溉*, 2022(1): 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. *Water-saving Irrigation*, 2022(1): 47-51
- [31] 姜楠南, 孙音, 刘凤栾, 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. *经济林研究*, 2021, 39(2): 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. *Economic Forest Research*, 2021, 39(2): 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. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(1): 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. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2021, 49(1): 37-47
- [33] 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. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 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 three karst hills of Guilin, southwest China. *Acta Plant Ecology*, 2020, 44(8): 828-841
- [34] 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. *生态学报*, 2014, 34(6): 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1451-1460
- [35] 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. *东北农业大学学报*, 2017, 48(5): 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 *Heracleum dissectum* Ledeb. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(5): 21-27