

三江源地区小花棘豆表型多样性及其与环境因子的相关性

吕亮雨^{a,①}, 刘青青^{a,①}, 蔡宗程^a, 雷莎清^b, 施建军^{a,②}

(青海大学: a. 畜牧兽医科学院, b. 昆仑学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 为了探究三江源地区野生小花棘豆 (*Oxytropis glabra* DC.) 表型多样性及其与环境因子的关系, 对三江源地区 6 个主要且具代表性的小花棘豆天然居群的 18 个表型性状进行变异特征和主成分分析, 基于这些表型性状对 6 个居群进行聚类分析, 并对这些表型性状与经度、纬度、海拔、土壤 pH 值和土壤电导率进行相关性分析。结果表明: 除单株花序数和种形指数外, 其余表型性状的 F 值均达到显著 ($p < 0.05$) 水平, 其中, 花序长的 F 值最大, 叶形指数和种子千粒质量的 F 值较大。供试居群 18 个表型性状的变异系数为 0.30% ~ 53.79%, 均值为 14.99%, 其中, 叶形指数、单株花序数、花序长和单荚果种子数变异系数的均值均在 20% 以上, 而种子千粒质量变异系数的均值最小 (0.47%)。相关性分析结果表明: 仅单叶鲜质量与纬度呈显著负相关, 开花后株高和冠幅与海拔呈极显著 ($p < 0.01$) 负相关, 单叶鲜质量和种子千粒质量与土壤电导率分别呈极显著和显著负相关。主成分分析结果显示: 前 3 个主成分的累计贡献率为 92.960%, 说明这 3 个主成分能够反映小花棘豆表型性状的绝大部分信息。聚类分析结果表明: 供试居群被分成 2 组, 其中, 甘德县柯曲镇和天峻县木里镇居群为一组, 其余居群为另一组。综上所述, 三江源地区小花棘豆表型性状变异较为丰富, 但仅个别表型性状受纬度、海拔和土壤电导率的影响显著。

关键词: 小花棘豆; 表型性状; 环境因子; 相关性分析; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: Q944; Q948.11; S541.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)02-0050-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.02.06

Phenotypic diversity of *Oxytropis glabra* in Sanjiangyuan region and its correlations with environmental factors LYU Liangyu^{a,①}, LIU Qingqing^{a,①}, CAI Zongcheng^a, LEI Shaqing^b, SHI Jianjun^{a,②} (Qinghai University: a. Academy of Animal Husbandry and Veterinary Sciences, b. Kunlun College, Xining 810016, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(2): 50-57

Abstract: To explore the phenotypic diversity of wild *Oxytropis glabra* DC. in Sanjiangyuan region and its relationships with environmental factors, variation characteristics and principal component analysis were conducted for 18 phenotypic traits of 6 major and representative natural populations of *O. glabra* in Sanjiangyuan region, cluster analysis was carried out for the 6 populations based on these phenotypic traits, and correlation analysis was performed between these phenotypic traits and longitude, latitude, altitude, soil pH value, and soil electrical conductivity. The results show that except for inflorescence number per plant and seed shape index, the F values of other phenotypic traits all reach significant ($p < 0.05$) levels, in which, the F value of inflorescence length is the largest, the F values of leaf shape index and 1 000-grain mass of seeds are relatively large. The coefficients of variation of 18 phenotypic traits of test populations are 0.30% - 53.79%, with an average of 14.99%, in which, the averages of

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK1002); 青海省自然科学基金项目(2023-ZJ-923M)

作者简介: 吕亮雨(1997—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事牧草经营管理研究。

刘青青(1997—), 女, 青海西宁人, 博士研究生, 主要从事牧草育种研究。

① 共同第一作者

② 通信作者 E-mail: 1641014067@qq.com

引用格式: 吕亮雨, 刘青青, 蔡宗程, 等. 三江源地区小花棘豆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, 2024, 33(2): 50-57.

coefficients of variation of leaf shape index, inflorescence number per plant, inflorescence length, and seed number per pod are all greater than 20%, while the average of coefficient of variation of 1 000-grain mass of seeds is the smallest (0.47%). The correlation analysis result shows that only fresh mass per leaf shows a significant negative correlation with latitude, plant height after flowering and crown breadth show extremely significant ($p < 0.01$) negative correlations with altitude, and fresh mass per leaf and 1 000-grain mass of seeds show extremely significant and significant negative correlations with soil electrical conductivity, respectively. The principal component analysis result shows that the cumulative contribution rate of the first three principal components is 92.960%, indicating that these three principal components can reflect most information of the phenotypic traits of *O. glabra*. The cluster analysis result shows that the test populations are divided into 2 groups, in which, the population in Kequ Town of Gade County and that in Muli Town of Tianjun County are clustered into one group, and other populations are clustered into the other group. In conclusion, the phenotypic trait variation of *O. glabra* in Sanjiangyuan region is relatively abundant, but only several phenotypic traits are significantly affected by latitude, altitude, and soil electrical conductivity.

Key words: *Oxytropis glabra* DC.; phenotypic trait; environmental factor; correlation analysis; principal component analysis; cluster analysis

小花棘豆 (*Oxytropis glabra* DC.) 为豆科 (Fabaceae) 多年生草本植物^[1], 主要生长在海拔 4 000~4 400 m 的山坡草地、石质山坡、河谷阶地、冲积川地、草地、荒地、田边、渠旁、沼泽草甸、盐土草滩上^[2-4], 且在青海三江源地区、内蒙古草原、新疆盆地和西藏荒漠等地均有栽培^[5]。小花棘豆为耐盐植物, 在荒漠草原、荒漠区的低湿地及许多湖盆边缘和沙丘间的盐湿低地为优势草种^[2]; 该种可以通过根瘤菌的固氮作用改善土壤营养状况^[3]; 此外, 其根系强大, 具有防风固沙和水土保持能力, 在治理荒漠化草原方面具有重要的生态价值和经济价值^[2]。然而, 小花棘豆具有双重作用, 其过量无序繁殖会造成草地退化^[6], 且在夏季全株具毒, 家畜在采食后会现食用成瘾、体格消瘦、生育困难等慢性中毒症状, 甚至死亡^[7-10]。如何平衡小花棘豆的利弊以及安全、高效地开发利用这一植物资源, 凸显其经济和生态价值, 已经成为当前的研究重点。

植物表型性状便于野外调查和搜集, 对植物进化和植物环境适应性研究具有重要意义^[11]。根据表型性状对植物遗传多样性进行评估, 是目前较常用的一种研究方法^[12]。迄今为止, 已有很多学者利用植物不同器官的形态指标差异进行同一植物不同种源、品种等的表型多样性分析^[13-16], 并有学者通过形态指标之间的相关性以及形态指标与分子标记结合选育植物新品种, 从而大大缩短了育种周期^[17]。

近年来, 关于小花棘豆的研究主要集中在化学成分分析及毒性机理等方面^[7, 9-10], 而关于其优良品种选育的研究却未见报道。研究小花棘豆不同野生居

群的表型多样性, 有助于了解该种在不同生境下的表型特征及其在群落演替、维系生态平衡中的作用^[12], 为更加安全、高效地利用小花棘豆治理生态环境, 科学抑制退化草地中小花棘豆的蔓延, 以及快速选育小花棘豆优良品种提供基础资料^[18-19]。鉴于此, 笔者在三江源地区选取 6 个主要且具代表性的小花棘豆天然居群, 系统地研究了各居群根、茎、叶、花和种子的表型性状变异特征, 分析了小花棘豆 18 个表型性状与部分环境因子的关系, 并对三江源地区供试小花棘豆居群的表型多样性进行了评价, 以期了解三江源地区小花棘豆的表型分化程度和居群变异特征, 为选育小花棘豆优良品种提供研究数据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于青海省三江源区域, 地理位置为东经 89.40°~102.27°、北纬 30.65°~36.20°, 该地区为青藏高原腹地, 平均海拔 4 000 m 左右; 年均温 -5.6 °C~3.8 °C, 极端最低温 -48 °C, 年均降水量 262.2~772.8 mm, 年蒸发量较大, 一般在 730~1 700 mm。区域内重要植被类型有高寒草甸和高寒草原, 代表种类有矮生嵩草 (*Carex alataensis* S. R. Zhang)、草地早熟禾 (*Poa pratensis* Linn.)、小花棘豆等。土壤类型主要为壤土、高寒草甸土和泥炭土等。

1.2 材料

以三江源地区 6 个主要且具代表性的小花棘豆天然居群为研究对象, 各居群的基本情况见表 1。

表1 供试三江源地区小花棘豆天然居群样地的基本情况¹⁾Table 1 Basic situation of plots of test natural populations of *Oxytropis glabra* DC. in Sanjiangyuan region¹⁾

编号 No.	样地 Plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	土壤 pH 值 Soil pH value	EC/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	土壤类型 Soil type
P1	河南蒙古族自治县优干宁镇 Youganing Town of Henan Mongolian Autonomous County	E101.22°	N34.18°	3 615	7.62	292	Lo
P2	玉树市上拉秀乡 Shanglaxiu Township of Yushu City	E96.31°	N32.99°	4 316	7.33	213	Lo
P3	玛沁县大武镇 Dawu Town of Maqen County	E100.21°	N34.46°	3 696	6.35	185	AMS
P4	达日县满掌乡 Manzhang Township of Darlag County	E99.65°	N33.75°	4 101	6.16	225	Lo
P5	甘德县柯曲镇 Kequ Town of Gade County	E100.26°	N34.09°	3 892	6.88	1 652	GS
P6	天峻县木里镇 Muli Town of Tianjun County	E99.15°	N38.08°	4 007	8.35	1 728	Ci

¹⁾EC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity. Lo: 壤土 Loam; AMS: 高寒草甸土 Alpine meadow soil; GS: 砂砾土 Gravelly soil; Ci: 煤渣 Cinder.

1.3 方法

于2023年7月至9月,在每个居群中选取完整、健康的当年生植株25株,样株间距大于20m。统计单株叶序数、单株花序数;每株选取植株基部的3个荚果,统计单荚果种子数。用卷尺(精度1mm)测量所有样株开花后株高(从地面到植株顶端的高度)、冠幅(南北向和东西向冠幅的均值)、营养枝长(植株基部3个生长良好的营养枝长度的均值)、叶序长(植株基部3个生长良好的叶序长度的均值)、花序长(植株基部3个生长良好的花序长度的均值);用直尺(精度1mm)测量根系长度(主根拉直后的长度)和根系深度(沿垂直于根系的方向挖掘土壤,地面至根系最深处的深度);用电子天平(精度0.001g)称量单株根系鲜质量和单株茎叶鲜质量。在所有样株基部枝条的上、中、下部均匀采集成熟叶,每株采集20枚叶,用游标卡尺(精度0.01mm)测量叶长、叶宽、地径、营养枝直径(植株基部3个生长良好的营养枝直径的均值),用电子天平称量单叶鲜质量。在所有样株上随机选取20粒成熟、饱满的种子,用游标卡尺测量种子纵径和种子横径,用电子天平称量种子千粒质量。根据检测结果计算叶形指数(叶长与叶宽的比值)和种形指数(种子纵径与种子横径的比值)。

1.4 数据处理与统计分析

采用EXCEL 2010软件整理数据;采用SPSS 21.0软件进行方差分析、主成分分析和聚类分析并制图,对各表型性状与环境因子进行相关性分析。

2 结果和分析

2.1 表型性状变异特征分析

对小花棘豆6个天然居群的18个表型性状进行

多重比较,结果(表2)表明:6个居群的根系长度为12.30~23.62cm,根系深度为8.30~15.90cm,单株根系鲜质量为7.50~14.05g,单株枝叶鲜质量为19.30~38.37g,地径为1.93~2.56mm;这5个表型性状均以天峻县木里镇(P6)居群最小、河南蒙古族自治县优干宁镇(P1)居群最大。并且,这5个表型性状在P1和P6居群间差异显著($p < 0.05$);玉树市上拉秀乡(P2)和玛沁县大武镇(P3)居群的单株枝叶鲜质量显著高于达日县满掌乡(P4)和甘德县柯曲镇(P5)居群,P2居群的地径显著高于P3、P4和P5居群,而根系长度、根系深度和单株根系鲜质量在P2、P3、P4和P5居群间的差异多不显著。6个居群的开花后株高为7.04~18.82cm,冠幅为13.05~27.66cm;这2个表型性状均以P2居群最小、P1居群最大。并且,P1居群的开花后株高和冠幅显著高于其他居群,P2居群的开花后株高显著低于P3和P5居群,P2居群的冠幅显著低于其他居群。6个居群的营养枝长为9.66~21.00cm,营养枝直径为1.00~1.70mm,单株叶序数为25.8~61.8,叶序长为7.90~14.98cm;这4个表型性状均以P6居群最小、P1居群最大。并且,这4个表型性状在P1和P6居群间差异显著,而在P2、P3、P4和P5居群间差异多不显著。6个居群的叶形指数为3.07~3.69,单叶鲜质量为0.08~0.10g,其中,P2居群的叶形指数最大,P1和P6居群的叶形指数相等且最小,并且P1、P3和P6居群的叶形指数差异不显著,但均显著低于其他3个居群;P2和P3居群的单叶鲜质量相等且最大,P4和P6居群的单叶鲜质量相等且最小,并且,前2个居群的单叶鲜质量显著高于后2个居群。

从表2看,6个居群中,P3居群的单株花序数最大(15.0),P2居群的单株花序数次之(13.8),P4居

群的单株花序数最小(10.4),且各居群间的单株花序数差异不显著。6个居群的花序长为11.17~20.08 mm,其中,P2居群的花序长最大,P6居群的花序长最小,且P6居群的花序长显著小于P1、P2和P3居群,但后3个居群间的花序长差异不显著。6个居群中,P3居群的单荚果种子数最多(5.8),P2居群的单荚果种子数次之(5.6),P6居群的单荚果种子数最少(3.8),且P2和P3居群的单荚果种子数差异不显著,但均显著高于P6居群。6个居群的种形指数较为接近,其中,P1和P2居群的种形指数相等且最大(1.19),P3和P6居群的种形指数相等且最小(1.16),并且,各居群间的种形指数差异不显著。6个居群的种子千粒质量也较为接近,其中,P1和P3

居群的种子千粒质量相等且最大(0.94 g),P4、P5和P6居群的种子千粒质量相等且最小(0.92 g),并且,前2个居群的种子千粒质量显著高于后3个居群。

方差分析结果(表2)表明:除单株花序数和种形指数外,其余表型性状的 F 值均达到显著水平,其中,花序长的 F 值最大(232.429),叶形指数和种子千粒质量的 F 值较大(分别为192.545和190.038),说明供试6个居群小花棘豆的多数表型性状差异显著,其中花序长、叶形指数和种子千粒质量的变异程度明显高于其他表型性状。

2.2 表型性状变异系数分析

对小花棘豆6个天然居群表型性状的变异系数进行分析,结果(表3)表明:供试居群小花棘豆18个

表 2 三江源地区不同居群小花棘豆表型性状的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on phenotypic traits of *Oxytropis glabra* DC. from different populations in Sanjiangyuan region ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

居群 Population	根系长度/cm Root length	根系深度/cm Root depth	单株根系鲜质量/g Root fresh mass per plant	单株枝叶鲜质量/g Branch and leaf fresh mass per plant	地径/mm Ground diameter	开花后株高/cm Plant height after flowering
P1	23.62±3.09a	15.90±1.72a	14.05±2.49a	38.37±2.08a	2.56±0.04a	18.82±2.63a
P2	15.94±3.04bc	14.52±2.12a	11.04±1.80b	37.66±4.01a	2.52±0.18a	7.04±1.81c
P3	18.60±2.76b	13.56±1.37ab	10.58±1.83b	34.90±4.21a	2.22±0.31b	14.80±2.25b
P4	16.82±2.75b	11.72±1.99bc	9.44±1.88bc	29.64±5.36b	2.21±0.16b	7.90±1.79c
P5	19.56±3.14b	10.78±2.16cd	8.90±1.22bc	25.16±2.29b	2.00±0.25bc	13.12±2.45b
P6	12.30±2.11c	8.30±2.19d	7.50±1.17c	19.30±3.32c	1.93±0.16c	7.80±1.55c
F 值 F value	110.126 *	8.609 *	25.069 *	83.933 *	26.223 *	18.958 *
居群 Population	冠幅/cm Crown breadth	营养枝长/cm Vegetative shoot length	营养枝直径/mm Vegetative shoot diameter	单株叶序数 Phyllotaxis number per plant	叶序长/cm Phyllotaxis length	叶形指数 Leaf shape index
P1	27.66±2.48a	21.00±2.75a	1.70±0.27a	61.8±5.2a	14.98±1.60a	3.07±0.73b
P2	13.05±0.86e	18.22±2.51bc	1.52±0.08abc	50.0±5.4b	12.40±1.87b	3.69±0.79a
P3	25.36±1.00b	17.43±1.91bc	1.37±0.21bc	48.6±6.5bc	12.02±1.59bc	3.08±0.72b
P4	16.68±1.45d	16.52±2.74bc	1.30±0.09bc	42.2±7.3c	10.12±1.25cd	3.42±0.76a
P5	21.35±0.70c	13.33±3.57c	1.13±0.11cd	32.0±4.1d	9.32±1.71de	3.57±0.76a
P6	18.31±1.49d	9.66±2.38d	1.00±0.28d	25.8±4.6d	7.90±0.99e	3.07±0.38b
F 值 F value	84.310 *	19.212 *	58.371 *	51.639 *	90.031 *	192.545 *
居群 Population	单叶鲜质量/g Fresh mass per leaf	单株花序数 Inflorescence number per plant	花序长/cm Inflorescence length	单荚果种子数 Seed number per pod	种形指数 Seed shape index	种子千粒质量/g 1 000-grain mass of seeds
P1	0.09±0.01b	12.8±4.8a	19.36±5.74a	5.4±1.1ab	1.19±0.08a	0.94±0.01a
P2	0.10±0.01a	13.8±2.6a	20.08±3.45a	5.6±1.3a	1.19±0.08a	0.93±0.01b
P3	0.10±0.01a	15.0±3.2a	18.23±5.35a	5.8±1.6a	1.16±0.05a	0.94±0.01a
P4	0.08±0.01c	10.4±5.6a	16.35±3.88ab	4.8±0.8ab	1.17±0.06a	0.92±0.01c
P5	0.09±0.01b	12.2±3.3a	15.86±2.38ab	5.2±0.8ab	1.17±0.07a	0.92±0.01c
P6	0.08±0.01c	13.4±4.2a	11.17±2.83b	3.8±0.8b	1.16±0.17a	0.92±0.01c
F 值 F value	20.571 *	0.731	232.429 *	17.308 *	5.547	190.038 *

¹⁾ P1: 河南蒙古族自治县优干宁镇 Youganing Town of Henan Mongolian Autonomous County; P2: 玉树市上拉秀乡 Shanglaxiu Township of Yushu City; P3: 玛沁县大武镇 Dawu Town of Maqen County; P4: 达日县满掌乡 Manzhang Township of Darlag County; P5: 甘德县柯曲镇 Kequ Town of Gade County; P6: 天峻县木里镇 Muli Town of Tianjun County. 同列中的不同小写字母表示在居群间差异显著($p<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($p<0.05$) differences between populations. *: $p<0.05$.

表型性状的变异系数为 0.30% ~ 53.79%，均值为 14.99%。叶形指数、单株花序数、花序长和单荚果种子数变异系数的均值均在 20% 以上，根系长度、根系深度、单株根系鲜质量、单株枝叶鲜质量、开花后株高、营养枝长、营养枝直径、单株叶序数和叶序长变异系数的均值在 12% ~ 20% 之间，地径、冠幅、单叶鲜质量和种形指数变异系数的均值在 6% ~ 9% 之间，而种子千粒质量变异系数的均值最小 (0.47%)。6 个居群中，天峻县木里镇 (P6) 居群表型性状变异系数的均值最大 (17.24%)，河南蒙古族自治县优干宁镇 (P1) 居群表型性状变异系数的均值最小 (13.79%)。

2.3 表型性状主成分分析

主成分分析结果 (表 4) 表明：前 3 个主成分的累计贡献率高达 92.960%，其中，第 1 主成分的贡献率为 67.715%，该主成分中根系深度 (0.996)、叶序长 (0.987)、营养枝直径 (0.977)、单株叶序数 (0.977)、营养枝长 (0.970)、单株枝叶鲜质量 (0.968)、单株根系鲜质量 (0.967)、种子千粒质量 (0.954)、花序长 (0.936) 和地径 (0.924) 的特征向量绝对值较高；第 2 主成分的贡献率为 15.564%，该主成分中冠幅 (0.880)、叶形指数 (-0.858) 和开花后株高 (0.716) 的特征向量绝对值较高；第 3 主成分的贡献率为

表 3 三江源地区不同居群小花棘豆表型性状的变异系数分析

Table 3 Analysis on coefficients of variation of phenotypic traits of *Oxytropis glabra* DC. from different populations in Sanjiangyuan region

居群 ¹⁾ Population ¹⁾	各表型性状的变异系数/% Coefficient of variation of each phenotypic trait						
	根系长度 Root length	根系深度 Root depth	单株根系鲜质量 Root fresh mass per plant	单株枝叶鲜质量 Branch and leaf fresh mass per plant	地径 Ground diameter	开花后株高 Plant height after flowering	冠幅 Crown breadth
P1	13.10	10.85	17.70	5.43	1.71	13.95	8.96
P2	19.06	14.61	16.29	10.64	7.30	25.76	6.61
P3	14.84	10.12	17.27	12.08	13.77	15.17	3.94
P4	16.35	16.99	19.93	18.08	7.02	22.66	8.98
P5	16.04	20.07	13.74	9.10	12.70	18.63	3.29
P6	17.15	26.33	15.58	17.18	8.24	19.82	8.14
均值 Average	16.09	16.50	16.75	12.08	8.46	19.33	6.65

居群 ¹⁾ Population ¹⁾	各表型性状的变异系数/% Coefficient of variation of each phenotypic trait						
	营养枝长 Vegetative shoot length	营养枝直径 Vegetative shoot diameter	单株叶序数 Phyllotaxis number per plant	叶序长 Phyllotaxis length	叶形指数 Leaf shape index	单叶鲜质量 Fresh mass per leaf	单株花序数 Inflorescence number per plant
P1	13.08	16.00	8.36	10.67	23.80	9.22	37.63
P2	13.75	5.34	10.86	15.07	21.33	5.87	18.76
P3	10.97	15.53	13.38	13.24	23.49	3.80	21.60
P4	16.60	7.02	17.36	12.31	22.18	7.50	53.79
P5	26.78	9.92	12.69	18.31	21.29	4.60	26.81
P6	24.61	28.41	17.63	12.50	12.41	6.68	31.49
均值 Average	17.63	13.70	13.38	13.68	20.75	6.28	31.68

居群 ¹⁾ Population ¹⁾	各表型性状的变异系数/% Coefficient of variation of each phenotypic trait					均值 Average
	花序长 Inflorescence length	单荚果种子数 Seed number per pod	种形指数 Seed shape index	种子千粒质量 1 000-grain mass of seeds		
P1	29.65	21.11	6.89	0.65		13.79
P2	17.17	23.96	6.86	0.34		13.84
P3	29.36	28.33	3.95	0.56		14.40
P4	23.71	17.43	4.85	0.30		16.62
P5	15.04	16.09	5.85	0.57		14.02
P6	25.25	22.02	14.25	0.40		17.24
均值 Average	23.36	21.49	7.11	0.47		14.99

¹⁾ P1: 河南蒙古族自治县优干宁镇 Youganing Town of Henan Mongolian Autonomous County; P2: 玉树市上拉秀乡 Shanglaxiu Township of Yushu City; P3: 玛沁县大武镇 Dawu Town of Maqen County; P4: 达日县满掌乡 Manzhang Township of Darlag County; P5: 甘德县柯曲镇 Kequ Town of Gade County; P6: 天峻县木里镇 Muli Town of Tianjun County.

表 4 三江源地区小花棘豆表型性状的主成分分析
Table 4 Principal component analysis on phenotypic traits of *Oxytropis glabra* DC. in Sanjiangyuan region

主成分 Principal component	各表型性状的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each phenotypic trait ¹⁾										
	l_r	h_r	m_r	m_{bl}	d_g	h_f	d_c	l_{vs}	d_{vs}	n_p	l_p
1	0.769	0.996	0.967	0.968	0.924	0.603	0.406	0.970	0.977	0.977	0.987
2	0.329	-0.071	0.102	-0.146	-0.286	0.716	0.880	-0.094	-0.095	-0.009	0.076
3	-0.397	0.028	-0.175	0.129	-0.027	-0.226	-0.205	-0.111	-0.082	-0.072	-0.046

主成分 Principal component	各表型性状的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each phenotypic trait ¹⁾						特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	LSI	m_l	n_i	l_i	n_s	SSI			
1	0.004	0.667	0.232	0.936	0.825	0.748	0.954	12.189	67.715
2	-0.858	0.186	0.395	-0.248	-0.040	-0.505	-0.139	2.802	15.564
3	0.078	0.701	0.857	0.130	0.302	-0.272	0.044	1.743	9.681

¹⁾ l_r : 根系长度 Root length; h_r : 根系深度 Root depth; m_r : 单株根系鲜质量 Root fresh mass per plant; m_{bl} : 单株枝叶鲜质量 Branch and leaf fresh mass per plant; d_g : 地径 Ground diameter; h_f : 开花后株高 Plant height after flowering; d_c : 冠幅 Crown breadth; l_{vs} : 营养枝长 Vegetative shoot length; d_{vs} : 营养枝直径 Vegetative shoot diameter; n_p : 单株叶序数 Phyllotaxis number per plant; l_p : 叶序长 Phyllotaxis length; LSI: 叶形指数 Leaf shape index; m_l : 单叶鲜质量 Fresh mass per leaf; n_i : 单株花序数 Inflorescence number per plant; l_i : 花序长 Inflorescence length; n_s : 单荚果种子数 Seed number per pod; SSI: 种形指数 Seed shape index; m_s : 种子千粒质量 1 000-grain mass of seeds.

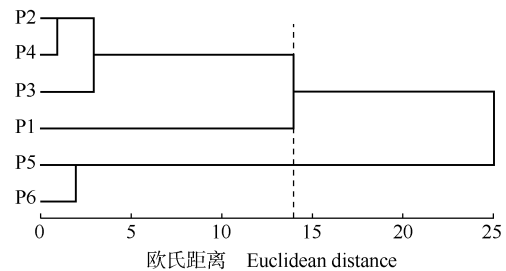
9.681%, 该主成分中仅单株花序数 (0.857) 和单叶鲜质量 (0.701) 的特征向量绝对值较高。

2.4 基于表型性状的聚类分析

聚类分析结果 (图 1) 表明: 供试的 6 个居群被分为 2 组, 其中, 甘德县柯曲镇 (P5) 和天峻县木里镇 (P6) 居群为一组, 其余 4 个居群为另一组, 并且, 在欧氏距离 14 处, 分成 2 个亚组, 即河南蒙古族自治县优干宁镇 (P1) 居群单独为 1 个亚组, 玉树市上拉秀乡 (P2)、玛沁县大武镇 (P3) 和达日县满掌乡 (P4) 居群为另一个亚组。

2.5 表型性状与环境因子的相关性分析

小花棘豆 18 个表型性状与经度、纬度、海拔、土壤 pH 值和土壤电导率的相关性分析结果 (表 5) 表



P1: 河南蒙古族自治县优干宁镇 Youganing Town of Henan Mongolian Autonomous County; P2: 玉树市上拉秀乡 Shanglaxiu Township of Yushu City; P3: 玛沁县大武镇 Dawu Town of Maqen County; P4: 达日县满掌乡 Manzhang Township of Darlag County; P5: 甘德县柯曲镇 Kequ Town of Gade County; P6: 天峻县木里镇 Muli Town of Tianjun County.

图 1 基于 18 个表型性状的三江源地区小花棘豆居群的聚类分析
Fig. 1 Cluster analysis on populations of *Oxytropis glabra* DC. in Sanjiangyuan region based on 18 phenotypic traits

表 5 三江源地区小花棘豆表型性状与 5 个环境因子的相关性分析¹⁾
Table 5 Analysis on correlations between phenotypic traits of *Oxytropis glabra* DC. in Sanjiangyuan region and five environmental factors¹⁾

表型性状 Phenotypic trait	与环境因子的相关系数 Correlation coefficient with environmental factors				
	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	土壤 pH 值 Soil pH value	土壤电导率 Soil electrical conductivity
根系长度 Root length	-0.078	-0.170	-0.687	-0.270	-0.422
根系深度 Root depth	-0.196	-0.284	-0.260	-0.237	-0.790
单株根系鲜质量 Root fresh mass per plant	-0.063	-0.140	-0.434	-0.048	-0.724
单株枝叶鲜质量 Branch and leaf fresh mass per plant	-0.269	-0.354	-0.160	-0.309	-0.794
地径 Ground diameter	0.036	-0.039	-0.021	-0.063	-0.708
开花后株高 Plant height after flowering	-0.302	-0.348	-0.929 **	-0.059	-0.476
冠幅 Crown breadth	-0.410	-0.428	-0.996 **	-0.035	-0.351
营养枝长 Vegetative shoot length	-0.170	-0.265	-0.261	-0.352	-0.666
营养枝直径 Vegetative shoot diameter	-0.065	-0.146	-0.236	-0.126	-0.733
单株叶序数 Phyllotaxis number per plant	-0.193	-0.272	-0.330	-0.207	-0.739
叶序长 Phyllotaxis length	-0.170	-0.245	-0.390	-0.100	-0.795

续表5 Table 5 (Continued)

表型性状 Phenotypic trait	与环境因子的相关系数 Correlation coefficient with environmental factors				
	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude	土壤 pH 值 Soil pH value	土壤电导率 Soil electrical conductivity
叶形指数 Leaf shape index	0.392	0.333	0.733	-0.284	0.143
单叶鲜质量 Fresh mass per leaf	-0.645	-0.875 *	-0.262	-0.118	-0.934 **
单株花序数 Inflorescence number per plant	-0.661	-0.617	-0.233	0.264	-0.766
花序长 Inflorescence length	-0.218	-0.317	-0.084	-0.405	-0.732
单荚果种子数 Seed number per pod	-0.478	-0.571	-0.235	-0.542	-0.731
种形指数 Seed shape index	0.463	0.374	0.155	0.029	-0.416
种子千粒质量 1 000-grain mass of seeds	-0.042	-0.110	-0.150	0.015	-0.829 *

¹⁾ * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$.

明:各表型性状与经度和土壤 pH 值的相关性均不显著,多数表型性状与纬度、海拔和土壤电导率的相关性也不显著,仅单叶鲜质量与纬度呈显著($p < 0.05$)负相关,开花后株高和冠幅与海拔呈极显著($p < 0.01$)负相关,单叶鲜质量与土壤电导率呈极显著负相关,种子千粒质量与土壤电导率呈显著负相关。

3 讨论和结论

由于植物生长环境多样,自然分布的植物居群的遗传变异丰富^[20-22]。小花棘豆是三江源荒漠化草地和盐碱地区的重要生态草种^[7],生长环境多样^[2,6]。供试 6 个居群小花棘豆 18 个表型性状的变异系数均值为 14.99%,其中 16 个表型性状的 F 值达到显著($p < 0.05$)水平,说明三江源地区小花棘豆的表型多样性较为丰富,这可能是小花棘豆自身遗传特性及长期环境异质性共同作用的结果。本研究调查的小花棘豆居群多分布在三江源地区的高寒草甸、荒漠化草地及盐碱地。生长在荒漠化草地和盐碱地的植物长期受到温度、水分、盐碱胁迫的影响,而生长在高寒草甸的植物受温度、水分、盐碱胁迫的影响较小^[23]。已有研究发现,温度、水分、盐分会影响植物叶片的光合、呼吸和蒸腾作用,进而影响植物的生长发育^[24-26]。然而,关于小花棘豆的表型性状是否与各居群样地的生境异质性有关,尚待后续深入研究。

主成分分析结果表明:前 3 个主成分的累计贡献率为 92.960%,说明这 3 个主成分能够反映小花棘豆表型性状的绝大部分信息。并且,根系深度、单株根系鲜质量、单株枝叶鲜质量、地径、开花后株高、冠幅、营养枝长、营养枝直径、单株叶序数、叶序长、叶形指数、单叶鲜质量、单株花序数、花序长、种子千粒质量

是造成小花棘豆表型性状差异的主要因子。

聚类分析结果表明:供试小花棘豆居群被分为 2 组,即河南蒙古族自治县优干宁镇(P1)、玉树市上拉秀乡(P2)、玛沁县大武镇(P3)和达日县满掌乡(P4)居群为一组,甘德县柯曲镇(P5)和天峻县木里镇(P6)居群为另一组,推测这可能与各居群的土壤电导率差异有关。有研究表明:较高的土壤电导率会导致植物的组织和器官受到盐胁迫影响,致使植物生长发育不良^[27-29]。本研究中,P5 和 P6 居群的土壤电导率分别为 $1\ 652$ 和 $1\ 728\ \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,明显高于其他 4 个居群,而其他 4 个居群的土壤电导率较为接近。另外,P5 和 P6 居群小花棘豆的根系深度、单株根系鲜质量、单株枝叶鲜质量、地径、营养枝长、营养枝直径、单株叶序数、叶序长和花序长均小于其他 4 个居群,因此,在基于表型性状的聚类结果中,P5 和 P6 居群聚为一组,其他 4 个居群聚为一组。

研究发现植物的表型性状与环境因子密切相关^[30-32]。小花棘豆的单叶鲜质量与纬度呈显著负相关,说明纬度越高,小花棘豆的单叶鲜质量越小。开花后株高和冠幅与海拔呈极显著($p < 0.01$)负相关,这是因为海拔越高,风速越大、温度越低,植物为了适应恶劣的生存环境,只能缩小冠幅、降低株高^[33]。

综上所述,三江源地区小花棘豆表型性状变异较为丰富,叶形指数、单株花序数、花序长、单荚果种子数变异系数的均值均高于 20%;根系深度和叶序长等 15 个表型性状是造成小花棘豆表型差异的主要因子;并且,经度、纬度、海拔、土壤 pH 值和土壤电导率对该地区小花棘豆表型性状的影响多不显著,仅纬度、海拔和土壤电导率对小花棘豆个别表型性状影响显著,后续应开展其他环境因子对小花棘豆表型性状影响的研究,从而筛选出影响小花棘豆表型性状的主

要环境因子。另外,众所周知,植物表型性状受环境因子影响较大,在某些情况下不能够准确反映植物的遗传多样性^[34],因此,为了更全面地了解三江源地区小花棘豆的多样性水平,需要在分子水平上对其进行遗传多样性分析。

参考文献:

- [1] 严杜建,周启武,路浩,等.新疆天然草地毒草灾害分布与防控对策[J].中国农业科学,2015,48(3):565-582.
- [2] 程翠.小花棘豆内生真菌及其与幼苗抗性关系的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009:1-8.
- [3] 王庆海,庞卓,李翠,等.变异黄芪和小花棘豆对荒漠草地土壤性状的影响[J].草地学报,2015,23(3):469-475.
- [4] LIU S, LI Y R, SI W, et al. Complete chloroplast genome sequence of *Oxytropis glabra* (Leguminosae)[J]. Mitochondrial DNA Part B, 2021, 6(9): 2478-2479.
- [5] 王美怡,司访.宁夏小花棘豆种子萌发试验研究[J].种子,2014,33(3):63-66.
- [6] 吾买尔·吾守,严杜建,吴晨晨,等.新疆塔里木河中下游天然草原小花棘豆危害调查与防除试验[J].黑龙江畜牧兽医,2018(5):159-161.
- [7] 王硕,陶大勇,刘强,等.小花棘豆的化学成分与药理作用研究进展[J].动物医学进展,2019,40(10):104-107.
- [8] HE W, GUO B, FAN P H, et al. *In vitro* propagation of a poisonous plant *Oxytropis glabra* (Lam.) DC. [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2015, 120: 49-55.
- [9] 王帅,贾琦珍,矫继峰,等.小花棘豆中毒对家兔睾丸细胞凋亡及 Bcl-2、Bax 表达的影响[J].中国兽医学报,2017,37(1):148-153.
- [10] TAKEDA S, TANAKA H, SHIMADA A, et al. Cerebellar ataxia suspected to be caused by *Oxytropis glabra* poisoning in western Mongolian goats[J]. Journal of Veterinary Medical Science, 2014, 76(6): 839-846.
- [11] PIGLIUCCI M, MURREN C J, SCHLICHTING C D. Phenotypic plasticity and evolution by genetic assimilation[J]. The Journal of Experimental Biology, 2006, 209: 2362-2367.
- [12] 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(1): 155.
- [13] 张赆齐,董宁光,郝艳宾,等.109份丰产核桃单株坚果表型多样性分析及性状评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(3):87-96.
- [14] 郝苑汝,申建国,王相媛,等.陕西主要核桃品种(优系)坚果品质综合分析[J].江苏农业科学,2023,51(5):162-171.
- [15] 杨磊,贾平平,靳娟,等.118个枣品种表型性状多样性分析[J].植物资源与环境学报,2023,32(1):50-60.
- [16] 王红娟,於春,江本利,等.夏播106份藜麦资源的表型多样性分析[J].江苏农业科学,2023,51(19):50-56.
- [17] 王艳平,潘红,吴燕,等.基于表型性状和 KASP 标记的玉米 DUS 测试品种的聚类分析[J].江苏农业学报,2022,38(5):1171-1178.
- [18] DUBE S P, SIBIYA J, KUTU F. Genetic diversity and population structure of maize inbred lines using phenotypic traits and single nucleotide polymorphism (SNP) markers[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 17851.
- [19] 聂华月,高吉喜.退化草地杂草生态影响及蔓延机制研究进展[J].中国草地学报,2022,44(7):101-113.
- [20] 何恒流.中国北方野生毛樱桃遗传多样性和居群遗传结构的 SSR 分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2015:1-8.
- [21] 岳茂峰,辛国荣,冯莉.华南地区三点金种质资源调查及形态学变异研究[J].草地学报,2010,18(2):263-267.
- [22] QIAO D, CHEN Y, DENG H, et al. Genetic variation among three species of genus *Erythroculter*[J]. Inland Water Biology, 2023, 16(6): 1122-1133.
- [23] 郭正刚,梁天刚,刘兴元,等.新疆阿勒泰地区草地类型及植物多样性的研究[J].西北植物学报,2003,23(10):1719-1724.
- [24] 丁柳丽,刘露,邹定辉.不同温度与 CO₂ 浓度对坛紫菜生长和光合作用温度反应特性的影响[J].生态科学,2013,32(2):151-157.
- [25] 杨佳鹤,何进宇,刘飞杨,等.不同土壤水分对植物光合作用的影响研究进展[J].节水灌溉,2023(11):39-46.
- [26] 佟珂珂,徐慧,李文博,等. NaCl 胁迫对藏川杨幼苗光合作用及部分生理指标的影响[J].高原农业,2023,7(1):67-75.
- [27] 王可辉,武迪,王淑红,等.根际氧环境与盐胁迫对小麦苗期形态和生理特性的影响[J].山东农业科学,2023,55(6):53-61.
- [28] 钟云鹏,梁丽建,何丽斯,等.盐胁迫对 2 种石蒜属植物叶片生理特性的影响[J].江苏农业科学,2011,39(2):252-255.
- [29] 李晓雅,赵翠珠,程小军,等.盐胁迫对亚麻茅幼苗生理生化指标的影响[J].西北农业学报,2015,24(4):76-83.
- [30] 冯云,张韞,范少辉,等.12种种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.
- [31] 郝丙青,张幸,屈艳,等.越南油茶种实表型性状多样性分析及其与环境因子的关系[J].植物资源与环境学报,2023,32(4):33-43.
- [32] 李东宝,吴敏,余蓉,等.不同种源麻竹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,2023,32(5):39-50.
- [33] 王林,李海波,陈汉鑫,等.海拔高度对中国沙棘水碳代谢和生长的影响:以关帝山区为例[J].生态学报,2023,43(5):1995-2004.
- [34] NYBOM H. Comparison of different nuclear DNA markers for estimating intraspecific genetic diversity in plants[J]. Molecular Ecology, 2004, 13: 1143-1155.

(责任编辑:佟金凤)