

DOI:10.11686/cyxb2024149

http://cyxb.magtech.com.cn

胡鹏飞, 叶雨浓, 王通锐, 等. 紫花苜蓿半同胞家系农艺性状的遗传变异分析. 草业学报, 2025, 34(3): 85—96.

HU Peng-fei, YE Yu-nong, WANG Tong-rui, et al. Analysis of genetic variation in agronomic of half-sib families of *Medicago sativa*. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 85—96.

紫花苜蓿半同胞家系农艺性状的遗传变异分析

胡鹏飞^{1,3}, 叶雨浓^{1,3}, 王通锐^{1,3}, 王晶^{1,3}, 王星^{1,3}, 伏兵哲^{1,2,3,4}, 高雪芹^{1,2,3*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站, 宁夏 盐池 751500; 4. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要:通过对紫花苜蓿的35个半同胞家系农艺性状的调查,在分析家系间农艺性状遗传变异的基础上进行家系选择,推进紫花苜蓿的良种选育。结果表明:各性状变异在不同家系间都达到极显著水平;不同性状间的变异系数为5.24%~33.18%;广义遗传力、家系遗传力和遗传进度分别为0.05%~69.04%、1.07%~72.90%和0~20.08;株高、茎粗、分枝数与鲜草产量极显著相关,分枝数与干草产量和种子产量显著相关,不同茬次间除鲜干比和茎叶比外均显著相关;根据隶属函数综合评价,筛选出FM₂₂、FM₇、FM₁₅、FM₁这4个优良家系,入选家系的株高、茎粗、分枝数、鲜草产量、干草产量、鲜干比、茎叶比和种子产量的平均遗传增益分别为3.78%、0.43%、10.21%、1.08%、4.82%、-0.16%、-0.27%、9.36%。35个半同胞家系各性状间存在较大的遗传变异,有较大的改良潜力,初步筛选出的优良家系可以为紫花苜蓿的良种选育提供理论基础。

关键词:紫花苜蓿;半同胞家系;农艺性状;遗传变异;遗传增益

Analysis of genetic variation in agronomic of half-sib families of *Medicago sativa*

HU Peng-fei^{1,3}, YE Yu-nong^{1,3}, WANG Tong-rui^{1,3}, WANG Jing^{1,3}, WANG Xing^{1,3}, FU Bing-zhe^{1,2,3,4}, GAO Xue-qin^{1,2,3*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Northern Yanchi Desert Steppe Observation and Research Station of Ningxia, Yanchi 751500, China; 4. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China

Abstract: Through the investigation of agronomic traits of 35 half-sibling families of *Medicago sativa*, the genetic variation of agronomic traits among families was analyzed, in order to make informed decisions on likely gain in the breeding of alfalfa varieties. It was found that there was very significant variation in traits among the different families. The coefficient of variation among different traits ranged from 5.24%—33.18%. Generalized heritability, family heritability and genetic progress were, respectively, 0.05%—69.04%, 1.07%—72.90% and 0—20.08. Plant height, stem diameter and branch number were significantly correlated with fresh herbage yield; the number of branches was significantly correlated with hay yield and seed yield; there was a significant correlation between different stubble measures, except for the ratio of fresh:dry and the ratio of stem:leaf. Using membership function multivariate analysis, four elite families, (designated FM₂₂, FM₇, FM₁₅ and FM₁), were identified, and the average

收稿日期:2024-04-29;改回日期:2024-07-15

基金项目:宁夏农业育种专项和宁夏适生饲草新品种选育与良种繁育(2019NYYZ04)资助。

作者简介:胡鹏飞(1998—),男,河南三门峡人,在读硕士。E-mail: 13653989263@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qinqin_803@sina.com

genetic gains for plant height, stem diameter, branch number, fresh grass yield, hay yield, fresh-to-dry ratio, stem-leaf ratio and seed yield of the selected families were, respectively, 3.78%, 0.43%, 10.21%, 1.08%, 4.82%, -0.16%, -0.27% and 9.36%, respectively. There was a large genetic variation among the traits of the 35 half-sibling families, and there was a large potential for improvement. The elite families initially identified provide a germplasm resource for ongoing breeding improvement of alfalfa.

Key words: alfalfa; half-sib progeny; agronomic traits; genetic variation; genetic gains

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)被誉为“牧草之王”,具有较高的营养价值且适应性较强,还能够提高土地肥力^[1-2]。紫花苜蓿的种植对畜牧业的可持续发展以及对饲草资源的高效利用都有重要的战略意义,苜蓿产业已经成为饲草发展的重要组成部分。

紫花苜蓿虽然有较高的营养价值、对土壤环境有很大益处,但是产量遗传进步率低,影响苜蓿经济的可持续性发展^[3]。育种投资小、选择周期长、无法选择真正大基因型和环境互作的杂交种等是影响紫花苜蓿产量的重要因素^[4]。因此目前大多数学者对紫花苜蓿的研究主要在产量和质量上^[5],同时也在分子层面对紫花苜蓿育种做了很多研究^[6-7]。目前,我国苜蓿多采用选择育种、杂交育种、雄性不育系育种、航天育种等多种育种方法^[8-10]。选择育种是存优去劣,从自然或者人为培育的群体中选择具有优良性状和符合育种目标的基因型,并使其稳定遗传下去。选择育种有混合选择和轮回选择两种方法。混合选择育种是直接根据性状表现进行选择,工作简单,节省时间和经费,选择进程快^[11-12]。为培育高产、稳定遗传的紫花苜蓿,本研究采用混合选择法,以12种紫花苜蓿的35个半同胞家系为材料,计算生长性状的遗传参数,筛选出表现优良的家系,为紫花苜蓿的遗传改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地概况

本试验共35个家系,分别来自阿尔冈金、陇东苜蓿、甘农2号、甘农4号、中苜1号、宁苜1号、金皇后、三得利、CW301、CW200、敖汉、河西苜蓿12个品种的优秀单株,并将它们编号为FM₁~FM₃₅,如表1所示。

表1 各家系来源

Table 1 Origins of various families

家系 Family	材料来源 Source of materials	家系 Family	材料来源 Source of materials
FM ₁ 、FM ₁₃ 、FM ₂₅	阿尔冈金 Algonquin	FM ₇ 、FM ₁₉ 、FM ₃₁	金皇后 Golden impress
FM ₂ 、FM ₁₄ 、FM ₂₆	陇东苜蓿 Longdong	FM ₈ 、FM ₂₀ 、FM ₃₂	三得利 Sanditi
FM ₃ 、FM ₁₅ 、FM ₂₇	甘农2号 Gannong No. 2	FM ₉ 、FM ₂₁ 、FM ₃₃	CW301
FM ₄ 、FM ₁₆ 、FM ₂₈	甘农4号 Gannong No. 4	FM ₁₀ 、FM ₂₂ 、FM ₃₄	CW200
FM ₅ 、FM ₁₇ 、FM ₂₉	中苜1号 Zhongmu No. 1	FM ₁₁ 、FM ₂₃ 、FM ₃₅	敖汉 Aohan
FM ₆ 、FM ₁₈ 、FM ₃₀	宁苜1号 Ningmu No. 1	FM ₁₂ 、FM ₂₄	河西苜蓿 Hexi

本试验在宁夏大学盐池四墩子教学科研基地进行。试验区位于宁夏东部,毛乌素沙地西南缘(107°17' E, 37°46' N),海拔1436 m,年平均气温7.7℃,极端最高气温39.3℃,极端最低气温-28.9℃,≥10℃的年积温为2950℃,无霜期162 d,年均日照时数2876 h,年均降水量289 mm,主要集中在6-9月,年蒸发量2690 mm,具有较好的光热条件和较高的光温生产潜力,是我国牧草种子生产的黄金地带之一。试验地土壤为黄绵土,0~60 cm土层土壤平均全氮含量为0.51 g·kg⁻¹,碱解氮含量为19.8 mg·kg⁻¹,全磷含量为0.49 g·kg⁻¹,有效磷含量为13.97 mg·kg⁻¹,全钾含量为0.51 g·kg⁻¹,速效钾含量为9.87 mg·kg⁻¹,有机质含量为0.51 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计与指标测定

35个优良株系的半同胞后代单株种子播种采用随机区组设计,每个株系后代种子播种一行,行长4 m,行距0.3 m,重复3次。2021年播种,播量为 $0.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,均为条播,2023年进行数据测量,6月2日取第1茬,7月19日取第2茬,8月31日取第3茬。

每个家系及重复随机挑选3株,测量以下性状:株高:用卷尺测量每株苜蓿根茎部到主茎顶端的垂直高度。茎粗:用游标卡尺测量其根茎部直径。每个家系及重复随机挑选3个1 m样段,测量以下性状:分枝数:人工数出分枝数。鲜重:刈割并留茬5 cm,称量得到鲜重。干重:将样本在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青2 h,再于 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干24 h至恒重,称量得到干重。鲜干比:通过鲜重/干重计算得出。鲜草产量和干草产量:根据鲜重换算得到鲜草产量,根据干重换算得到干草产量。茎叶比:将烘干的样本茎叶分离分别称重,通过茎重/叶重计算得到。种子产量:收获种子称重再换算得到。

1.3 数据处理

利用Data Processing System (DPS)对各性状进行单因素方差分析,对差异显著性状的方差成分、广义遗传力以及遗传进度等进行计算,对不同性状及茬次进行相关性分析。

描述性统计:统计了各性状的最大值、最小值、极差、平均值、标准差、变异幅度、变异系数以及Shannon-wiener多样性指数(H')。

变异系数(coefficient of variation, CV),公式为^[13]:

$$CV = \sigma/\mu \times 100\%$$

式中:CV是某一性状的表型变异系数, σ 表示某一性状的标准差, μ 表示某一性状的总体平均值。

多样性指数(H'),公式为^[14]:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

式中: P_i 为某一性状第*i*个级别出现的频率,将每个性状分为10个级别, $X < \mu - 2 \times \sigma$ 为第1级,每一级增加 0.5σ , $X > \mu + 2 \times \sigma$ 为第10级, σ 表示某一性状的标准差, μ 表示某一性状的总体平均值。

遗传参数估算:对各性状进行方差分析,对*F*值检验达到显著的性状进行参数估算,采用了完全随机区组设计单因素方差分析模型估算了遗传方差(σ_g^2)、环境方差(σ_e^2)、表型方差(σ_p^2)、表型遗传系数(CV_p)、遗传变异系数(CV_g)以及家系遗传力(h_F^2),来揭示群体间的变异,计算模型如表2所示。

试验采用Syukur等^[15]的方法来估算 σ_g^2 、 σ_e^2 、 σ_p^2 、 CV_p 、 CV_g ,其中 \bar{X} 为某一性状的群体平均值,遗传方差(σ_g^2)= $(MS_a - MS_e)/r$ 、环境方差(σ_e^2)= MS_e 、表型方差(σ_p^2)= $\sigma_e^2 + \sigma_g^2/r$ (*r*为重复次数)、表型遗传系数(CV_p)= $\sqrt{\sigma_p^2}/\bar{X}$ 、遗传变异系数(CV_g)= $\sqrt{\sigma_g^2}/\bar{X}$ 。

各性状的家系遗传力(h_F^2)公式为^[16]:

$$h_F^2 = (MS_a - MS_e)/MS_a \times 100\%$$

式中: h_F^2 为家系遗传力, MS_a 为处理间均方, MS_e 为处理内均方。

广义遗传力和遗传进度:广义遗传力参照Allard^[17]的方法进行计算,公式为 $h^2 = (\sigma_g^2/\sigma_p^2) \times 100\%$;遗传进度(genetic advance, GA)和相对遗传进度(relative genetic advance, RGA)参照Johnson等^[18]的方法进行计算,公式为 $GA = K \times \sigma_p \times h^2$ 和 $RGA = GA/\bar{X} \times 100\%$,式中: h^2 为广义遗传力; σ_p 为性状表型标准差; \bar{X} 为性状的平均值;*K*为选择强度(本试验采用5%的选择率,*K*值为2.06)。

采用隶属函数综合评价对各家系进行综合评定,公式^[19]为:

$$U^+(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$U^-(X_i) = 1 - U^+(X_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

表2 方差分析模型

Table 2 Variance analysis model

方差来源	自由度	均方	期望均方
Source of variation	Degree of freedom	Mean square	Expected mean square
重复 Replication	$r-1$		
材料 Material	$n-1$	MS_a	$\sigma_e^2 + r\sigma_g^2$
误差 Error	$(r-1)(n-1)$	MS_e	σ_e^2

式中: $U(X_i)$ 表示综合评定值, X_i 表示第 i 个指标, X_{\max} 表示第 i 个指标的最大值, X_{\min} 表示第 i 个指标的最小值。

遗传增益^[20]:

$$\Delta G = \frac{h_F^2 S_i}{\bar{X}}$$

式中: h_F^2 为性状的家系遗传力, S_i 为性状的选择差, \bar{X} 为性状的总体平均值。

2 结果与分析

2.1 各性状方差分析以及描述性分析

35 个家系各性状的方差分析结果见表 3。结果显示, 各性状不同茬次在不同家系间均达到了极显著差异水平 ($P < 0.01$), 说明家系间的遗传变异大, 家系选择潜力较大。

表 3 各性状方差分析

Table 3 Variance analysis of each traits

性状 Traits	茬次 Cuts	变异来源 Variance source	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	显著性 Statistical significance
株高 Plant height	I	家系 Family	34	351.77	2.70	$P < 0.01$
	II	家系 Family	34	228.22	3.69	$P < 0.01$
	III	家系 Family	34	211.88	3.26	$P < 0.01$
茎粗 Stem diameter	I	家系 Family	34	0.37	1.16	$P < 0.01$
	II	家系 Family	34	0.80	1.97	$P < 0.01$
	III	家系 Family	34	0.31	2.25	$P < 0.01$
分枝数 Number of branches	I	家系 Family	34	5935.36	1.47	$P < 0.01$
	II	家系 Family	34	5796.52	1.72	$P < 0.01$
	III	家系 Family	34	3516.55	1.38	$P < 0.01$
鲜干比 Fresh-dry ratio	I	家系 Family	34	0.35	1.01	$P < 0.01$
	II	家系 Family	34	0.33	1.07	$P < 0.01$
	III	家系 Family	34	0.23	1.16	$P < 0.01$
茎叶比 Stem-to-leaf ratio	I	家系 Family	34	0.09	1.09	$P < 0.01$
	II	家系 Family	34	0.10	2.12	$P < 0.01$
	III	家系 Family	34	0.03	2.34	$P < 0.01$
鲜草产量 Fresh yield	I	家系 Family	34	31.67	0.90	$P < 0.01$
	II	家系 Family	34	15.14	0.90	$P < 0.01$
	III	家系 Family	34	9.55	1.72	$P < 0.01$
干草产量 Dry yield	I	家系 Family	34	3.86	0.95	$P < 0.01$
	II	家系 Family	34	2.01	0.98	$P < 0.01$
	III	家系 Family	34	0.03	1.78	$P < 0.01$
鲜草产量 Fresh yield	总产量 Total yield	家系 Family	34	141.93	1.09	$P < 0.01$
干草产量 Dry yield	总产量 Total yield	家系 Family	34	11.64	1.03	$P < 0.01$
种子产量 Seed yield	总产量 Total yield	家系 Family	34	41295.01	1.21	$P < 0.01$

注: I、II、III 代表第 1 茬、第 2 茬、第 3 茬, 下同。

Note: I, II, III represent the first crop, the second crop, the third crop, the same below.

对 35 份供试材料 3 茬农艺性状以及种子产量的统计分析表明(表 4): 各统计量在不同性状间存在较大的差异, 变异系数为 5.24%~33.18%, 平均值为 0.40~353.62。在这些性状中 1、2、3 茬分枝数的变异系数、总鲜草产量、总干草产量以及种子产量的变异系数较大, 分别为 23.98%、23.93%、19.44%、17.26%、17.52% 和 33.18%。

变异系数较小的性状为茎粗第1茬(5.24%)、第3茬(5.63%)。种子产量为177.32~672.63 kg·hm⁻²,平均值为353.62 kg·hm⁻²;第1茬茎粗为3.44~4.22 mm,平均值为3.85 mm,说明该性状遗传特性稳定,一般变异系数大于10%说明样本间差异较大^[21]。各性状的Shannon—wiener多样性指数(H')为1.47~2.05。其中茎粗第1茬、茎叶比第2茬、第3茬以及总鲜草产量的多样性指数较大,为2.02、2.05、2.05和2.02,表明这些性状有较高的遗传多样性和分布均衡性,鲜干比第1和2茬的多样性指数较小,为1.47、1.53,表明其分布较为集中。

表4 各性状描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of each trait

性状 Traits	茬次 Cuts	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (CV, %)	多样性指数 Genetic diversity index (H')
株高 Plant height (cm)	I	94.11	69.22	24.89	85.45	6.25	7.32	1.81
	II	75.22	56.56	18.66	68.28	5.04	7.38	1.82
	III	75.67	56.89	18.78	68.37	4.85	7.10	1.88
茎粗 Stem diameter (mm)	I	4.22	3.44	0.78	3.85	0.20	5.24	2.02
	II	4.16	2.74	1.42	3.42	0.30	8.71	1.98
	III	3.57	2.93	0.64	3.27	0.18	5.63	1.93
分枝数 Number of branches (No. · m ⁻¹)	I	271.00	94.00	177.00	185.50	44.48	23.98	1.93
	II	269.33	85.00	184.33	183.68	43.96	23.93	1.99
	III	240.00	105.00	135.00	176.13	34.24	19.44	1.94
鲜干比 Fresh-dry ratio	I	4.63	2.42	2.21	2.96	0.34	11.62	1.47
	II	4.50	2.33	2.17	2.92	0.33	11.40	1.53
	III	4.01	2.54	1.47	3.04	0.28	9.12	1.76
茎叶比 Stem-to-leaf ratio	I	1.59	0.86	0.73	1.21	0.18	14.64	1.91
	II	1.50	0.83	0.67	1.20	0.18	14.92	2.05
	III	1.04	0.71	0.33	0.87	0.08	9.24	2.05
鲜草产量 Fresh yield (t·hm ⁻²)	I	24.51	10.66	13.85	18.31	3.25	17.74	2.00
	II	17.43	7.26	10.17	13.20	2.25	17.05	1.85
	III	12.47	4.84	7.63	8.35	1.78	21.31	2.01
干草产量 Dry yield (t·hm ⁻²)	I	8.23	3.23	5.00	6.26	1.13	18.05	1.97
	II	6.15	2.22	3.93	4.58	0.82	16.94	2.00
	III	0.72	0.25	0.47	0.40	0.10	25.00	1.89
鲜草产量 Fresh yield (t·hm ⁻²)	总产量 Total yield	53.12	23.23	29.89	39.86	6.88	17.26	2.02
干草产量 Dry yield (t·hm ⁻²)	总产量 Total yield	14.74	5.70	9.04	11.24	1.97	17.52	1.99
种子产量 Seed yield (kg·hm ⁻²)	总产量 Total yield	672.63	117.32	555.31	353.62	117.32	33.18	1.95

2.2 各性状遗传参数分析

遗传力是亲本遗传给后代的一种能力,进行后代选择时,与广义遗传力有很大关系。以35份紫花苜蓿半同胞家系3茬性状的方差分析为基础,对引起家系间变异的主要因素进行方差分析和遗传参数的估算。结果表明(表5):35份紫花苜蓿各性状遗传方差和遗传变异系数均小于表型方差和表型变异系数,说明这些性状不仅是由遗传因素决定的,还受环境因素的影响。茎粗和分枝数表型变异系数的均值分别为15.44%和32.42%,均大于株高的均值,分枝数的遗传变异系数均值大于株高的遗传变异系数,说明苜蓿不同茬次横向生长的遗传变异程度较纵向生长的遗传变异高,差异更加丰富,对茎粗和分枝数进行选择的价值相对于株高也更大。鲜草产量、鲜干比、茎叶比以及种子产量的表型遗传系数均高于株高、茎粗,说明鲜草产量和种子产量的选择潜力更大。

表5 各性状遗传变异参数

Table 5 Genetic variation parameters of each trait

性状 Traits	茬次 Cuts	遗传方差 Genetic variation (σ_g^2)	表型方差 Phenotypic variance (σ_p^2)	表型变异系数 Phenotypic co- efficients of variation ($CV_p, \%$)	遗传变异系数 Genetic coeffi- cients of varia- tion ($CV_g, \%$)	广义遗传力 Broad-sense heritability ($h^2, \%$)	家系遗 传力 Family heritability ($h_F^2, \%$)	遗传进度 Genetic advance (GA)	相对遗传 进度 Rela- tive genetic advance (RGA, %)
株高 Plant height	I	73.79	155.00	14.57	10.05	47.61	62.93	6.13	7.18
	II	55.46	80.33	13.13	10.91	69.04	72.90	7.16	10.49
	III	48.97	81.29	13.19	10.23	60.25	69.34	6.02	8.81
茎粗 Stem diameter	I	0.02	0.32	14.71	3.38	5.28	13.88	0.02	0.57
	II	0.13	0.45	19.59	10.59	29.21	49.26	0.18	5.24
	III	0.06	0.15	12.02	7.28	36.68	55.62	0.14	4.26
分枝数 Number of branches	I	629.00	4258.04	35.18	13.52	14.77	31.79	13.54	7.30
	II	807.84	3642.27	32.86	15.47	22.18	41.81	20.08	10.93
	III	325.42	2648.78	29.22	10.24	12.29	27.76	8.66	4.92
鲜干比 Fresh-dry ratio	I	0.00	0.35	20.04	1.20	0.36	1.07	0.00	0.09
	II	0.01	0.31	19.13	2.97	2.41	6.80	0.02	0.57
	III	0.01	0.20	14.83	3.42	5.33	14.00	0.03	1.00
茎叶比 Stem-to-leaf ratio	I	0.00	0.09	24.29	4.26	3.07	8.52	0.01	0.93
	II	0.02	0.05	18.81	10.82	33.10	52.74	0.12	10.17
	III	0.01	0.02	14.34	8.94	38.83	57.23	0.06	7.39
鲜草产量 Fresh yield	I	6.26	25.54	27.59	13.66	24.51	44.47	1.64	8.96
	II	2.99	12.21	26.46	13.09	24.48	44.41	1.13	8.58
	III	3.02	4.70	25.95	20.80	64.22	71.04	2.36	28.28
干草产量 Dry yield	I	0.82	2.96	27.48	14.42	27.55	47.59	0.64	10.28
	II	0.44	1.51	26.78	14.43	29.05	49.06	0.49	10.68
	III	0.01	0.01	28.61	23.53	67.64	71.78	0.13	33.64
鲜草产量 Fresh yield	总产量 Total yield	3.75	131.95	24.40	4.11	2.84	7.92	0.40	0.85
干草产量 Dry yield	总产量 Total yield	0.11	11.34	7.16	0.71	0.97	2.85	0.04	0.08
种子产量 Seed yield	总产量 Total yield	2386.68	34930.52	52.85	13.82	6.83	17.34	16.51	4.67

遗传力表明性状受到遗传控制的程度,为0~1,等于1时表示表型变异完全由基因决定,等于0时表示表型变异由环境造成。这些性状的广义遗传力为0.36%~69.04%,株高3茬广义遗传力的平均值大于40%,按照孙铭等^[22]的分级方法,遗传力处于较高水平。株高3茬的家系遗传力均超过了40%,分别达到了62.93%、72.90%、69.34%,受较强的遗传控制,鲜干比1、2茬、茎叶比第1茬、总鲜草产量和总干草产量的家系遗传力较小,分别为1.07%、6.80%、8.52%、7.92%、2.85%。

生长性状早期遗传进度(GA)和相关遗传进度(RGA)是确定早期选择的主要依据,一般认为遗传进度大,更适合作为选择,RGA是衡量性状潜力的重要指标,RGA越大说明该性状改良潜力越大。本试验在5%选择率下计算GA和RGA,总鲜草产量的相对遗传进度为0.85%,遗传进度为0.40 t·hm⁻²。株高第2茬的广义遗传力大于40%且相对遗传进度大于10%,说明该性状可以在早期进行选择且具有较好的改良效果。茎粗、鲜干比和干草产量3茬的遗传进度较低,茎粗和鲜干比的相对遗传进度也较低,说明该性状直接选择效果差,获得遗传增量有限。

2.3 不同性状间的相关性分析

不同性状间的相关性见图 1。结果表明除种子产量与茎粗、鲜干比、茎叶比间,以及干草产量与鲜干比之间没有相关性外,其他性状之间均呈显著正相关($P<0.05$)。比较发现鲜草产量与干草产量的相关系数最大,为 0.91。株高和茎粗与鲜草产量的相关系数分别为 0.50、0.09,均小于分枝数与鲜草产量的相关系数,说明与株高、茎粗相比,分枝数和鲜草产量的相关性更紧密。株高与茎粗、分枝数、鲜草产量和茎叶比呈极显著相关($P<0.01$),分枝数与鲜草产量、干草产量极显著相关($P<0.01$),分枝数与种子产量显著相关($P<0.05$)。由此可见苜蓿越高,茎粗和分枝数就越大,鲜草产量也越大,干草产量也越大;分枝数越多,种子产量越高。

2.4 不同茬次紫花苜蓿性状间的相关性

不同茬次紫花苜蓿株高、茎粗、分枝数、鲜草产量、干草产量、鲜干比和茎叶比的皮尔逊相关分析表明(表 6),除茎叶比第 1、2 茬与第 3 茬没有显著相关性外,其余各性状 3 茬之间均有显著相关性,且除了鲜干比第 1、2 茬与第 3 茬未达到极显著相关外,其余各性状 3 茬之间的相关性均达到了极显著水平。

表 6 不同茬次性状间的相关系数

Table 6 Correlation coefficient of different stubble traits

茬次 Stubbles	株高 Plant height			茎粗 Stem diameter			分枝数 Number of branches			鲜干比 Fresh-dry ratio		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
I	1.00	0.97**	0.99**	1.00	0.70**	0.97**	1.00	0.96**	0.84**	1.00	0.91**	0.34
II	0.97**	1.00	0.97**	0.70**	1.00	0.63**	0.96**	1.00	0.88**	0.91**	1.00	0.24
III	0.99**	0.97**	1.00	0.97**	0.63**	1.00	0.84**	0.88**	1.00	0.34	0.24	1.00
茬次 Stubbles	茎叶比 Stem-to-leaf ratio			鲜草产量 Fresh yield			干草产量 Dry yield					
	I	II	III	I	II	III	I	II	III			
I	1.00	0.85**	-0.05	1.00	0.93**	0.73**	1.00	0.89**	0.60**			
II	0.85**	1.00	-0.19	0.93**	1.00	0.81**	0.68**	1.00	0.68**			
III	-0.05	-0.19	1.00	0.73**	0.81**	1.00	0.89**	0.60**	1.00			

注: *表示显著性相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * represents significant correlation ($P<0.05$); ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.5 聚类分析

对 35 个紫花苜蓿家系进行聚类分析(图 2),共分为 5 类。将每个类群的信息都归类如表 7 所示,类群 A 包括 FM₁、FM₃、FM₄、FM₅、FM₁₀、FM₁₁、FM₁₂、FM₁₃、FM₁₄、FM₁₆、FM₁₇、FM₁₈、FM₁₉、FM₂₀、FM₂₄、FM₂₅、FM₂₆、FM₂₇、FM₂₈、FM₂₉、FM₃₀、FM₃₁、FM₃₅;类群 B 为 FM₆、FM₂₁;类群 C 包括 FM₂、FM₇、FM₈、FM₉、FM₁₅、FM₂₂;类群 D 为 FM₃₂;类群 E 为 FM₃₃、FM₃₄。类群 A 各性状指标表现均较为均衡;类群 B 株高、茎粗、分枝数、鲜草产量、鲜干比以及茎叶比均较大;类群 C 干草产量和种子产量较大,可以作为高产和扩繁的种质材料;类群 D 和类群 E 各性状指标表现均比较差。

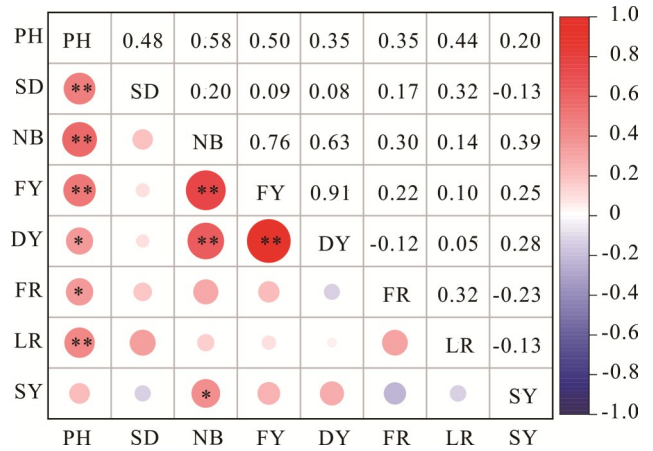


图 1 不同性状间的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of different traits

PH: 株高 Plant height; SD: 茎粗 Stem diameter; NB: 分枝数 Number of branches; FY: 鲜草产量 Fresh yield; DY: 干草产量 Dry yield; FR: 鲜干比 Fresh-dry ratio; LR: 茎叶比 Stem-to-leaf ratio; SY: 种子产量 Seed yield. 下同 The same below. *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$). * represents significant correlation ($P<0.05$); ** represents extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.6 家系的隶属函数综合评价

将35个家系的株高、茎粗、分枝数、鲜草产量、干草产量、鲜干比、茎叶比和种子产量作为评价指标进行综合评定,选择性状表现优良的家系。各家系的综合评价价值见表8,以10%的入选率进行选择,排名前4的家系分别是FM₂₂、FM₁₅、FM₇、FM₁,被选为性状表现优良的家系。如表9所示参试家系的株高、茎粗、分枝数、鲜草产量、干草产量、鲜干比、茎叶比和种子产量的总体均值为74.03 cm、3.51 mm、181.77个·m⁻¹、39.86 t·hm⁻²、11.24 t·hm⁻²、2.97、1.05、353.62 kg·hm⁻²,入选家系的株高、茎粗、分枝数、鲜草产量、干草产量、鲜干比、茎叶比和种子产量的平均值为78.12 cm、3.55 mm、236.69个·m⁻¹、45.75 t·hm⁻²、12.61 t·hm⁻²、2.91、0.95、544.41 kg·hm⁻²,遗传增益分别为

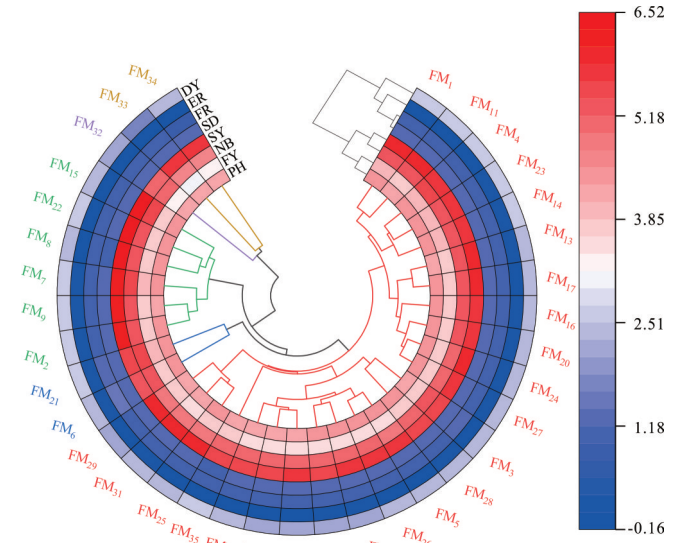


图2 35个苜蓿半同胞家系聚类热图
Fig. 2 Cluster heat map of 35 alfalfa half-sib families

表7 35个苜蓿半同胞家系的性状分布

Table 7 Distribution of traits of 35 alfalfa half-sib families

性状 Trait	类群 Groups				
	A	B	C	D	E
株高 Plant height (cm)	74.14	78.24	76.43	68.30	64.24
茎粗 Stem diameter (mm)	3.51	3.70	3.46	3.64	3.53
分枝数 Number of branches (No. · m ⁻¹)	176.45	223.89	221.78	149.56	99.56
鲜草产量 Fresh yield (t·hm ⁻²)	39.98	48.42	43.73	26.10	25.18
干草产量 Dry yield (t·hm ⁻²)	11.23	12.37	12.51	7.97	8.11
鲜干比 Fresh-dry ratio	2.96	3.73	2.88	2.71	2.79
茎叶比 Stem-to-leaf ratio	1.09	1.23	1.07	1.04	1.05
种子产量 Seed yield (kg·hm ⁻²)	325.73	219.08	560.95	177.96	288.70

表8 不同家系隶属函数综合评价价值

Table 8 The comprehensive evaluation values of different families

家系 Family	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排名 Ranking	家系 Family	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排名 Ranking	家系 Family	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排名 Ranking	家系 Family	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排名 Ranking
FM ₂₂	0.79	1	FM ₁₁	0.62	10	FM ₃₅	0.53	19	FM ₂₉	0.44	28
FM ₁₅	0.75	2	FM ₁₆	0.62	11	FM ₅	0.53	20	FM ₁₂	0.43	29
FM ₇	0.74	3	FM ₂₀	0.62	12	FM ₂₇	0.53	21	FM ₃₁	0.43	30
FM ₁	0.72	4	FM ₈	0.61	13	FM ₂₆	0.51	22	FM ₃₀	0.41	31
FM ₂	0.66	5	FM ₂₄	0.59	14	FM ₃	0.50	23	FM ₃₄	0.40	32
FM ₂₁	0.66	6	FM ₂₅	0.55	15	FM ₁₈	0.48	24	FM ₃₂	0.39	33
FM ₁₄	0.66	7	FM ₉	0.55	16	FM ₁₃	0.47	25	FM ₁₉	0.39	34
FM ₄	0.66	8	FM ₂₈	0.55	17	FM ₁₀	0.44	26	FM ₃₃	0.27	35
FM ₂₃	0.64	9	FM ₁₇	0.54	18	FM ₆	0.44	27			

表9 优良家系各性状的遗传增益

Table 9 Genetic gain of each trait in superior families

家系 Family	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diame- ter (mm)	分枝数 Number of branch- es (No. · m ⁻¹)	鲜草产量 Fresh yield (t · hm ⁻²)	干草产量 Dry yield (t · hm ⁻²)	鲜干比 Fresh-dry ra- tio	茎叶比 Stem-to-leaf ratio	种子产量 Seed yield (kg · hm ⁻²)
FM ₂₂	77.43	3.75	215.78	45.10	12.50	2.97	0.86	587.93
FM ₁₅	79.11	3.71	255.11	38.76	10.50	2.93	1.00	672.63
FM ₇	78.30	3.39	259.22	48.38	13.55	2.79	1.07	524.23
FM ₁	77.66	3.37	216.67	50.76	13.91	2.96	0.89	392.84
入选均值 Selected mean	78.12	3.55	236.69	45.75	12.61	2.91	0.95	544.41
总体均值 Population mean	74.03	3.51	181.77	39.86	11.24	2.97	1.05	353.62
遗传增益 Genetic gain (%)	3.78	0.43	10.21	1.08	4.82	-0.16	-0.27	9.36

3.78%、0.43%、10.21%、1.08%、4.82%、-0.16%、-0.27%、9.36%，入选家系的株高、茎粗和种子产量的遗传增益都是正向的，说明入选家系有较大的生产潜力。

3 讨论

基于高产苜蓿的选育方向，在宁夏盐池对12个苜蓿品种的35个家系进行了遗传检测。系统分析了7个生长性状在不同层次下的变异情况，估算了各性状的遗传参数。通过对35个家系各性状的方差分析发现，所有性状在家系间均存在极显著差异。王虹等^[23]研究发现16个株系半同胞后代的株高、分枝数、叶茎比均达到显著差异，说明苜蓿半同胞后代的生长性状变异普遍较大。分枝数、鲜草产量、干草产量、茎叶比以及种子产量的变异系数均大于10%，与李陈建等^[24]对苜蓿株高、茎粗的研究一致，与张晓娟等^[25]对苜蓿株高、分枝数、茎叶比、鲜草产量、鲜干比的研究结果一致。参试家系各性状差异显著，变异系数较大，且多样性指数均超过了1，说明这些性状有较高的遗传多样性和分布均衡性，为选育高产的苜蓿提供了可能。由于本次参试的35个家系来自12个不同苜蓿品种，因此表型性状会有较大的分化现象，分子遗传水平如何还有待进一步研究。

遗传参数估算在科学育种方案的制定和选择效果预测等方面有指导作用^[26]，其中遗传力和变异系数能够衡量亲本将性状遗传给子代的能力和选择潜力^[27]。不同茬次紫花苜蓿半同胞家系株高的广义遗传力均在40%以上，遗传力处于较高水平^[28]，与王虹等^[23]对苜蓿株高遗传力的计算结果相似，高于孙彦等^[29]的研究结果，说明株高受到遗传因素影响较大。株高各茬的广义遗传力高于孙彦等^[29]计算的株高各茬广义遗传力12.15%、40.65%、20.03%、31.89%，干草产量1、2茬和总产量的广义遗传力低于孙彦等^[29]计算得出的干草产量广义遗传力34.95%、50.42%、1.90%，以及王虹等^[23]计算得出的97.48%，可能是本研究的试验材料更多地受到环境因素的影响，导致有了较大的差异。本研究中各性状的表型遗传系数为7.16%~52.85%，家系遗传力为1.07%~72.90%，株高、茎粗的表型变异系数和家系遗传力均较高，与王朋磊等^[30]对白花草木樨(*Melilotus albus*)半同胞家系的研究结果相似，较高的变异系数和家系遗传力为优良家系的选择提供了基础。本研究中各性状的遗传变异系数均小于表型变异系数，说明这些性状受环境因素影响较大，与常巍等^[31]对无芒雀麦(*Bromus inermis*)各性状的研究结果相似。以往研究表明，遗传力不能完全作为选择效果的指标，因为亲代到子代的遗传效果会随着遗传变异的大小而发生改变^[32]。遗传进度受到遗传力和遗传变异系数两个遗传参数影响，在一定选择强度下能更加客观地判断性状选择的好坏^[33]。因此用综合遗传力和遗传进度来判断效果更好，株高、茎叶比的遗传力和遗传进度均较高，在育种选择中效果更好。

相关性分析可以反映各性状之间的联系，可以为多性状联合控制育种提供参考^[34]，本研究35个家系的株高与干草产量的相关性结果与伏兵哲等^[35]的研究相似，说明株高可以影响干草产量，还可以通过相关性选育草产量和种子产量都很高的优良家系。除此之外，还对35个家系进行了聚类分析，将其分为了5个不同类群，通过综合

指数选择,以10%的入选率选出了4个优良家系,可以作为优良种质材料推广使用。

4 结论

本研究发现紫花苜蓿35个半同胞家系的株高、茎粗等生长性状发生显著遗传变异,有较大的遗传改良潜力。株高、茎粗、分枝数、鲜干比、叶茎比、种子产量的家系遗传力较大,且遗传进度较高,具有较高水平的遗传力和较好的选择潜力。聚类分析将35个半同胞家系分为了5个类群,类群C可以作为高产和扩繁的种质材料。利用隶属函数综合评价,在35个家系中筛选出FM₂₂、FM₁₅、FM₇、FM₁这4个优良家系,为高产苜蓿育种提供了依据。

参考文献 References:

- [1] Zhang Y Y, Liu H, Zhao S G, *et al.* Study on the cross infection of *Verticillium* spp. to three Leguminous forages. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(8): 109–117.
张园园, 刘欢, 赵胜国, 等. 黄萎病菌对3种豆科牧草交互侵染性研究. 中国草地学报, 2023, 45(8): 109–117.
- [2] Tian Z, Yang Z Y, Lu Z J, *et al.* Acid-aluminum adaptability and tolerance evaluation of 44 alfalfa cultivars. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(3): 142–151.
田政, 杨正禹, 陆忠杰, 等. 44个紫花苜蓿品种的酸铝适应性与耐受性评价. 草业学报, 2023, 32(3): 142–151.
- [3] Annicchiarico P, Barrett B, Brummer E C, *et al.* Achievements and challenges in improving temperate perennial forage legumes. Critical Reviews in Plant Sciences, 2015, 34(1/2/3): 327–380.
- [4] Annicchiarico P, Pecetti L. Comparison among nine alfalfa breeding schemes based on actual biomass yield gains. Crop Science, 2021, 61(4): 2355–2370.
- [5] Zhang D, Long H Y. Evaluation of production performance and nutritional value of eight alfalfa varieties in the hot-arid zone. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(1): 70–77.
张德, 龙会英. 8个紫花苜蓿品种在干热区生产性能和营养价值评价. 中国草地学报, 2024, 46(1): 70–77.
- [6] Kong H M, Song J X, Yang J, *et al.* Identification and transcript profiling of the CAMTA gene family under abiotic stress in alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(5): 143–154.
孔海明, 宋家兴, 杨静, 等. 紫花苜蓿CAMTA基因家族鉴定及其在非生物胁迫下的表达模式分析. 草业学报, 2024, 33(5): 143–154.
- [7] Li X H, Wang X T, Ma X X, *et al.* Identification and analysis of CNGC gene family members in alfalfa. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 588–598.
李小红, 王晓彤, 麻旭霞, 等. 紫花苜蓿CNGC基因家族成员鉴定及分析. 草地学报, 2024, 32(2): 588–598.
- [8] Yang Q C, Sun Y. The history, current situation and development of alfalfa breeding in China. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(6): 95–101.
杨青川, 孙彦. 中国苜蓿育种的历史、现状与发展趋势. 中国草地学报, 2011, 33(6): 95–101.
- [9] Wang Q Q, Xie J H, Yu L Q, *et al.* Research progress and prospect of alfalfa breeding in China. Journal of Grassland and Forage Science, 2023(4): 1–7.
王旗旗, 解继红, 于林清, 等. 我国苜蓿育种研究进展及展望. 草学, 2023(4): 1–7.
- [10] Wang X, Li Z P, Sun J J, *et al.* Progress of alfalfa breeding in China. Pratacultural Science, 2014, 31(3): 512–518.
王雪, 李志萍, 孙建军, 等. 中国苜蓿品种的选育与研究. 草业科学, 2014, 31(3): 512–518.
- [11] Liu X, Hu B D, Mao J C, *et al.* A study of the effects of maize population on mass selection. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 1995, 23(4): 38–41.
刘祥, 胡必德, 毛建昌, 等. 玉米群体混合选择的效果研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1995, 23(4): 38–41.
- [12] Wei Z F, Zhang T P, Li D W, *et al.* Improvement efficiency of the characters of yield and quality by mass selection on the genic male sterile rapeseeds lines in *Brassica napus*. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 11–14.
魏忠芬, 张太平, 李德文, 等. 混合选择对油菜隐性核不育系群体产量及品质性状的改良效应. 贵州农业科学, 2012, 40(11): 11–14.
- [13] Zhuo L, Xue S, Mamtimi·Sulayman L M, *et al.* Morphological structure of *Bryum argenteum* associated with adaptation to the arid environment in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8865–8874.
卓露, 薛山, 买买提明·苏来曼, 等. 基于形态结构的新疆干旱地区真藓(*Bryum argenteum*)环境适应性研究. 生态学报, 2023, 43(21): 8865–8874.

- [14] Zhao X R, Chen X T, Xue W, *et al.* Construction of core potato germplasm resources in north hebei based on phenotypic traits. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(5): 805–818.
赵欣蕊, 陈啸天, 薛薇, 等. 基于表型性状分析构建冀北地区马铃薯核心种质. *核农学报*, 2024, 38(5): 805–818.
- [15] Syukur M, Agronomy D O. Estimation of genetic parameter for quantitative characters of pepper (*Capsicum annum L.*). *Journal of Tropical Crop Science*, 2014, 1(1): 4–7.
- [16] Chen B H, Zhang J, Liu G F, *et al.* Selection of excellent families and evaluation of selection method for pulpwood half-sibling families of *Betula platyphylla*. *Bulletin of Botanical Research*, 2023, 43(5): 690–699.
陈柄华, 张杰, 刘桂丰, 等. 白桦半同胞家系纸浆材优良家系选择及选择方法评价. *植物研究*, 2023, 43(5): 690–699.
- [17] Allard R W. *Principles of plant breeding* (6th Edition). New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [18] Johnson H W, Robinson H F, Comstock R E. Estimates of genetic and environmental variability in soybeans. *Agronomy Journal*, 1995, 47(7): 314–318.
- [19] Liu C Y, Sun Q W, Zhao Y P, *et al.* Evaluation of the nutritional value of five millets (*Setaria italica* Beauv.) varieties using grey relational analysis and membership function method. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1522–1528.
刘春阳, 孙全文, 赵月平, 等. 利用灰色关联度和隶属函数法评价5个‘张杂谷’饲草谷子品种的营养价值. *草地学报*, 2024, 32(5): 1522–1528.
- [20] Ouyang L. Test and selection of the half-sib progenies in the *Cryptomeria fortunei* seed orchards at two sites. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(3): 21–31.
欧阳磊. 柳杉种子园半同胞子代两点测定与选择. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(3): 21–31.
- [21] Sun M, Fu K X, Fan Y, *et al.* Analysis of phenotypic variations in 15 introduced elite germplasm of *Lolium multiflorum* Lam. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(4): 655–662.
孙铭, 符开欣, 范彦, 等. 15份多花黑麦草优良引进种质的表型变异分析. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(4): 655–662.
- [22] Sun M, Lei X, Zhang X Q, *et al.* Assessment of genetic variability in prairie grass. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(1): 131–141.
孙铭, 雷雄, 张新全, 等. 扁穗雀麦优良品系数量性状的变异分析及遗传参数评估. *草业学报*, 2018, 27(1): 131–141.
- [23] Wang H, Shi S L, Zhang X Y, *et al.* Determination of general combining ability and estimation of genetic parameters for yield and quality in alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3): 126–134.
王虹, 师尚礼, 张旭业, 等. 紫花苜蓿多元杂交后代产量和品质一般配合力分析及遗传参数的估算. *草业学报*, 2016, 25(3): 126–134.
- [24] Li C J, Sun Y L, Wang Y X, *et al.* Genetic diversity of agronomic traits of 50 *Medicago falcata* L. germplasm. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2022, 45(3): 173–181.
李陈建, 孙玉兰, 王玉祥, 等. 50份黄花苜蓿种质资源农艺性状的遗传多样性分析. *新疆农业大学学报*, 2022, 45(3): 173–181.
- [25] Zhang X J, Chen C J, Zhang J P, *et al.* Analysis and comprehensive valuation of agronomic and yield traits of 55 alfalfa varieties. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(11): 3453–3461.
张晓娟, 陈彩锦, 张久盘, 等. 55个紫花苜蓿品种农艺性状和产量性状分析及综合评价. *草地学报*, 2023, 31(11): 3453–3461.
- [26] Jia Q B, Liu G, Zhao J L, *et al.* Variation analyses of growth traits in half-sib families of Korean pine and superior families selection. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(4): 109–116.
贾庆彬, 刘庚, 赵佳丽, 等. 红松半同胞家系生长性状变异分析与优良家系选择. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(4): 109–116.
- [27] Yan S, Wei R P, Wang R H, *et al.* Variation and selection of half-sib families of *Falcataria falcata* during seedling stage. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2024, 41(2): 306–313.
晏姝, 韦如萍, 王润辉, 等. 南洋楹半同胞家系苗期变异及选择. *浙江农林大学学报*, 2024, 41(2): 306–313.
- [28] Yan C X, Miao T T, Liu J L, *et al.* The growth rhythm and genetic variation of the F₁ hybrid cuttings of *Populus deltoids*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(5): 39–48.
闫彩霞, 苗婷婷, 刘俊龙, 等. 杨树杂交F₁代扦插无性系苗期生长节律及遗传变异分析. *中国农学通报*, 2023, 39(5): 39–48.
- [29] Sun Y, Yang Q C, Zhang T J, *et al.* Determination of general combining ability and estimation of genetic parameters for forage yield in alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(4): 570–576.

- 孙彦, 杨青川, 张铁军, 等. 紫花苜蓿产量一般配合力分析及其遗传参数估算. 草地学报, 2011, 19(4): 570—576.
- [30] Wang P L, Yan Z Z, Gao L J, *et al.* Analysis of genetic variation in agronomic traits of half-sib families of *Melilotus albus* in the second generation of recurrent selection. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 238—245.
王朋磊, 剡转转, 高莉娟, 等. 白花草木樨第二次轮回选择半同胞家系农艺性状的遗传变异分析. 草业学报, 2022, 31(1): 238—245.
- [31] Chang W, Zhang Z Y, Huang W, *et al.* Multiple analysis on the relationship between agronomic traits and yield formation of *Bromus inermis*. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(4): 13—21.
常巍, 张则宇, 黄薇, 等. 无芒雀麦农艺性状与产量形成关系的多重分析. 中国草地学报, 2021, 43(4): 13—21.
- [32] Cui L, Fan Y Y. A preliminary study on the heritability and genetic correlation of principal characters in naked oat. *Hereditas (Beijing)*, 1986, 8(1): 18—19.
崔林, 范银燕. 莜麦主要性状遗传力和遗传相关性的初步研究. 遗传, 1986, 8(1): 18—19.
- [33] Leng R, Liu Y H, Zhang Z R, *et al.* Hereditary parameters of main quantitative characters in tumorous stem mustard (*Brassica juncea* var. *tumida* Tsen et Lee) under late sowing condition. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(2): 677—680.
冷容, 刘义华, 张召荣, 等. 茎瘤芥(榨菜)晚播条件下主要数量性状遗传参数分析. 西南农业学报, 2011, 24(2): 677—680.
- [34] Jia C H, Zhang L, Wei X, *et al.* Plus tree selection of *Litsea mollis* by principal component analysis. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2016, 39(5): 943—947.
贾春红, 张利, 魏晓, 等. 主成分分析法在毛叶木姜子优树选择中的应用. 中药材, 2016, 39(5): 943—947.
- [35] Fu B Z, Gao X Q, Gao Y F, *et al.* Correlation analysis of the main agronomic traits and performance of 21 alfalfa varieties. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(11): 174—182.
伏兵哲, 高雪芹, 高永发, 等. 21个苜蓿品种主要农艺性状关联分析与综合评价. 草业学报, 2015, 24(11): 174—182.