

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.023

引用格式:余帅,左粟田,聂刚,等.象草育种新材料产量及抗寒性综合评价[J].草地学报,2026,34(8):3004—3014

YU Shuai, ZUO Su-tian, NIE Gang, et al. Comprehensive Evaluation of Yields and Cold Resistance in New *Pennisetum purpureum* Breeding Materials[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (8):3004—3014

象草育种新材料产量及抗寒性综合评价

余 帅,左粟田,聂 刚,姜哲基,凌 瑶,张新全^{*}
(四川农业大学草业科技学院,四川 成都 611130)

摘要:为探究象草(*Pennisetum purpureum*)育种新材料产量与抗寒性状的变异规律,明确影响产量的主要性状因子,筛选高产、抗寒性强的优良材料,本研究以86份象草材料为试验对象,对其12个性状进行多样性、相关性、回归、通径、聚类及主成分分析。结果表明:供试材料各性状变异系数介于6.45%(叶长)~18.17%(返青苗数)之间,遗传多样性指数介于1.8992(株高)~2.0958(单株草产量)之间。回归与通径分析结果显示,返青生长速度、叶长、节间长及茎粗对单株草产量具显著正向直接效应。聚类分析将供试材料划分为4类,其中第Ⅰ类群综合性状较优,第Ⅳ类群较差。主成分分析提取出3个主成分,累计贡献率达68.12%。基于主成分得分,结合模糊隶属函数法与贡献率计算综合评价D值,依据D值排名筛选出GM1×F-Y189、GM1×F-Y557、GM1×F-A591等17份综合性状表现较优秀的象草育种新材料。研究结果可为象草高产抗寒新品种选育提供表型评价依据。

关键词:象草;产量;抗寒;综合评价

中图分类号:S813.3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-3004-11

Comprehensive Evaluation of Yields and Cold Resistance in New *Pennisetum purpureum* Breeding Materials

YU Shuai, ZUO Su-tian, NIE Gang, JIANG Zhe-ji, LING Yao, ZHANG Xin-quan^{*}

(College of Grassland Science and Technology of Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan Province 611130, China)

Abstract: To investigate the variation patterns of fresh weight and cold tolerance traits in new breeding materials of *Pennisetum purpureum*, identify the main trait factors affecting fresh weight, and select superior materials with high fresh weight and strong cold tolerance, this study used 86 materials of *P. purpureum* as experimental subjects and analyzed twelve traits for diversity, correlation, regression, path, cluster and principal component analysis. The results showed that the coefficient of variation for each trait of the tested materials ranged from 6.45% (leaf length) to 18.17% (tiller number after regreening), and the genetic diversity index ranged from 1.8992 (plant height) to 2.0958 (fresh weight). Regression and path analysis indicated that regreening speed, leaf length, internode length, and stem diameter had significant direct positive effects on fresh weight. Cluster analysis classified the materials into four clusters, with cluster I exhibiting better comprehensive traits and cluster IV the worst. Principal component analysis extracted three principal components, with a cumulative contribution rate of 68.12%. Based on principal component scores, the comprehensive evaluation D value was calculated using the fuzzy membership function method combined with the contribution rates. According to the D value ranking, 17 *P. purpureum* breeding materials with relatively superior comprehensive traits, including GM1×F-Y189, GM1×F-Y557, and GM1×F-A591, were selected. These results can provide a phenotypic evaluation basis for breeding new high-fresh-weight and cold-tolerant *P. purpureum* varieties.

Key words: *Pennisetum purpureum*; Yields; Cold tolerance; Comprehensive evaluation

狼尾草属(*Pennisetum*)牧草隶属禾本科黍亚 科,为一年生或多年生禾本科牧草,主要分布于热

收稿日期:2025-02-09;修回日期:2026-04-16

基金项目:四川省重点研发项目(2025YFYZ0001)资助

作者简介:余帅(1996-),男,汉族,云南昭通人,硕士研究生,主要从事草种质资源创新及育种研究,Email:994963291@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhangxq@sicau.edu.cn

带、亚热带地区,全球约有140种,多数原产于非洲^[1]。我国人工栽培利用的种主要有多年生象草(*P. purpureum*)、一年生美洲狼尾草(*P. glaucum*)及二者间杂交种—杂交狼尾草(*P. glaucum*×*P. purpureum*)^[2]。其中,象草因其生长迅速、抗病虫害能力强、适口性良好等特点,被广泛用作动物饲料,亦可加工成青贮饲料利用^[3]。然而,象草喜温暖气候,抗寒性差,越冬率低,冬季休眠时间长,推广应用受地域限制^[4]。截至2025年,经全国牧草品种审定委员会审定的狼尾草牧草品种16个,其中象草品种8个,但在草食畜牧业快速发展的南方丘陵山区,兼具高产抗寒特性的象草饲草品种匮乏,这严重制约了草牧业的高质量发展。因此,亟需选育高产且抗寒性突出的象草新品种,以助力我国南方丘陵山区草牧业发展及乡村振兴。然而,象草种质资源创新长期依赖种茎无性繁殖,导致其种质遗传基础狭窄,已成为制约象草品种改良的关键瓶颈^[5]。为突破上述瓶颈,创制高产、优质且抗寒性突出象草新材料,四川农业大学牧草育种团队自2001年起系统收集并评价国内外象草资源,以高产、抗寒性优异材料为亲本,通过杂交并结合多年无性系选择,成功创制出一批新材料。但是,象草产量与抗寒性有待进一步鉴定分析,以期为其高产抗寒育种提供材料支撑。

近年来,象草产量性状的综合评价已取得一定进展:冉景松等^[6]基于86份象草自交后代进行聚类分析,将其划分为高秆、中高秆和矮秆三种株型类群,为株高基因挖掘提供材料基础;Santana等^[7]对多个象草自交群体表型进行综合评价,挖掘出具有高产潜力的亲本材料;也有研究对象草种质资源产量性状进行系统评价,筛选出以BRS Capiacu为代表的高产类群^[8]。然而,这些研究多基于象草自交后代及自然种质资源群体,对抗寒相关性状的系统评价明显不足,导致相关种质创新及系统性评价研究进展滞后,已成为制约象草抗寒育种发展的关键瓶颈。基于此,本研究以86份象草材料为试验对象,综合运用遗传变异分析、多样性指数、相关性分析、线性回归、通径分析、聚类分析、主成分分析及隶属函数法,对其9个产量性状和3个抗寒性状进行综合评价,旨在解析其产量形成的关键性状因子,筛选产量与抗寒性综合优异育种材料,为象草亲本选配与种质创新提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

基于课题组前期发掘的抗寒性和农艺性状表现优异亲本材料F-A、F-B、F-LG、F-Y、F-LP、F-SU和GM1。通过杂交成功创制了8个杂交组合,其中,GM1因产量高、叶量丰富、分蘖性好被选为母本,在父本选择上,选用经多年筛选评价中越冬性表现较优、抗逆性强,且植株高大、茎秆粗壮、花粉活力强的F-A、F-B、F-LG、F-Y、F-LP、F-SU等材料,以期通过杂交将父本的优良性状导入后代。育苗移栽后共获得约6000个成活的杂交后代。经无性系多次筛选,最终得到77份育种新材料。LBLC的3个诱变材料是⁶⁰Co- γ 辐射诱变创制。试验以亲本F-B、F-LG、F-A及国审品种桂牧1号象草、桂闽引象草和德宏象草作为对照材料。详见表1。

1.2 试验方法

1.2.1 试验地概况 试验地位于四川省雅安市四川农业大学牧草育种基地(30°08'N,103°14'E),海拔750 m,年降水量1774.3 mm,试验期间试验地气温如表2所列。试验地土壤酸性为弱酸性($5.5 \leq \text{pH} \leq 6.5$),有机质含量为33.45 g·kg⁻¹,土壤速效N、P、K含量分别为121.25,11.34和62.71 mg·kg⁻¹。

1.2.2 试验设计 试验材料种植采用完全随机区组设计,小区面积1 m×3 m,每份材料种植3个小区,每小区栽植3株含有两个茎节的种茎,采用斜插法移栽,覆土至1个茎节处。株行距1 m×1 m。田间管理水平略高于当地大田生产标准。

1.2.3 观测指标 (1)产量相关性状:以象草单株为单位进行田间产量性状观测,共测定两年。所有产量性状均在秋季刈割时进行测定,每个小区选取3个单株,每单株选取5个分蘖挂牌标记,测定其株高、叶长、叶宽、节间数、茎粗、节间长度,取5个分蘖的平均值作为该材料该单株的测量值,所有产量性状数据均以两年观测的平均值进行统计分析。田间性状测定完成后,将单株贴地刈割,留茬高度5 cm,统计分蘖数,并用感量0.01 kg的电子天平称量单株鲜重。所有性状测定方法参照《植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 狼尾草属》(GB/T 19557.1)^[9],具体记载标准如下:株高 Plant height (PH,cm):从地面至植株最高部位的绝对高度;叶片数 Number of leaves(NL,片):地面至植株最高点

表 1 86 份象草新材料基本信息表
Table 1 General information of 86 new accessions of *P. purpureum*

编号 No.	名称 Name	材料类型 Material type	编号 No.	名称 Name	材料类型 Material type
1	F-SU×F-Y20	杂交新材料	44	GM1×F-LG1	杂交新材料
2	F-Y×F-B117	杂交新材料	45	GM1×F-LG11	杂交新材料
3	F-Y×F-LP163	杂交新材料	46	GM1×F-LG12	杂交新材料
4	F-Y×F-LP19	杂交新材料	47	GM1×F-LG13	杂交新材料
5	F-Y×F-LP21	杂交新材料	48	GM1×F-LG14	杂交新材料
6	GM1×F-A11	杂交新材料	49	GM1×F-LG15	杂交新材料
7	GM1×F-A122	杂交新材料	50	GM1×F-LG17	杂交新材料
8	GM1×F-A206	杂交新材料	51	GM1×F-LG2	杂交新材料
9	GM1×F-A246	杂交新材料	52	GM1×F-LG4	杂交新材料
10	GM1×F-A269	诱变新材料	53	GM1×F-LG6	杂交新材料
11	GM1×F-A293	杂交新材料	54	GM1×F-LG7	杂交新材料
12	GM1×F-A32	杂交新材料	55	GM1×F-LG9	杂交新材料
13	GM1×F-A4	杂交新材料	56	GM1×F-LP176	杂交新材料
14	GM1×F-A41	杂交新材料	57	GM1×F-LP219	杂交新材料
15	GM1×F-A437	杂交新材料	58	GM1×F-LP306	杂交新材料
16	GM1×F-A480	杂交新材料	59	GM1×F-LP308	杂交新材料
17	GM1×F-A499	杂交新材料	60	GM1×F-LP327	杂交新材料
18	GM1×F-A510	杂交新材料	61	GM1×F-LP368	杂交新材料
19	GM1×F-A521	诱变新材料	62	GM1×F-LP390	杂交新材料
20	GM1×F-A556	杂交新材料	63	GM1×F-LP485	杂交新材料
21	GM1×F-A572	杂交新材料	64	GM1×F-LP814	杂交新材料
22	GM1×F-A585	杂交新材料	65	GM1×F-LP868	杂交新材料
23	GM1×F-A591	杂交新材料	66	GM1×F-LP921	杂交新材料
24	GM1×F-A632	杂交新材料	67	GM1×F-SU12	杂交新材料
25	GM1×F-A660	杂交新材料	68	GM1×F-SU16	杂交新材料
26	GM1×F-A746	杂交新材料	69	GM1×F-SU50	杂交新材料
27	GM1×F-A75	杂交新材料	70	GM1×F-Y189	杂交新材料
28	GM1×F-A788	杂交新材料	71	GM1×F-Y269	杂交新材料
29	GM1×F-A803	杂交新材料	72	GM1×F-Y366	杂交新材料
30	GM1×F-A813	杂交新材料	73	GM1×F-Y467	杂交新材料
31	GM1×F-A88	杂交新材料	74	GM1×F-Y468	杂交新材料
32	GM1×F-B100	杂交新材料	75	GM1×F-Y557	杂交新材料
33	GM1×F-B1297	杂交新材料	76	GM1×F-Y738	杂交新材料
34	GM1×F-B1303	杂交新材料	77	GM1×F-Y909	杂交新材料
35	GM1×F-B209	杂交新材料	78	LBLC178	辐射诱变材料
36	GM1×F-B409	杂交新材料	79	LBLC35	辐射诱变材料
37	GM1×F-B425	杂交新材料	80	LBLC53	辐射诱变材料
38	GM1×F-B433	杂交新材料	81	F-B	杂交亲本
39	GM1×F-B664	杂交新材料	82	德宏象草	国审品种
40	GM1×F-B678	杂交新材料	83	桂闽引象草(F-Y)	国审品种
41	GM1×F-B687	杂交新材料	84	桂牧 1 号杂交象草(GM1)	国审品种
42	GM1×F-B93	杂交新材料	85	F-LG	杂交亲本
43	GM1×F-B94	杂交新材料	86	F-A	杂交亲本

叶片总数;茎节数(Number of internodes,NI,节):目测地面至植株最高点的茎节总数;叶长 Leaf length,LL,cm):植株自下而上第 5 片叶片叶基至叶尖的长度;叶宽(Leaf width,LW,mm):植株自下而上第 5 片叶片最宽处的宽度 ;茎粗(Internode diameter,ID,mm):用游标卡尺测量植株自下而上倒数

第 5 节扁平宽面的直径;节间长(Internode length,IL,cm):植株自下而上倒数第 5 节的节间长度;分蘖数(Number of tillers,NT,个):单株所有分蘖的总数;单株草产量(Fresh weight,FW,kg):单株鲜草的重量。

(2)抗寒相关性状:包括单株返青时间、返青后

表 2 试验期间试验地的气温变化统计

Table 2 Statistics of temperature variation in the experimental field during the trial period

月份	2022 年 10 月—2023 年 6 月 October 2022-June 2023				2023 年 10 月—2024 年 6 月 October 2023-June 2024			
	极端高温	极端低温	平均高温	平均低温	极端高温	极端低温	平均高温	平均低温
	Extreme heat/℃	Extreme cold/℃	Average high temperatures/℃	Average low temperatures/℃	Extreme heat /℃	Extreme cold/℃	Average high temperatures/℃	Average low temperatures/℃
10 月 Oct.	28	10	19	14	25	11	20	15
11 月 Nov.	23	4	16	11	25	7	16	11
12 月 Dec.	13	2	8	4	18	−1	11	6
1 月 Jan.	16	−1	9	3	17	0	10	5
2 月 Feb.	19	5	11	7	20	2	11	5
3 月 Mar.	25	6	17	10	27	4	17	10
4 月 Apr.	32	9	22	14	29	12	23	15
5 月 May	33	13	24	17	33	13	26	18
6 月 Jun.	33	18	23	19	33	17	28	20

注:数据来源,https://lishi.tianqi.com
Note: Data source,https://lishi.tianqi.com

30 天生长速度及返青后 30 天单株苗数,共测定两年,每个材料测定 9 株。所有观测均以单株为单位,具体测定方法如下:单株返青时间 Green-up Time (GT,d):2 月 1 日起,每 3 天观测一次,单株上出现首个长度大于或等于 1 cm 的可见幼苗为标志,记录该日期,直至所有供试单株均达到返青标准为止以该日期与当年 2 月 1 日之间的天数差作为单株返青时间^[10];单株返青苗数(Tiller number after regreening, TNR,个):以该单株被记录为返青之日起,30 天后,统计该单株所有长出的新生分蘖(即返青苗)的总数^[11];返青生长速度(Regreening speed, RS, cm/d):以该单株被记录为返青之日为起点,30 天后,测量其生长状况。每单株随机选取 5 个新生分蘖(返青苗),测量其从地面至植株最高点的自然高度,取平均值作为该单株的高度观测值。单株返青生长速度按以下公式计算:RS=单株平均自然高度 / 30(d)^[12]。所有抗寒相关性状数据均以两年观测的平均值进行统计分析。

1.2.4 数据统计与分析 本试验综合运用多种统计软件进行数据分析:使用 Excel 2024 计算性状平均值、标准差、变异系数及遗传多样性指数;利用 Origin 2025 进行正态分布检验与相关性分析,利用 R 语言进行聚类分析;通过 SPSS 完成方差、回归、通径及主成分分析,并基于主成分得分,采用模糊隶属函数法结合贡献率权重计算各材料综合评价 D 值。

遗传多样性指数: $H'=-\sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i$

以材料的平均值($\bar{X}$)和标准差(S)划分方法将每个性状分为 10 个级别,第一级为

$[x_i < (\bar{X} - 2S)]$, 第十级: $[x_i > (\bar{X} + 2S)]$, P_i 为每个级别中出现次数/总样本数量^[13]。

$IPC=R_{ij} \times P_{jy}; DC=2 \times P_{iy} \times R_{iy} - P_{iy}^2$

式中 IPC 及 DC 分别为间接通径和决策系数, R_{ij} 及 R_{iy} 分别表示自变量 i 与 j 、自变量 i 与因变量 y 的相关系数; P_{jy} 及 P_{iy} 分别为自变量 j 、自变量 i 与因变量 y 的直接通径系数。决策系数大于 0,说明自变量对因变量起促进作用,决策系数小于 0,说明自变量对因变量起抑制作用^[14-15]。

隶属函数值: $V_j = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$

式中: V_j 为第 j 个主成分因子的隶属函数值; X_i 为第 i 个主成分因子的值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为第 i 个主成分因子的最大值和最小值^[16]。

综合指标权重: $H_i = G_i / \sum_{i=1}^n G_i$

式中: H_i 为第 i 个综合指标在所有综合指标权重, G_i 为各材料第 i 个综合指标贡献率^[17]。

综合评价值: $D = \sum_{i=1}^n (V_j \times H_i)$

2 结果与分析

2.1 象草新材料产量及抗寒性状多样性分析

86 份象草新材料的 12 个性状的频率分布结果表明(图 1),两年所有性状均符合正态分布。方差分析结果表明(表 3),材料和年份间的差异对所有测定性状均达到了极显著水平($P < 0.01$)。除单株返青苗数及返青时间外,材料与年份的交互作用对其余性状均达到了极显著水平($P < 0.01$)。供试材料产量及抗寒性状变异系数差异较大(表 3),变异

系数介于 6.45%~18.17 % 之间,平均值为 12.28 %。其中,变异系数最高的性状是单株返青苗数(18.17 %),其次为单株鲜草产量(17.30%),表明象草单株返青苗数及鲜草产量变异幅度较大,遗传不稳定。变异系数最低的性状为叶长(6.45%),表明象草叶长变异幅度较小,遗传变异较为稳定。各性状遗传多样性指数范围为 1.8992~

2.0985,平均值为 2.0270。其中,单株鲜草产量遗传多样性指数最大为 2.0958,其次为分蘖数(2.0858)、叶片数(2.0678)及叶长(2.0651);株高遗传多样性指数最小(1.8992)。总体来看,象草新材料在产量及抗寒相关性状上具有较丰富的遗传变异,可为后续新品种选育提供了良好的材料基础。

表3 86份象草新材料产量及抗寒性状遗传多样性分析及方差分析

Table 3 Genetic diversity analysis of fresh weight and cold resistance traits in new *P. purpureum* materials

性状 Traits	变幅 Range	平均值 Average	标准差 Std.	变异系数 CV/%	多样性指(H) Diversity index	F		
						年份 Year	材料 Material	材料×年份 Material×Year
分蘖数 NT	11.25~20.95	15.76	2.06	13.06	2.0858	2030.70**	4.42**	1.94**
茎节数 NI	6.95~13.93	11.43	1.4	12.27	1.9948	2172.51**	32.85**	10.18**
叶片数 NL	14.75~23.20	19.33	1.77	9.16	2.0678	1385.96**	28.77**	12.05**
叶长 LL	88.83~124.84	109.26	7.05	6.45	2.0615	2403.65**	38.47**	18.64**
叶宽 LW	31.82~52.04	40.22	4.32	10.73	2.0257	1248.59**	35.03**	15.40**
茎粗 ID	13.73~22.79	17.04	2.06	12.07	2.0207	53.00**	23.20**	8.79**
节间长 IL	13.40~20.96	16.78	1.54	9.20	2.0253	1573.58**	19.54**	12.62**
株高 PH	239.00~400.11	338.72	31.32	9.25	1.8992	2021.37**	104.55**	20.85**
单株草产量 FW	2.66~7.46	5.41	0.94	17.30	2.0985	1638.99**	9.38**	2.63**
返青苗数 TNR	12.22~37.41	23.93	4.35	18.17	2.0007	94.67**	5.04**	0.40
返青时间 GT	25.17~52.50	39.78	6.42	16.14	2.0399	173.66**	12.28**	0.28
返青生长速度 RS	0.88~1.77	1.32	0.18	13.53	2.0041	427.45**	12.86**	3.06**

注: *和**分别表示差异显著($P<0.05$)及差异极显著($P<0.01$)。下同

Note: * and ** indicate significant differences at the levels of 0.05 and 0.01, respectively. This is applicable for the following figures and tables as well

2.2 象草新材料产量及抗寒性状相关性分析

象草新材料产量及抗寒性状间存在不同程度相关性(图2)。单株草产量与分蘖数、节间数、叶片数、叶长、叶宽、茎粗、节间长、株高、返青生长速度及返青苗数呈极显著正相关($P<0.01$),与返青时间呈显著负相关($P<0.01$)。分蘖数与叶长、节间长、株高、返青苗数及返青生长速度呈显著或极显著正相关关系($P<0.05$, $P<0.01$)。与返青时间呈显著负相关关系($P<0.01$)。茎节数、叶片数、叶长、叶宽、节间长、茎粗、株高、返青时间及返青生长速度之间呈极显著或显著正相关关系($P<0.05$, $P<0.01$)。返青苗数与节间数、叶片数及株高呈显著正相关。综合来看,象草新材料各性状之间存在不同程度的相关性,导致不同性状间反映的信息重叠,需进一步对象草新材料各性状进行简化分析。

2.3 象草新材料产量及抗寒性状线性回归及通径分析

为明确影响象草新材料产量形成的关键性状

因子,基于线性回归方程构建原则($VIF<5$, $DW\approx 2$),以单株草产量为因变量Y,其余性状为自变量X(分蘖数、茎节数、叶片数、叶长、叶宽、茎粗、节间长、株高、返青苗数、返青时间及返青生长速度),进行线性逐步回归分析(表4),所得线性回归方程为: $Y = -5.213 + 2.030X_1 + 0.033X_2 + 0.162X_3 + 0.095X_4$ ($R^2=0.675$, $F=41.965$, $P<0.001$),其中 X_1-X_4 分别表示返青生长速度,叶长、节间长及茎粗,均与单株草产量呈极显著正相关($P<0.01$)。为准确判断入选性状对单株草产量的直接或间接影响,进一步进行通径分析结果显示,4个性状对单株草产量直接效应大小依次为返青生长速度(0.386)、叶长(0.250)、节间长(0.267)及茎粗(0.208),均为正向作用(表5)。通过对间接通径系数合计值分析发现,对象草单株草产量间接影响较大的性状依次为返青生长速度(0.509)、叶长(0.323)、节间长(0.260)及茎粗(0.138),说明各性状通过相互作用共同影响产量形成。决策系数分析表明,返青生长速度(0.402)、叶长(0.257)、节间长(0.238)及茎粗

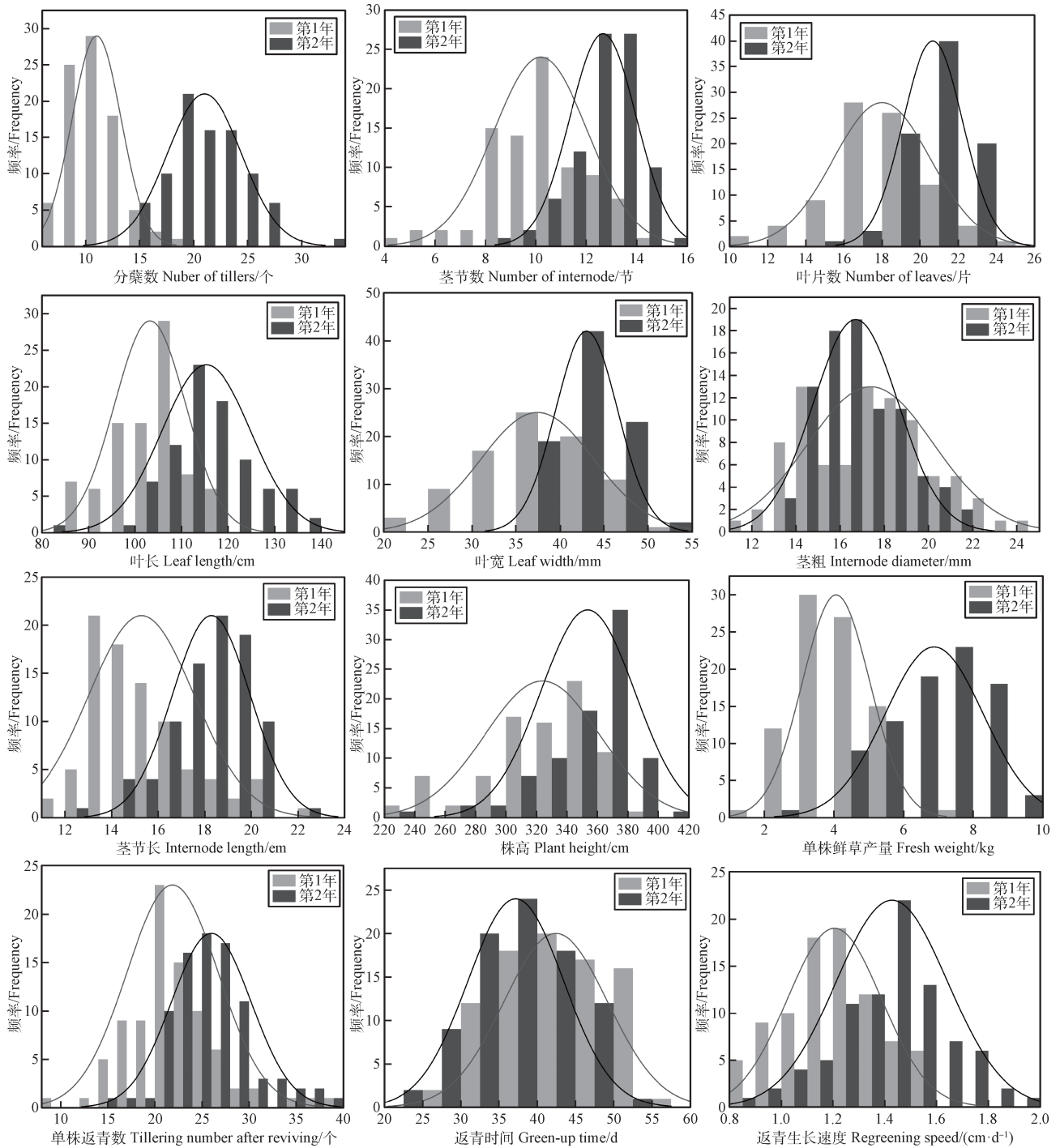


图 1 86 份象草新材料产量及抗寒性状正态性检测

Fig. 1 Normality test for fresh weight and cold resistance traits of 86 new accessions of *P. purpureum*

(0.127)均大于0,对单株草产量起促进作用,这与直接及间接影响单株草产量的结果类似,因此,在以单株草产量为育种的象草育种中,应重点关注上述性状。

2.4 象草新材料产量及抗寒性状聚类分析

利用 R 软件对 86 份象草新材料进行系统聚类

分析,可将其划分为 4 个类群(图 3),各类群主要性状特征如表 6 所示。Ⅰ类群包含 10 份材料,占总材料的 11.63 %。该类群分蘖数多,茎节数及叶片数多、叶片长且宽、茎秆较粗、植株高大、单株草产量高;同时返青苗数多、返青时间较早、返青生长速度快,综合性状表现优秀,可作为后续象草亲本选配及相关性状基因挖掘的重要材料。Ⅱ类群包含 24

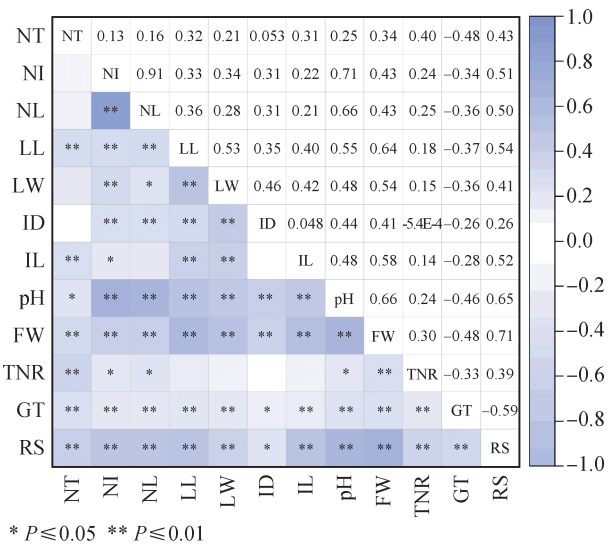


图2 象草新材料表型性状的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient of phenotypic traits of new *P. purpureum* accessions

注:NT,分蘖数;NI,节间数;NL,叶片数;LL,叶长;LW,叶宽;ID,茎粗;IL,节间长;PH,株高;FW,单株鲜重;TNR,单株返青苗数;GT,单株返青时间;RS,返青生长速度

Note: NT, number of tillers; NI, number of internodes; NL, number of leaves; LL, leaf length; LW, leaf width; ID, internode diameter; IL, internode length; PH, plant height; FW, fresh weight; TNR, tiller number after regreening; GT, green-up time; RS: regreening speed

份材料,占27.91%。该类群综合性状表现良好,产量和抗寒性处于中上水平,可作为象草新品种选育及特定性状改良的备选材料。Ⅲ类群包含39份材料,占45.35%。该类群综合性状处于中等水平,缺

乏明显优势性状,在后续育种研究中不予选用。Ⅳ类群包含13份材料,占15.12%。该类群茎节数及叶片数少、叶片窄小、茎秆细、茎节短、植株矮小、单株草产量低;返青苗数少、返青时间晚、返青生长速度慢,综合性状表现差,该类群材料不适宜直接作为育种亲本,但可作为特异性状基因挖掘的基础材料。

2.5 象草新材料产量及抗寒性状的主成分分析

主成分分析结果表明(表7),根据特征值大于1的原则,筛选出3个主成分,累计贡献率达68.120%,包含了象草新材料产量及抗寒绝大部分相关性状信息。第一主成分特征值及贡献率分别为5.400和45.331%,株高、单株草产量及返青生长速度特征向量值较大,反映植株株型与生长势特征。第二主成分特征值为1.480,贡献率12.337%,茎节数及叶片数的特征向量值较大,体现象草植株的茎节及叶片数量特性,第三主成分特征值为1.254,贡献率10.452%,以茎粗为主,反映茎秆粗细特性。综上,株高、单株鲜草产量、返青生长速度、茎节数、叶片数及茎粗是造成象草新材料差异的主要因素,可作为象草亲本选配或杂交后代筛选的重要指标。

2.6 象草新材料产量及抗寒性状的综合评价

将各性状分别代入3个主成分中,得到每份象草材料的3个主成分得分,第1主成分的线性方程

表4 单株草产量与4个性状的多元线性回归分析系数

Table 4 Coefficients of multivariate linear regression analysis for fresh weight and four traits

性状 Trait	未标准化系数		标准化系数		t	Sig.	共线性统计	
	Non-standardized coefficient		Standardized coefficient				Collinearity statistics	
	B	标准错 Standard error	Beta				容差 Allowance	VIF
常量 Constant	—5.213	1.020	—		—5.111	0.000	0.587	1.705
RS (X ₁)	2.030	0.435	0.386		4.664	0.000	0.632	1.582
LL (X ₂)	0.033	0.011	0.250		3.129	0.002	0.689	1.451
IL (X ₃)	0.162	0.046	0.267		3.494	0.001	0.847	1.181
ID (X ₄)	0.095	0.031	0.208		3.024	0.003	0.587	1.705

表5 单株草产量与4个性状的通径分析

Table 5 Analysis of the path of fresh weight with four traits

性状 Trait	与 Y 相关系数 Coefficient of correlation with Y	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					决策系数 Decision coefficient
			X ₁ -Y	X ₂ -Y	X ₃ -Y	X ₄ -Y	合计 Total	
RS (X ₁)	0.714	0.386	—	0.208	0.201	0.100	0.509	0.402
LL (X ₂)	0.639	0.250	0.135	—	0.101	0.088	0.323	0.257
IL (X ₃)	0.579	0.267	0.139	0.107	—	0.013	0.260	0.238
ID (X ₄)	0.409	0.208	0.054	0.074	0.010	—	0.138	0.127

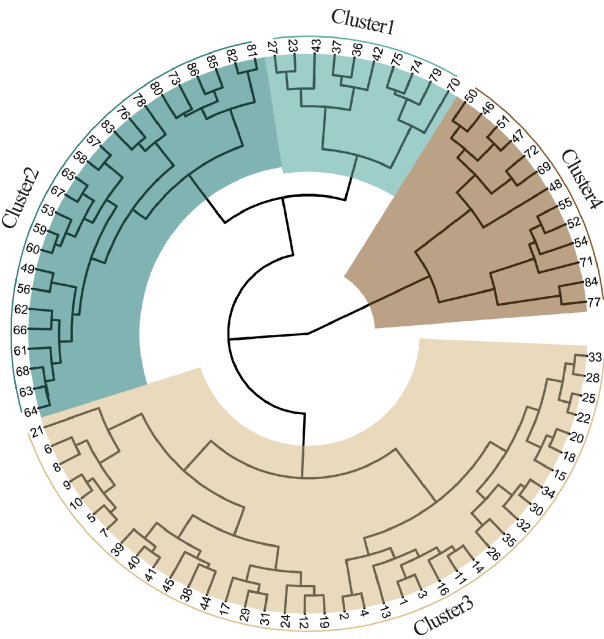


图 3 基于象草新材料产量及抗寒性状的聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis based on phenotypic traits of new *P. purpureum* accessions

注:数字代表材料编号;同表 1

Note: The number represents the material number; This is applicable for Table 1 as well

表 7 各成分得分系数及贡献率

Table 7 Score coefficient and contribution rate of each component

性状 Traits	成分 Component		
	1	2	3
分蘖数 NT	0.088	−0.416	−0.154
茎节数 NI	0.130	0.346	−0.315
叶片数 NL	0.128	0.328	−0.341
叶长 LL	0.131	−0.050	0.261
叶宽 LW	0.119	0.023	0.372
茎粗 ID	0.089	0.270	0.313
节间长 IL	0.108	−0.213	0.213
株高 PH	0.156	0.162	−0.018
单株草产量 FW	0.153	−0.074	0.178
返青苗数 TNR	0.077	−0.272	−0.398
返青时间 GT	−0.121	0.182	0.112
返青生长速度 RS	0.153	−0.123	−0.076
特征值 Eigenvalue	5.440	1.480	1.254
贡献率 Contribution rate/%	45.331	12.337	10.452
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	45.331	57.668	68.120

为： $y_{ij}=0.088x_{1j}+0.130x_{2j}+0.128x_{3j}+0.131x_{4j}+0.119x_{5j}+0.089x_{6j}+0.108x_{7j}+0.156x_{8j}+0.153x_{9j}+0.077x_{10j}-0.121x_{11j}+0.153x_{12j}$,将 3 个主成分利用模糊隶属函数进行归一化处理,随后根据 3 个主成分贡献率计算相应的权重系数(0.6655,0.1811,0.1534),最后计算得到各参试材料的 D 值,根据 D

值排名,初步筛选出综合排名优于对照桂闽引象草的材料及较亲本 F-A 象草较差的材料各 17 份(表 8)。其中参试材料 GM1×F-Y 189 的 D 值(0.775)最高,其次为 GM1×F-Y 557(0.764)、GM1×F-A 591(0.757)、LBLC 35(0.716)、GM1×F-A 75(0.711),这些均属于第 I 类群综合性状表现优秀的材料。D 值排名靠后的材料 GM1×F-Y 269(0.267)、GM1×F-LG 14(0.202)、GM1×F-LG 12(0.169)、GM1×F-Y 366(0.156)及 GM1×F-SU 50(0.150)均属于第 IV 类综合性状表现差的象草新材料。由此可见,聚类分析划定的类群与 D 值排序结果相互印证,据此筛选出综合性状表现较优秀的材料 17 份、表现较差的材料 17 份,共计 34 份新材料具有可靠的育种应用价值(表 8)。

表 6 不同类群表型性状的平均表现

Table 6 The average performance of different clusters

性状 Trait	第 I 类群 Cluster I	第 II 类群 Cluster II	第 III 类群 Cluster III	第 IV 类群 Cluster IV
分蘖数 NT	17.93±1.52 ^a	15.94±2.17 ^b	15.17±1.95 ^b	15.55±1.53 ^b
茎节数 NI	12.36±0.96 ^a	11.70±1.20 ^a	11.71±0.98 ^a	9.35±1.32 ^b
叶片数 NL	20.56±1.20 ^a	19.72±1.59 ^{ab}	19.57±1.43 ^b	16.95±1.49 ^c
叶长 LL	116.70±6.14 ^a	109.56±6.92 ^b	109.17±5.71 ^b	103.25±6.87 ^c
叶宽 LW	45.62±3.66 ^a	40.52±3.51 ^b	39.49±4.06 ^{bc}	37.74±3.85 ^c
茎粗 ID	18.92±2.08 ^a	17.90±2.00 ^b	16.40±1.80 ^c	15.92±1.45 ^c
节间长 IL	18.57±1.61 ^a	16.87±1.52 ^{bc}	16.50±1.29 ^b	15.66±1.13 ^c
株高 PH	379.54±9.92 ^a	350.17±11.14 ^b	339.89±18.37 ^b	282.67±24.33 ^c
单株草产量 FW	6.74±0.39 ^a	5.48±0.71 ^b	5.36±0.73 ^b	4.28±0.80 ^c
返青苗数 TNR	27.35±6.02 ^a	24.24±4.54 ^b	24.13±3.37 ^b	22.01±4.23 ^b
返青时间 GT	34.25±5.27 ^c	38.71±6.47 ^b	40.01±6.18 ^b	45.35±3.47 ^a
返青生长速度 RS	1.48±0.14 ^a	1.44±0.14 ^b	1.34±0.14 ^b	1.08±0.14 ^c

注:同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant difference at the 0.05 level

3 讨论

3.1 象草育种新材料的遗传多样性

种质资源是作物育种与改良的核心遗传基础,其科学利用是实现高效育种的关键前提。因此,对优异种质材料开展系统鉴定、评价与深入挖掘具有重要意义^[18]。遗传多样性分析作为研究新种质遗传信息的重要手段,不仅能够直观反映种质资源的丰富程度,还可揭示其遗传变异水平,是新品种选育的重要基础^[19-20]。然而,在生产实践中,象草主要依赖无性繁殖,存在遗传多样性不足、遗传基础相对狭窄的问题。我国象草育种起步相对较晚,自 20 世纪 30 年代逐步开展以来,多数品种仍依赖地区间

表 8 象草优异新材料综合评价

Table 8 Comprehensive evaluation of excellent new accessions of *P. purpureum*

编号 No.	名称 Name	NT	NI	NL	LL	LW	ID	IL	PH	FW	TNR	GT	RS	D 值 D value	排名 Rank
70	GM1×F-Y 189	20.95	13.93	21.88	114.26	48.39	20.77	18.94	400.11	7.46	35.13	30.50	1.71	0.77	1
75	GM1×F-Y 557	16.55	13.58	22.33	113.20	52.04	16.77	20.40	376.63	6.47	22.57	25.17	1.69	0.76	2
23	GM1×F-A 591	19.25	11.97	21.07	124.28	46.46	18.92	20.74	384.79	7.20	24.42	32.83	1.56	0.76	3
79	LBLC 35	15.20	11.83	20.15	124.05	46.73	21.83	16.01	350.66	5.94	22.58	34.17	1.55	0.72	4
27	GM1×F-A 75	16.85	12.50	20.78	116.94	46.31	20.81	16.30	384.85	6.16	22.85	29.50	1.42	0.71	5
42	GM1×F-B 93	17.50	12.23	19.42	121.28	45.79	19.00	18.48	384.10	6.91	22.06	36.50	1.38	0.70	6
16	GM1×F-A 480	16.35	12.38	21.03	115.09	43.65	20.59	18.02	370.71	6.25	23.79	33.17	1.54	0.69	7
3	F-Y×F-LP 163	18.45	12.32	20.03	115.38	43.39	18.21	20.14	370.78	6.42	20.94	34.83	1.77	0.68	8
11	GM1×F-A 293	16.65	12.78	21.70	109.42	46.65	17.25	19.64	360.89	6.66	27.82	37.17	1.47	0.65	9
53	GM1×F-LG 6	18.35	11.30	19.63	116.10	46.24	20.47	16.48	345.77	5.96	22.68	32.83	1.52	0.64	10
74	GM1×F-Y 468	17.80	11.75	19.68	118.34	41.02	17.21	20.15	377.01	6.54	22.57	39.50	1.46	0.63	11
14	GM1×F-A 41	11.25	13.05	20.30	113.55	42.17	19.62	16.23	359.66	5.69	24.51	41.83	1.21	0.62	12
32	GM1×F-B 100	14.70	13.12	20.67	110.09	47.17	16.75	17.57	360.89	5.78	24.73	36.17	1.27	0.61	13
34	GM1×F-B 1303	13.30	12.17	20.10	110.33	38.82	19.45	17.29	365.26	5.73	19.13	39.83	1.31	0.60	14
1	F-SU×F-Y 20	15.65	11.72	19.75	108.44	40.96	16.90	18.52	366.16	6.47	22.92	31.17	1.58	0.59	15
65	GM1×F-LP 868	18.30	10.03	17.57	113.73	43.08	18.13	20.96	343.89	6.91	21.73	39.50	1.48	0.59	16
30	GM1×F-A 813	14.85	12.05	19.88	108.90	44.07	17.63	16.52	361.51	5.81	17.07	46.50	1.35	0.59	17
83	桂闽引象草(GMY)	12.75	11.38	19.47	108.16	39.58	20.40	15.18	359.93	5.79	19.78	34.17	1.37	0.58	18
86	F-A 象草(F-A)	16.90	10.08	16.95	110.16	42.91	16.43	16.06	280.76	5.37	21.90	43.17	1.12	0.39	69
9	GM1×F-A 246	15.55	9.85	17.63	100.89	39.10	15.51	17.39	324.22	5.20	29.19	39.83	1.25	0.36	70
51	GM1×F-LG 2	16.15	11.10	18.42	106.71	39.86	16.71	14.61	273.20	4.45	23.18	46.17	1.28	0.36	71
39	GM1×F-B 664	15.45	10.32	17.32	98.96	39.09	14.57	14.84	329.59	4.93	23.03	47.50	1.55	0.35	72
47	GM1×F-LG 13	15.05	8.25	16.98	105.55	38.42	19.18	15.97	278.42	5.16	21.36	47.83	1.00	0.35	73
52	GM1×F-LG 4	11.95	10.43	19.73	109.21	37.13	14.79	14.46	313.17	3.89	19.55	49.50	0.93	0.34	74
29	GM1×F-A 803	15.45	10.25	16.55	105.30	39.16	14.99	16.80	323.53	3.61	26.96	30.17	1.26	0.33	75
7	GM1×F-A 122	17.00	10.45	18.67	98.64	33.13	14.54	15.99	317.34	5.60	26.56	45.17	1.29	0.31	76
55	GM1×F-LG 9	15.15	9.35	17.17	105.99	32.63	16.00	16.38	322.88	3.88	24.08	45.83	1.19	0.29	77
54	GM1×F-LG 7	15.35	10.43	18.02	97.43	37.45	14.94	15.36	305.60	4.17	19.07	49.83	1.03	0.29	78
21	GM1×F-A 572	17.60	11.38	19.18	104.24	32.45	14.29	15.31	294.15	4.27	24.82	44.50	1.27	0.28	79
50	GM1×F-LG 17	15.85	10.40	17.57	97.15	43.66	15.87	14.97	259.10	3.44	19.81	43.17	0.99	0.28	80
5	F-Y×F-LP 21	13.70	9.95	17.83	100.41	33.67	13.86	15.89	320.80	4.36	21.13	42.50	0.98	0.27	81
71	GM1×F-Y 269	17.55	8.88	15.95	108.93	34.38	14.81	15.64	308.07	4.96	31.63	38.50	1.31	0.27	82
48	GM1×F-LG 14	13.20	7.85	14.75	88.83	35.98	17.12	15.52	239.00	4.74	15.46	49.17	1.07	0.20	83
46	GM1×F-LG 12	15.75	8.60	15.88	97.83	35.01	13.96	14.37	267.70	4.05	17.75	40.17	0.88	0.17	84
72	GM1×F-Y 366	17.05	8.22	15.70	99.61	32.22	15.41	18.27	273.69	2.66	22.51	46.50	0.96	0.16	85
69	GM1×F-SU 50	16.25	6.95	14.83	101.56	37.52	14.34	14.83	261.85	3.63	21.86	45.17	1.00	0.15	86

及国外资源的引种与驯化,难以满足现代育种对高效性和准确性的需求^[21]。因此,加强对象草优异种质资源的系统收集、科学评价与创新利用尤为重要。

本研究基于7个在产量及抗寒性方面表现优良的亲本材料,通过杂交与辐射诱变创制了一批育种新材料,并对其产量及抗寒性状进行了系统评价,有助于揭示不同性状间的遗传差异,从而为高效筛选综合性状优良的象草提供材料依据。结果表明,各性状遗传多样性指数介于1.8992~2.0985之间,变异系数为6.45%~18.17%,说明象草育种新材料在产量及抗寒性状上具有较丰富的遗传变异基础。其中返青苗数及单株草产量的变异系数分别达到18.17%和17.30%,表明这些性状在材料间差

异较大,具有较高的选择潜力。与Santana等^[7]研究相比,后者在象草自交后代群体中检测到更宽的变异范围,可能与其采用多份象草自交后代群体、遗传变异范围较宽有关,而本研究材料经过多次优选,性状表现相对集中。总体而言,当前创制的新材料为后续象草高产抗寒育种提供了良好的遗传基础。今后应进一步结合分子育种技术手段,高效利用现有多样性资源,加快优良新品种选育进程。

3.2 象草新材料产量性状的主要影响因素

作物产量属于数量性状,由多个基因及其相互作用共同调控,并与多种表型性状密切相关^[22]。相关分析能够揭示不同性状之间的关联程度,但难以区分其

对产量形成的直接或间接作用。因此,有必要结合回归分析与通径分析,对影响产量的关键因子进行深度解析。本研究结果表明,象草新材料单株产量与多数农艺性状存在显著或极显著相关关系,说明产量形成受多性状共同影响。进一步通过逐步回归与通径分析发现,返青生长速度、节间长、叶长和茎粗是影响单株鲜草产量的核心性状,其中返青生长速度的直接效应最大。该结果与杨珍等^[23]在高粱中研究结果基本一致,说明生长速度在禾本科牧草产量形成中具有普遍意义。因此,在以高产为目标的象草育种中,应重点关注返青生长速度、节间长度、叶片形态及茎秆粗细等性状,通过综合选择提高群体生长速度和生物量积累能力,从而提升象草品种产量水平。

3.3 象草优异新材料初步筛选

主成分分析结合隶属函数综合评价方法已广泛应用于作物种质资源评价^[24-25]。该方法能够在减少性状冗余的基础上,客观反映材料的综合表现。本研究对象草新材料的草产量及抗寒性状进行主成分分析,结果发现株高、节间长和分蘖数是导致象草新材料差异的主要因素。这一发现与陈彩锦等^[26]在燕麦中的研究结论基本一致,表明象草育种材料植株高度、节间长度和分蘖能力可能在禾本科牧草的高产育种中具有普遍的重要性。同时,基于主成分得分和隶属函数值,并结合主成分的权重得到综合评价D值筛选出GM1×F-Y 189、GM1×F-A 591等综合性状表现优秀,可作为下一步核心亲本或直接进行品种比较试验的重点材料;而D值较低的材料(如GM1×F-SU 50等)虽然综合性状表现较差,但为针对性性状改良和机理研究提供了参考靶点。值得注意的是,本研究的综合评价D值的结果与聚类分析结果高度一致,不同统计方法之间相互验证,提高了筛选结论的可靠性,表明该方法适用于象草新材料的快速评价。然而,由于产量及抗寒性状易受环境影响,材料与年份的交互作用对多数性状达到极显著水平($P<0.01$),说明不同材料在不同年份间表现存在明显差异,即存在显著的基因型与环境互作效应。本研究基于两年平均值对参试材料进行综合评价与筛选,最终筛选出较对照桂闽引较优的17份材料,虽能通过两年平均值综合反映其整体表现,但交互作用的显著性提示,这17份材料中部分材料可能存在年度间表现波动。因此,在后续象草育种过程中,不仅应关注材料的平均表现,还应综合评价

其在不同年份下的稳定性,以筛选既高产又稳定的优良材料用于后续育种与推广。由于本试验为对创制的86份象草育种新材料进行初步筛选评价,上述17份材料尚需进一步开展多年多点品比试验,以评价其稳定性和广适性。此外,可将筛选出的较优异材料(如GM1×F-A 591、GM1×F-Y189)与具有不同优良性状(品质等)的象草材料进行杂交,聚合优良基因,以选育综合性状更加突出的新品种。

4 结论

供试象草育种新材料在产量及抗寒相关性状上具有丰富的遗传多样性。通径分析表明,返青生长速度、节间长、叶长及茎粗对单株草产量具有显著的正向直接影响,是影响象草产量形成的关键性状。综合主成分分析和隶属函数法,筛选出GM1×F-A 591、GM1×F-Y 189、GM1×F-Y 557等17份份综合性状表现较优的材料。这些材料可作为高产抗寒象草育种的核心亲本或推荐进入品比试验,为象草新品种选育及遗传改良提供重要的材料支撑。

参考文献

- [1] 侯新村,滕珂,郭强,等. 狼尾草属牧草研究进展[J]. 植物学报, 2022, 57(6): 814-825
HOU X C, TENG K, GUO Q, et al. Research advances in the *Pennisetum* forage[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 814-825
- [2] 李有涵,唐然,朱琼华,等. MT-1象草新品系与Mott矮象草形态特征及产量性状的比较[J]. 草业科学, 2012, 29(5): 768-774
LI Y H, TANG R, ZHU Q H, et al. Comparison of morphological and productive characteristics between MT-1 elephant grass and Mott elephant grass[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(5): 768-774
- [3] WANG C R, YAN H D, LI J, et al. Genome survey sequencing of purple elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum 'Zise') and identification o
- [4] DAUD Z, HATTA M Z M, KASSIM A S M, et al. Analysis of napier grass (*Pennisetum purpureum*) as a potential alternative fibre in paper industry[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(6): S6-18-S6-20
- [5] WANG C R, DAN X M, LIU T, et al. Genetic relationships of 24 *Pennisetum* cultivars and construction of DNA fingerprints based on SSR markers[J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2022, 31(3): 545-553
- [6] 冉景松,顾洪如,沈益新,等. 象草自交后代无性系产量及植物学性状聚类分析[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(5): 936-942
RAN J S, GU H R, SHEN Y X, et al. Cluster analysis of yield and botanic characters of napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) inbred vegetative lines[J]. Jiangsu Journal of

- Agricultural Sciences, 2010, 26(5): 936-942
- [7] SANTANA J G S, DAHER R F, AMBROSIO M, et al. Phenotypic traits and genetic diversity of elephant grass for bio-energy purposes[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2025, 72: 3479-3491
- [8] CARVALHOROCHA J R A S, MACHADO J C, CARNEIRO P C S, et al. Bioenergetic potential and genetic diversity of elephant grass via morpho-agronomic and biomass quality traits[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 95: 485-492
- [9] 中华人民共和国农业部. 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 狼尾草属: NY/T 2356-2013[S]. 北京: 中国农业出版社, 2013
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability for Pennisetum: NY/T 2356-2013[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [10] DONG H, LIU S, CLARK L V, et al. Winter hardiness of Miscanthus (II): Genetic mapping for overwintering ability and adaptation traits in three interconnected Miscanthus populations [J]. GCB Bioenergy, 2019, 11(5): 706-726
- [11] BURNER D M, HALE A L, VIATOR R P, et al. Ratoon cold tolerance of *Pennisetum*, *Erianthus*, and *Saccharum* bioenergy feed-stocks[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 109: 327-334
- [12] 田宏, 党志强, 刘洋, 等. 3种狼尾草属牧草在江汉平原的生产性能和抗寒性评价[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20251218.0858.002,2025-12-18/2026-03-19>
- TIAN H, DANG Z Q, LIU Y, et al. Evaluation of production performance and cold resistance of three *Pennisetum* forages in the Jianghan Plain [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20251218.0858.002,2025-12-18/2026-03-19>
- [13] 南铭, 赵桂琴, 柴继宽. 黄土高原半干旱区饲用燕麦种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 草地学报, 2017, 25(6): 1197-1205
- NAN M, ZHAO G Q, CHAI J K, et al. Phenotypic diversity and comprehensive evaluations of *Avena sativa* L. germplasm in semi-arid area of the Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(6): 1197-1205
- [14] 杜家菊, 陈志伟. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6
- DU J J, CHEN Z W. Methodology for conducting path analysis using SPSS linear regression [J]. Bulletin of Biology, 2010, 45(2): 4-6
- [15] 余帅, 冯光燕, 苏晓丽, 等. 17份多花黑麦草品种(系)农艺性状与产量形成关系的多重分析[J]. 草地学报, 2024, 32(9): 2862-2874
- YU S, FENG G Y, SU X L, et al. Multiple analyses of the relationship between agronomic traits and yield formation of 17 varieties (lines) of *Lolium multiflorum* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9): 2862-2874
- [16] 周福平, 史红梅, 张海燕, 等. 应用模糊隶属函数法对高粱种质资源的农艺性状和品质性状进行综合评价[J]. 种子, 2022, 41(1): 94-98
- ZHOU F P, SHI H M, ZHANG H Y, et al. Comprehensive evaluation of agronomic and qualitative traits in sorghum germplasm resources based on the fuzzy membership function method [J]. Seed, 2022, 41(1): 94-98
- [17] 唐雪文, 张书宁, 邓杰, 等. 糯玉米自交系种质资源遗传多样性分析及综合评价[J]. 种子, 2025, 44(2): 177-183
- TANG X W, ZHANG S N, DENG J, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of waxy maize inbred line germplasm resources[J]. Seed, 2025, 44(2): 177-183
- [18] UPADHYAYA H D, SHARMA S, RAMULU B, et al. Variation for qualitative and quantitative traits and identification of trait specific sources in new *Sorghum germplasm* [J]. Crop and Pasture Science, 2010, 61(8): 609-618
- [19] LIU D L, WANG X Q, LI W S, et al. Genetic diversity analysis of the phenotypic traits of 215 sugar beet germplasm resources[J]. Sugar Tech, 2022, 24(6): 1790-1800
- [20] WANG Y L, LI Y. Genetic diversity analysis of phenotypic traits among 37 *Xanthoceras sorbifolium* elite germplasms[J]. Journal of Forest Research, 2022, 27(2): 140-147
- [21] 顾洪如, 陈礼伟. 狼尾草新品种选育的研究[J]. 草业科学, 1989, 6(3): 31-34
- GU H R, CHEN L W. Study on breeding of new *Pennisetum* strains[J]. Pratacultural Science, 1989, 6(3): 31-34
- [22] 张西英, 刘江娜, 张庭军, 等. 海岛棉早熟和产量性状的典型相关及通径分析[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(8): 1295-1302
- ZHANG X Y, LIU J N, ZHANG T J, ZHAO Z S. Canonical correlation and path analysis of earliness and yield traits in sea island cotton [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(8): 1295-1302
- [23] 杨珍, 李斌, 赵军, 等. 甜高粱主要农艺性状与产量相关和通径分析[J]. 中国糖料, 2018, 40(4): 16-19
- YANG Z, LI B, ZHAO J, et al. Correlation and path analysis of agronomic traits and yield of sweet sorghum [J]. Sugar Crops of China, 2018, 40(4): 16-19
- [24] 张一中, 张晓娟, 梁笃, 等. 基于表型性状的高粱育种材料遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2837-2857
- ZHANG Y Z, ZHANG X J, LIANG D, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of sorghum breeding materials based on phenotypic traits [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(15): 2837-2857
- [25] 徐晓, 任根增, 赵欣蕊, 等. 中国高粱地方品种和育成品种穗部表型性状精准鉴定及综合评价[J]. 中国农业科学, 2022, 55(11): 2092-2108.
- XU X, REN G Z, ZHO X R, et al. Precise identification and comprehensive evaluation of panicle phenotypic traits in Chinese sorghum landraces and cultivars [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(11): 2092-2108
- [26] 陈彩锦, 马琳, 蒋庆雪, 等. 244份饲用燕麦种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 中国农业科学, 2025, 58(23): 4825-4836
- CHEN C J, MA L, JIANG Q X, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of 244 forage oat germplasm resources [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(23): 4825-4836