

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.021

引用格式:贺朝鑫,余帅,张新全,等.象草F<sub>1</sub>代真假杂种鉴定及高产种质的综合评价与筛选[J].草地学报,2026,34(8):2980—2990

HE Chao-xin, YU Shuai, ZHANG Xin-quan, et al. Identification of True Hybrids in the F<sub>1</sub> Generation of Elephant Grass and Comprehensive Evaluation and Screening of High-yield Germplasm[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8): 2980—2990

## 象草F<sub>1</sub>代真假杂种鉴定及高产种质的综合评价与筛选

贺朝鑫,余帅,张新全\*,彭燕\*

(四川农业大学草业科技学院,四川成都611130)

**摘要:**为筛选出高产潜力的象草(*Pennisetum purpureum*)新种源,以‘桂牧1号’杂交象草为母本、F-AI象草为父本获得800份杂交F<sub>1</sub>代,用SSR分子标记鉴定真假杂种,并对真杂种的10个产量相关性状开展多样性、相关性、聚类分析和主成分分析。结果表明:用SSR24和WSSR31两对引物鉴定出300份真杂种。真杂种群体表型变异丰富,变异系数为13.91%~45.58%,多样性指数为1.37~2.84。相关性分析显示,所有性状均与单株产量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),其中株高与鲜重、干重的相关系数最高,为0.55和0.66。杂种优势分析表明,F<sub>1</sub>代的产量及相关性状多为正向显性,母本的相对遗传力强于父本。主成分分析提取出2个主成分,累计贡献率为64.819%,株高、单株干重、分蘖数和节间长为核心影响因子。聚类分析将材料划分为4类,其中,第Ⅲ类群有92份材料综合性状最优,第Ⅱ类群有41份材料综合性状表现最差,第Ⅰ、Ⅳ类群介于两者之间。通过模糊隶属函数法进行综合评价,筛选出15份具有高产潜力的优良育种材料。研究结果为象草杂交育种提供了方法和材料支撑。

**关键词:**象草杂交F<sub>1</sub>代;分子标记;多样性分析;聚类分析;综合评价

中图分类号:S813.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2980-11

## Identification of True Hybrids in the F<sub>1</sub> Generation of Elephant Grass and Comprehensive Evaluation and Screening of High-yield Germplasm

HE Chao-xin, YU Shuai, ZHANG Xin-quan\*, PENG Yan\*

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

**Abstract:** To screen novel germplasm of *Pennisetum purpureum* with high-yield potential, 800 F<sub>1</sub> hybrid individuals were generated by crossing ‘Guimu 1’ hybrid *P. purpureum* (female parent) with F-AI *P. purpureum* (male parent). SSR molecular markers were employed to authenticate true hybrids, followed by analyses of diversity, correlation, clustering, and principal components for 10 yield-related traits in the true hybrid population. The results revealed that 300 true hybrids were identified using two primer pairs (SSR24 and WSSR31). The true hybrid population exhibited abundant phenotypic variation, with coefficients of variation ranging from 13.91% to 45.58% and diversity indices from 1.37 to 2.84. Correlation analysis demonstrated that all traits were highly significantly positively correlated with single-plant yield ( $P<0.01$ ), among which plant height showed the strongest correlations with fresh weight and dry weight, with correlation coefficients of 0.55 and 0.66, respectively. Heterosis analysis indicated that most yield-related traits of the F<sub>1</sub> generation displayed positive dominance, and the relative heritability of the female parent was stronger than that of the male parent. Principal component analysis extracted two principal components, accounting for a cumulative variance contribution rate of 64.819%, with plant height, single-plant dry weight, tiller number, and internode length identified as core influencing factors.

**Key words:** *Pennisetum purpureum* hybrid F<sub>1</sub> generation; SSR markers; Phenotypic diversity; Cluster analysis; Comprehensive evaluation

收稿日期:2026-02-23;修回日期:2026-04-14

作者简介:贺朝鑫(2001-),男,汉族,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事草种质资源创新及育种研究,E-mail:1970727216@qq.com,

\*通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhangxq@scau.edu.cn; Pengyanlee@163.com

象草(*Pennisetum purpureum* Schumach.)原产于非洲,是一种多年生暖季型饲草,具有生长迅速、产量高,营养品质优良、适应性强、利用年限长等特点,在热带和亚热带地区广泛种植<sup>[1-2]</sup>。早在20世纪30年代我国南方地区就陆续开始引种栽培象草,现已成为重要高产饲草之一<sup>[3]</sup>。然而,象草结实率低,长期依赖无性繁殖,育种工作相对滞后,截至2025年,我国通过全国草品种审定委员会审定的象草品种仅8个<sup>[4]</sup>,其中杂交象草品种仅1个。近年来,随着我国畜牧业的快速发展,优良饲草缺口巨大,对饲草的进口依赖度持续攀升,因此,培育高产优质、特色优势更为突出的象草新品种,对我国南方草牧业的健康发展具有重要促进作用。

当前,杂交仍为创制象草新种源、培育新品种的重要方法。因为象草作为异花授粉植物,杂种后代群体中更容易分离出各性状都比较突出的个体<sup>[5]</sup>。虽然象草是高度自交不亲和的植物,但其某些基因型仍然可能产生少量的自交种子,从而使后代群体中出现假杂种。因此,对杂交后代的选择和鉴定就显得尤为重要。简单序列重复(Simple sequence repeat, SSR)是一种基于特异引物PCR的分子标记技术。能够从DNA水平快速、准确地揭示亲本与子代间的遗传关系,已广泛应用于遗传分析、品种鉴定及分子标记辅助育种等领域,是鉴定植物杂交种真实性的一种可靠技术手段<sup>[6]</sup>。

近年来,许多学者也进行了象草产量及其构成因子的相关性分析,张霞等<sup>[3]</sup>对18份象草的产量和株高、分蘖、叶/茎比等生物学性状进行了分析,得出株高、叶/茎比对产量的直接影响作用最大;Rocha等<sup>[7]</sup>通过对100份象草种质资源的评价,证实了象草的干物质产量和分蘖数存在显著的遗传差异;刘伟燕等<sup>[8]</sup>对狼尾草属四个品种的生产性能进行了测定,筛选出适合在广西推广种植的品种‘桂草1号’,其株高和产量均优于对照品种‘桂牧1号’杂交象草。然而,象草杂交后代的鉴定及其产量性状综合评价相关研究少见报道。本研究以象草品种‘桂牧1号’(GM1)为母本,以F-AI象草种质为父本,进行杂交,以期获得具有双亲优良性状的后代真杂种,创制高产象草新种源,为优良新品种选育奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

**1.1.1 亲本概况** 杂交亲本‘GM1’及F-AI象草均来源于广西壮族自治区畜牧研究所,母本为‘GM1’产量高、叶量丰富,父本为F-AI茎秆直立、粗壮,抗寒性好,两个象草亲本材料在株型、叶量、分蘖等生长特性方面差异较大。

**1.1.2 杂交过程** 2021年,将杂交亲本‘GM1’和F-AI种植于四川农业大学攀枝花象草种质资源圃内,在第二年开花期采用套袋多次重复授粉法进行杂交,获得F<sub>1</sub>代种子,并于2023年4月将种子播种在培养皿中,置于25℃恒温光照培养箱中培养,光照/黑暗时间为12 h/12 h,光照强度为25 000 lx,相对湿度60%~70%;待幼苗长出2~3片真叶时,将其移栽至营养钵中;同年5月待幼苗长出8~10片真叶时逐株将其移栽至四川农业大学雅安教学科研试验基地,单株种植,株行距为0.8 m×0.6 m,最终获得800个存活单株。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 试验地概况** 试验于2024—2025年在四川省雅安市四川农业大学草业科技学院基地(30°08′N, 103°14′E)。试验地海拔高度为600 m,属于亚热带季风性湿润气候,年平均温度16.7℃,最热月均温32℃,最冷月均温5℃,极端最高气温39℃,年降雨量是1700 mm,年日照时数1019 h,无霜期280~300 d。土壤为紫色大土,土质黏重,酸性为弱酸性,pH值为4~6.5,土壤有效氮含量121.25 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量11.34 mg·kg<sup>-1</sup>,有效钾含量62.71 mg·kg<sup>-1</sup>,有机质含量33.45 mg·kg<sup>-1</sup>。

**1.2.2 观测指标** 观测期为2024年1月至2025年12月。所有指标均以单株为单位测量,每株随机选取10个分蘖测定。所有性状数据均以两年的平均值进行统计计算,性状测定方法按照NY/T 2356-2013《植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南-狼尾草属》<sup>[9]</sup>进行,相关记载标准(见表1)。

### 1.3 DNA提取以及SSR引物筛选

每份象草材料随机采集2~3片无病虫害的新鲜叶片,用无水乙醇擦拭干净叶片表面,无纺布擦干后贮藏于有硅胶的自封袋中带回实验室。采用植物基因组DNA提取试剂盒(天根生化科技有限

表 1 象草数量性状记录标准

Table 1 Recording standard of quantitative characters in *Pennisetum purpureum*

| 性状 Trait                  | 符号 Mark  | 记载标准 Definition                  |
|---------------------------|----------|----------------------------------|
| 株高 Plant height/cm        | PH (X1)  | 地面至植株的最高部位的自然高度                  |
| 叶长 Flag leaf length/cm    | LL (X2)  | 植株从下往上第 5 叶片长度                   |
| 叶宽 Flag leaf width/mm     | LW (X3)  | 植株从下往上第 5 叶片宽度                   |
| 茎粗 Internode diameter/mm  | ID (X4)  | 从基部起茎秆第 2 节的直径                   |
| 茎节数 Number of internode/节 | NI (X5)  | 目测至植株最高部位的节数                     |
| 节间长 Internode length/cm   | NL (X6)  | 倒数第 2 节与倒数第 3 节之间的长度             |
| 分蘖数 Number of tillers/个   | NT (X7)  | 每个单株分蘖的数量                        |
| 叶片数 Number of blades/片    | NB (X8)  | 目测基部至植株最高部位的叶片数                  |
| 单株鲜重 Fresh weight/kg      | FW (X9)  | 每个单株鲜草重量                         |
| 单株干重 Dry weight/kg        | DW (X10) | 每个单株选取 3 个分蘖,烘箱烘干,通过单株鲜重折算单株干草产量 |

公司)提取 DNA。并用分光光度计及 1% 的琼脂糖凝胶电泳对 DNA 的浓度与纯度进行检测。将合格 DNA 样品放置于 -20℃ 冰箱中保存备用。

从武炳超等<sup>[10]</sup>、李青遥等<sup>[11]</sup>、王成然等<sup>[12]</sup>依据象草基因序列设计的引物信息中选取了 36 对引物(见表 2)。引物由成都有康生物技术有限公司合成。以亲本 GM1、F-AI 及随机选取的 3 个杂交后代的 DNA 为模板进行引物筛选,用于下一步杂种后代的真实性鉴定。

PCR 所用 2×Taq PCR Master Mix 混合液和 2000 bp DNA Ladder Marker 均购自北京天根生化科技有限公司,反应体系总体积为 15 μL,包括模板 DNA 1.5 μL (20 ng·μL<sup>-1</sup>)、正反向引物各 0.6 μL (10 pmol·μL<sup>-1</sup>)、PCR-Mix 7.5 μL (10 ng·μL<sup>-1</sup>) 和 ddH<sub>2</sub>O 4.8 μL。PCR 反应程序为:第一步 94℃ 预变性 5 min,第二步 94℃ 变性 30 s,58~60℃ 退火 45 s,72℃ 延伸 1 min,共 35 个循环,第三步 72℃ 延伸 7 min,最后 4℃ 冰箱保存。PCR 扩增产物用 8% 聚丙烯酰胺凝胶电泳进行检测。每样品点样 2 μL,2000 bp DNALadder 为分子量标准,先 200 V 电压预电泳 30 min,而后 300 V 电压电泳 1.3 h,在 0.1% 的 AgNO<sub>3</sub> 溶液中银染,在 NaOH 溶液中显色,相机拍照保存以供分析。

#### 1.4 数据统计与分析

利用 Excel 2021 进行数据统计,求其平均值( $\bar{x}$ ),标准差(SD)以及变异系数及遗传多样性指数。利用 IBM SPSS Statistics 27 进行主成分分析(PCA);使用 Origin 2024 进行正态分布检测和相关性分析;使用 RStudio 进行聚类分析。计算 Shannon-Wiener<sup>[13]</sup>遗传多样性指数( $H'$ )各参数计算公式如下:

计算每个性状的总体平均值: $\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / n$ ,  
 $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ 。

标准差:  $SD = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n - 1}$ ,  $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ 。

Shannon-Wiener ( $H'$ )的计算公式如下:根据计算结果将每个指标划分成 10 个等级,按第 1 级  $[X_i < (\bar{X} - 2S)]$  到第 10 级  $[X_i > (\bar{X} + 2S)]$ ,每 0.5S 为 1 级。

$H' = -\sum P_i \times \ln P_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ 。

式中: $\bar{X}$ 为总体均值, $X_i$ 为总体的测量值, $n$ 为每个个体的测量值, $P_i$ 为某性状第  $i$  级别内材料分数占总份数的百分比。

根据杂种优势理论和相对遗传力分析农艺性状的遗传模型,各性状遗传参数分别以中亲优势率、超亲优势率、父母本的相对遗传力表示,各参数的计算公式如下<sup>[14]</sup>:

杂种优势的度量指标:中亲优势率 =  $(F_1 - MP) / MP \times 100\%$ ;超亲优势率 =  $(F_1 - HP) / HP \times 100\%$ ;负向超亲优势 =  $(F_1 - LP) / LP \times 100\%$ 。相对遗传力  $a_1 = (F_1 - P_2) / (P_1 - P_2)$ ,相对遗传力  $a_2 = (P_1 - F_1) / (P_1 - P_2)$ 。其中  $F_1$  为后代某一性状的均值,MP 为某一性状亲本平均值,HP 为某一性状优势亲值,LP 为某一性状低亲值, $P_1$  为大值亲本, $P_2$  为小值亲本。

隶属函数值:  $V_j = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ,  
 $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ 。

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<sup>[15]</sup>。

综合指标权重:  $H_i = G_i / \sum_{i=1}^n G_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ 。

表 2 SSR 引物信息  
Table 2 Information of SSR primers

| 引物名称 Primer name | 上游引物 Forward primer       | 下游引物 Reverse primer         |
|------------------|---------------------------|-----------------------------|
| HSSR3            | AACTCCTCTCCATCTGTTCTC     | GAACCCTAGCTTTGCACAC         |
| HSSR4            | GTAACCTGGTTCTCCTGCTTCT    | ACTAGGTTACTGCTGCTTGTG       |
| HSSR7            | AAGTACGGGTCCTCCTCTAC      | GAGAACCAGCTGAGCCTAAC        |
| HSSR14           | TAATGTAGCACTTGTCGAGGT     | CAGATGCTCTTCAAGACCTG        |
| HSSR27           | TTCTCTTCTCCAGTACACCTC     | ACTTCTGAAAAACGAACTGC        |
| HSSR34           | GGTGGTACTACCGCTACCTAT     | AGTAACACAGCAGCAGAACAT       |
| HSSR46           | CTGGATCGTGTGGTGCTA        | CAGAACCCGAGAAAAGTAAGAA      |
| HSSR50           | CTCTTCCCTCTCTCCCTCT       | ATACTCCTCTCTGGCTACTCC       |
| HSSR51           | GTCGTCCTCCTTGAACAG        | ACTACTCCTCGCTCAACATCT       |
| SSR11            | AGAGGAGACAAAGGACCTCCG     | GTCCATGGAGGACGAGCTTC        |
| SSR23            | AGGTTCTGCTTCTGGAGGTGAC    | TAGATTTGTTTCATGATGATGCGTG   |
| SSR24            | ACCACCATTCTTCAATTTCGTACT  | GAGAAGTGAGTGCTACAGGTGCAT    |
| WSSR1            | AGCATCGATAGCTTTTTTCTGCTG  | GAGGGGAGGAGAGGATGCTT        |
| WSSR2            | GCCAAGCTCTTGCTCTGTCTAT    | GGTACGGCTCTGAATATGAAATCC    |
| WSSR4            | CATGCATATATGACTTTTCCCCAA  | ATGATAAATAGGATAGCCATGCCG    |
| WSSR5            | AAAATCTCCGAATTCTCGTGCTAC  | CGGTAGAAGTCCCTGTTGTTCC      |
| WSSR7            | CTGCCCCCTTTTCATCCTCAG     | GAGACGAGGTGGTGGAGGAG        |
| WSSR9            | CGTACCTTCTCGCAATAAGGAGAT  | GAAGAAGGTTACCTCTTTCGGTA     |
| WSSR10           | CTGGCTAACACAAAACACCAAAAAG | AATCATTAATTTCATTGCACATGCC   |
| WSSR11           | AGAGGAGACAAAGGACCTCCG     | GTCCATGGAGGACGAGCTTC        |
| WSSR12           | GTCGAGGAAGTCCTTGGTGTG     | GACGAGGGGTTTCATCCACAT       |
| WSSR13           | TAGATCTGAAGAGCTCCCTCCACT  | TCTTCTAGTCACGAGCGTTTTTAC    |
| WSSR14           | GAGAAGATCAGAGGAGGGTAGCAG  | CGATGAATGCAATGCAAGCTA       |
| WSSR15           | CGATAATTCCGGTTCGGGTAT     | TCTCCACAAAATTGTTGTTGAAATTCT |
| WSSR18           | TTCAAGCCCCAACTACAAGTACACA | CCAGGCCAAAATAAACCTTGTA      |
| WSSR19           | CTCTCTTTCTCTCTCTGTTGCGTG  | CACCACACTGCTCCACCACT        |
| WSSR20           | AGCTTGCCAGCCAATCTATCTC    | CCCCTATTTGGCCCCATATTTTA     |
| WSSR23           | AGGTTCTGCTTCTGGAGGTGAC    | TAGATTTGTTTCATGATGATGCGTG   |
| WSSR24           | ACCACCATTCTTCAATTTCGTACT  | GAGAAGTGAGTGCTACAGGTGCAT    |
| WSSR25           | ATTTCTCTGGTTTTGTTCAGCTCC  | ACAGAGGTGGTATGATCGACTTGA    |
| WSSR26           | ATCTACGCACCTCAACATGGAGTA  | ATATCTTCGCAAATAGTCCCTCA     |
| WSSR27           | ACAGCACCAAGTACCAAGATTCAA  | AGCTGTCAAATATGTTTGTCCCA     |
| WSSR28           | CATACAATTCAACCCTCAACATGAA | CTACCTTACCTCCTCCTCCTCCTC    |
| WSSR29           | GCTTTCAAGTGATACAACGACACC  | CCACTCGTCCTTCAATCTCTACCT    |
| WSSR30           | CAAAGGCACATCCTTGCAGTATAG  | GAGGAATGCACATCACCAAATAAA    |
| WSSR31           | TGTGTTTTTCATCCTCAAGTGTGT  | CAAATGTAAGATGATAAATGCAGCG   |

式中: $H_i$ 为第*i*个综合指标在所有综合指标中的权重, $G_i$ 为各种质第*i*个综合指标贡献率<sup>[16]</sup>。

Z 综合评价值: $D = \sum_{i=1}^n (V_j \times H_i), i=1, 2, 3, 4 \cdots n$ 。

2 结果与分析

2.1 象草杂交 F<sub>1</sub>代杂种真实性鉴定

以亲本 DNA 以及 3 个杂交后代为模板,从 36

对 SSR 分子标记引物中,筛选出了 2 对条带清晰且重复性好的引物,分别是 SSR24 和 WSSR31。两对引物均能扩增出父、母本的特异性条带。将这 2 对引物用于象草 GM1-AI 的真杂交代鉴定,部分杂种鉴定结果如图 1,2 所示。因母本‘GM1’为高度杂合的杂交种,SSR 条带复杂,后代无法完全继承母本所有的条带,所以本研究采用共显性条带+父本特异性条带的双重鉴定标准。在 800 个杂交 F<sub>1</sub>代中,有 300 个真杂种,真杂种率为 37.5%。

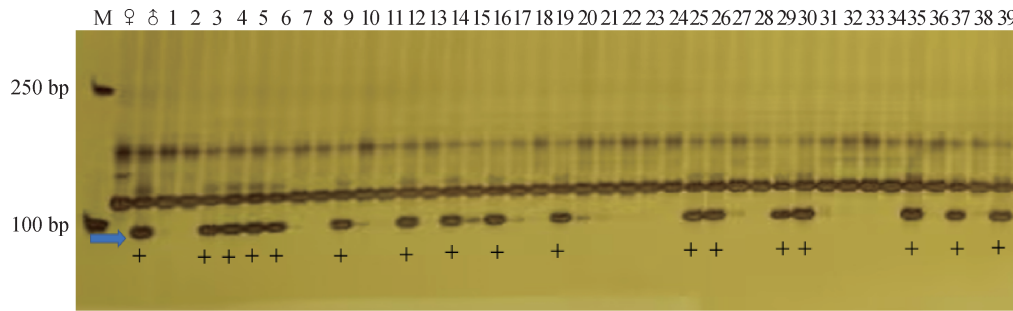


图 1 引物 WSSR31 对部分杂交后代的扩增

Fig. 1 Amplification of some hybrid progeny by primer WSSR31

注:M, 2000 bp Marker; 箭头所指条带为父本特征带“+”标注的条带为真杂种。下同

Note: M, 2000 bp Marker; The strip pointed by the arrow is the male parent ferture strip; Bands marked with ‘+’ are true hybrids. The same below

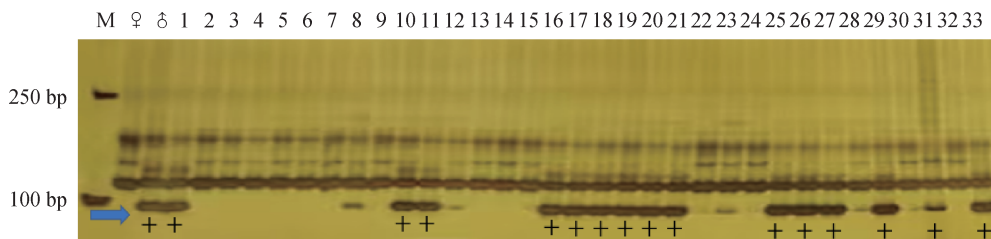


图 2 引物 SSR24 对部分杂交后代的扩增

Fig. 2 Amplification of some hybrid progeny by primer SSR24

## 2.2 杂交象草 F<sub>1</sub> 代产量及相关性状的变异分析

300 份杂交后代的 10 个产量及相关性状频率分布结果如图 3 所示, 两年的测试性状均呈正态分布, 且正态分布曲线差异较大, 表明杂交 F<sub>1</sub> 代群体中存在明显的遗传差异。10 个产量相关性状的变异系数介于 13.91%~45.58%, 平均值为 24.51%。其中, 分蘖数的变异系数最大为 45.58%; 其次是干草产量和鲜草产量, 变异系数分别为 36.63%, 32.43%; 节间长、茎节数和株高的变异系数均超过 20%, 分别为 26.84%, 22.94% 和 21.68%; 叶片数、茎粗、叶长和叶宽变异系数较小, 均在 10%~20%,

其中叶长的变异系数最小为 13.91%。这表明象草杂交群体 F<sub>1</sub> 代的产量及相关性状具有较为丰富的遗传多样性。F<sub>1</sub> 代各性状间的多样性指数范围为 1.7~2.84, 平均值为 2.042。其中, 茎粗的多样性指数最大为 2.84; 其次是节间长和叶长的多样性指数分别为 2.75 和 2.66; 株高、叶宽、叶片数和单株鲜重的多样性指数均大于 2, 分别为 2.41, 2.41, 2.33 和 2.07; 分蘖数、单株干重和茎节数的多样性指数较低, 其中茎节数的多样性指数最低为 1.37。这表明 F<sub>1</sub> 代的表型性状的分离程度较高, 筛选潜力较大(表 3)。

表 3 象草杂交后代表型性状方差和遗传多样性分析

Table 3 Phenotypic trait variance and genetic diversity analysis of new *Pennisetum purpureum* accessions

| 性状 Traits                 | 变幅 Range     | 平均值 Average | 标准差 Std. | 变异系数 CV/% | 多样性指数(H') Diversity index |
|---------------------------|--------------|-------------|----------|-----------|---------------------------|
| 分蘖数 Number of tillers/个   | 8.1~71.3     | 27.36       | 12.47    | 45.58     | 1.58                      |
| 茎节数 Number of internode/节 | 2.7~20.6     | 11.24       | 2.58     | 22.94     | 1.37                      |
| 叶片数 Number of blades/片    | 10.27~32.3   | 18.16       | 2.84     | 15.61     | 2.33                      |
| 叶长 Number of blades/片     | 52.53~115.53 | 92.30       | 12.84    | 13.91     | 2.66                      |
| 叶宽 Flag leaf width/mm     | 19.03~48.89  | 33.48       | 5.16     | 15.40     | 2.41                      |
| 茎粗 Internode diameter/mm  | 7.36~17.19   | 12.10       | 1.71     | 14.10     | 2.84                      |
| 节间长 Internode length/cm   | 2.63~16.41   | 10.55       | 2.83     | 26.84     | 2.75                      |
| 株高 Plant height/cm        | 93.48~366.73 | 253.32      | 54.91    | 21.68     | 2.41                      |
| 单株鲜草产量 Fresh weight/kg    | 0.75~13.81   | 6.14        | 1.99     | 32.43     | 2.07                      |
| 单株干草产量 Dry weight/kg      | 0.34~4.04    | 1.76        | 0.65     | 36.63     | 1.57                      |

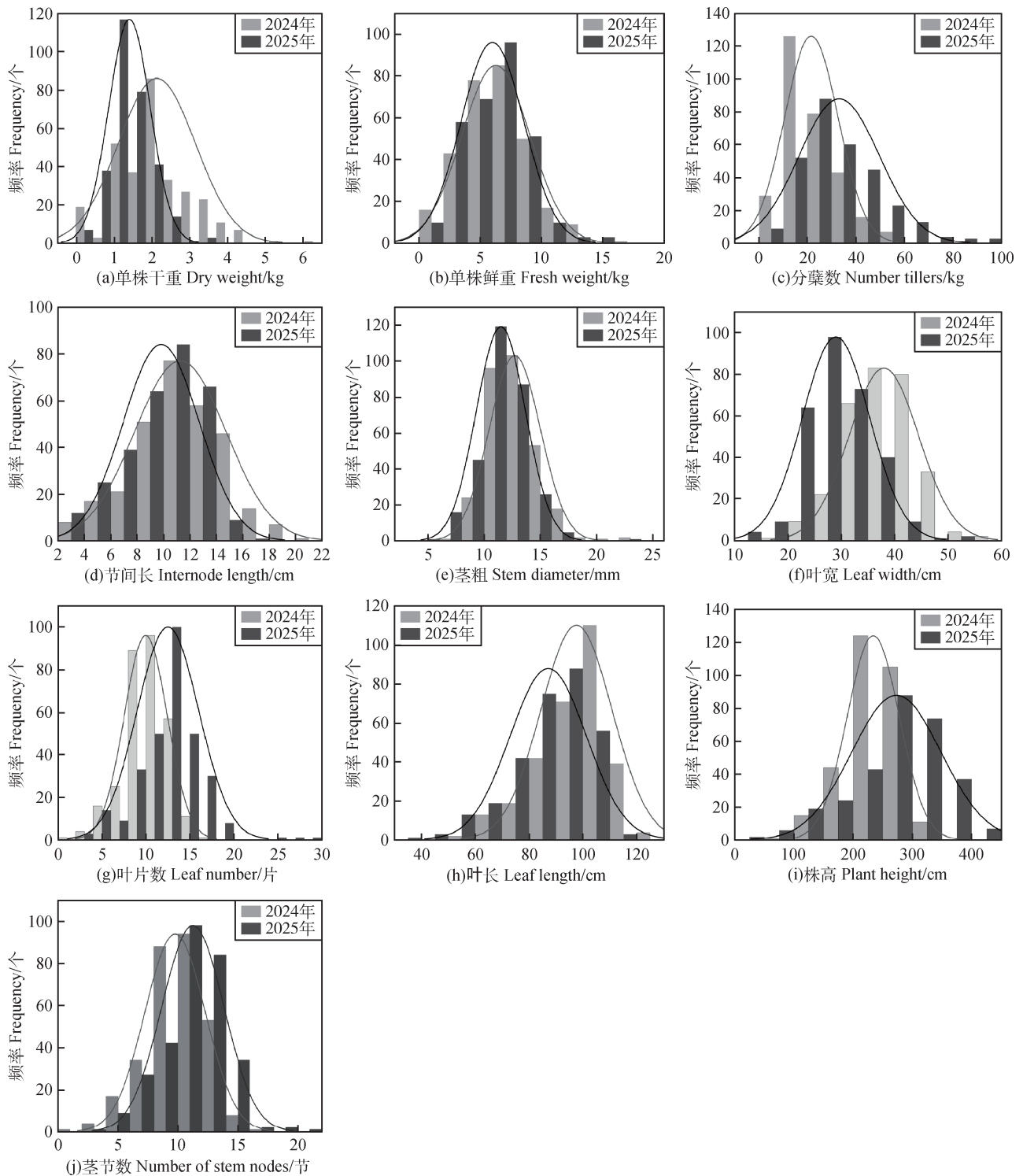


图3 300份杂交F<sub>1</sub>代产量及其相关性状正态性检测

Fig. 3 Normality testing of yield and related traits in 300 F<sub>1</sub> hybrid progenies

注:(a)单株干重;(b)单株鲜重;(c)分蘖数;(d)节间长;(e)茎粗;(f)叶宽;(g)叶片数;(h)叶长;(i)株高;(j)茎节数

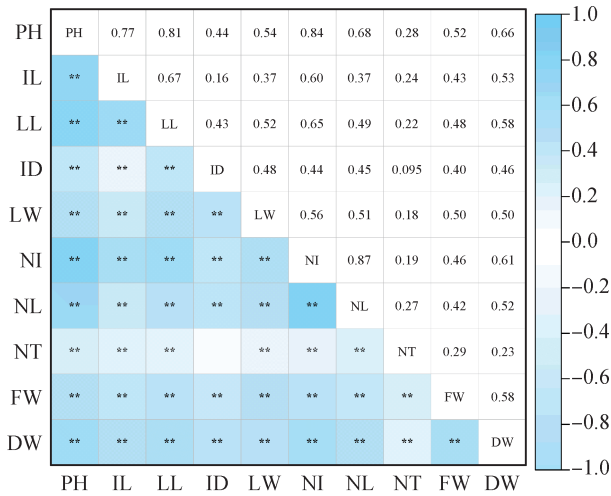
Note: (a) Dry weight; (b) Fresh weight; (c) Number of tillers; (d) Internode length; (e) Internode diameter; (f) Flag leaf width; (g) Number of blades; (h) Number of blades; (i) Plant height; (j) Number of internode

### 2.3 象草杂交F<sub>1</sub>代产量及其相关性状的相关性分析

对10个性状进行相关性分析,所有性状和草产

量都呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),除分蘖数和茎粗之间相关性不显著外,其余性状之间相关性都呈极显著水平( $P < 0.01$ )(图4)。其中,株高与鲜、干重

的相关系数最高分别为 0.55 和 0.66,其次是节间数和叶长,而分蘖数与鲜、干重的相关系数较低。



\* $P \leq 0.05$  \*\* $P \leq 0.01$

图 4 300 份杂交  $F_1$  代产量及其相关性状的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients analysis of yield and related traits in 300  $F_1$  hybrid progeni

注:PH代表株高;IL代表节间长;LL代表叶长;ID代表茎粗;LW代表叶宽;NI代表茎节数;NL代表节间长;NT代表分蘖数;FW代表单株鲜重;DW代表单株干重;\*\*表示在 0.01 水平相关

Note: PH=plant height; IL=internode length; LL=leaf length; ID=stem diameter; LW=leaf width; NI=number of stem nodes; NL=internode length; NT=number of tillers; FW=fresh weight per plant; DW=dry weight per plant; \*\*indicates significant correlation at the 0.01 level

## 2.4 象草杂交 $F_1$ 代产量及其相关性状的聚类分析

将亲本和 300 份杂交  $F_1$  代材料进行聚类分析,可将供试材料分为 4 类(图 5),第 I 类群包含 94 份材料,占整个群体的 31.1%;第 II 类群包含 41 份材料,占整个群体的 13.6%,第 III 类群包含 92 份材料,占整个群体的 30.5%,第 IV 类群包含 75 份材料,占整个群体的 24.8%。其中,第 III 类群的所有性状均高

于其他三个类群,是综合性状最好的类群,其中株高达到 300.13 cm,显著高于另外三个类群,具有明显的高秆优势,同时分蘖数为 32.95 个也显著高于另外三个类群,实现了“高秆”与“多分蘖”的协同提升;第 II 类群除分蘖数外,其他性状都明显低于其他三个类群,是四个类群中综合性状最差的;第 I 类群和第 IV 类群的综合性状表现中等,介于第 III 和第 II 类群之间(表 4)。

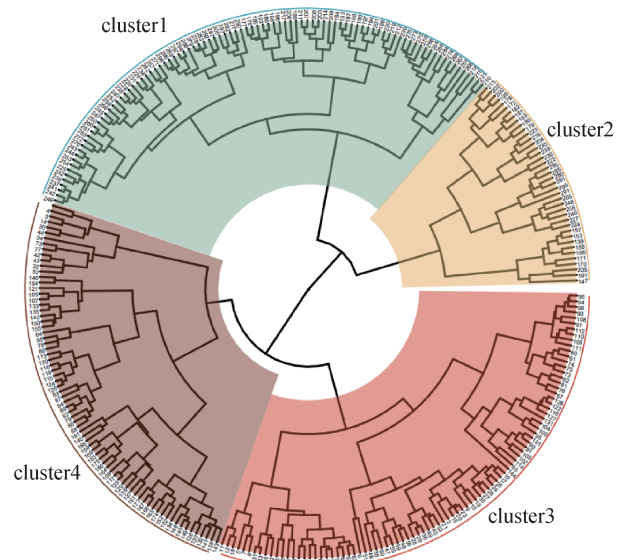


图 5 亲本及 300 份杂交  $F_1$  代产量及其相关性状的聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of parents and 300  $F_1$  hybrid progenies based on yield and related traits

## 2.5 象草杂交 $F_1$ 代产量及其相关性状的杂种优势分析

相对遗传力是亲本平均表现型值( $P_1, P_2$ )对子代平均表现型值( $F_1$ )的决定程度,即父母本传递遗传特性的相对强度<sup>[17]</sup>。由表 5 可知,  $F_1$  代中,株高、节间长、叶长、茎粗和单株干重 5 个性状表现为正向显性,表明了母本在这 5 个性状中的相对遗传力强于父本;茎节数和分蘖数 2 个性状表现为负向显性,

表 4 不同类群产量及其相关性状表现

Table 4 Yield and related trait performance of different groups

| 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 |
|---------------------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| 株高 Plant height/cm        | 265.30±29.08     | 218.19±62.15       | 300.13±29.19         | 239.39±54.52       |
| 节间长 Internode length/cm   | 10.33±1.92       | 8.69±2.79          | 12.81±1.79           | 10.31±2.78         |
| 叶长 Flag leaf length/cm    | 94.00±8.48       | 82.70±15.94        | 101.52±6.41          | 91.31±14.91        |
| 茎粗 Internode diameter/mm  | 12.15±1.61       | 11.39±2.10         | 12.73±1.58           | 12.01±1.91         |
| 叶宽 Flag leaf width/mm     | 33.36±4.60       | 30.26±4.99         | 36.78±4.30           | 31.78±5.67         |
| 茎节数 Number of internode/节 | 11.79±1.53       | 9.88±2.69          | 13.10±1.96           | 10.42±2.59         |
| 叶片数 Number of blades/片    | 18.41±1.78       | 16.78±2.93         | 19.88±2.64           | 17.40±3.26         |
| 分蘖数 Number of tillers/个   | 25.70±11.29      | 24.61±10.19        | 32.95±12.79          | 26.37±12.64        |
| 单株鲜重 Fresh weight/kg      | 5.51±1.47        | 4.75±1.66          | 7.72±1.84            | 6.26±1.73          |
| 单株干重 Dry weight/kg        | 1.71±0.53        | 1.36±0.51          | 2.20±0.61            | 1.73±0.64          |

表明了父本在这 2 个性状中的相对遗传力强于母本;叶宽和单株鲜重的相对遗传力 a<sub>1</sub> 表现为正向显性,相对遗传力 a<sub>2</sub> 表现为负向显性,而叶片数的表现刚好相反。

表 5 F<sub>1</sub>代产量及相关性状与亲本相对遗传力分析

Table 5 Analysis of relative heritability of F<sub>1</sub> generation yield and related traits to parents

| 性状<br>Trait               | 母本<br>Female | 父本<br>Male | F <sub>1</sub> | P1-P2  | F <sub>1</sub> -P2 | 相对遗传力 a <sub>1</sub> /<br>Relative heritability a <sub>1</sub> | 相对遗传力 a <sub>2</sub> /<br>Relative heritability a <sub>2</sub> | 子代表现<br>Offspring performance  |
|---------------------------|--------------|------------|----------------|--------|--------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 株高 Plant height/cm        | 277.64       | 141.87     | 253.32         | 135.77 | 111.45             | 0.82                                                           | 0.18                                                           | 正向显性 Positive dominance        |
| 节间长 Internode length/cm   | 11.91        | 3.94       | 10.55          | 7.97   | 6.61               | 0.83                                                           | 0.17                                                           | 正向显性 Positive dominance        |
| 叶长 Flag leaf length/cm    | 103.06       | 62.43      | 92.30          | 40.63  | 29.87              | 0.74                                                           | 0.26                                                           | 正向显性 Positive dominance        |
| 茎粗 Internode diameter/mm  | 10.75        | 10.75      | 12.10          | 2.60   | 1.35               | 0.52                                                           | 0.48                                                           | 正向显性 Positive dominance        |
| 叶宽 Flag leaf width/mm     | 32.25        | 29.53      | 33.48          | 2.72   | 3.95               | 1.45                                                           | -0.45                                                          | 遗传特性较复杂 Complex genetic traits |
| 茎节数 Number of internode/节 | 19.07        | 10.00      | 11.24          | 8.07   | 1.24               | 0.15                                                           | 0.85                                                           | 负向显性 Positive dominance        |
| 叶片数 Number of blades/片    | 25.30        | 18.67      | 18.16          | 6.63   | -0.51              | -0.08                                                          | 1.08                                                           | 遗传特性较复杂 Complex genetic traits |
| 分蘖数 Number of tillers/个   | 37.30        | 18.00      | 27.36          | 19.30  | 9.36               | 0.48                                                           | 0.52                                                           | 负向显性 Negative dominance        |
| 单株鲜重 Fresh weight/kg      | 5.60         | 1.50       | 6.14           | 4.10   | 4.64               | 1.13                                                           | -0.13                                                          | 遗传特性较复杂 Complex genetic traits |
| 单株干重 Dry weight/kg        | 2.16         | 1.03       | 1.76           | 1.14   | 0.73               | 0.64                                                           | 0.36                                                           | 正向显性 Positive dominance        |

计算 F<sub>1</sub>代每个性状的优势率,有利于更好地了解 F<sub>1</sub>代的杂种优势主要表现在哪些方面。从表 6 中可知,F<sub>1</sub>代的产量及相关性状表现多为正向的杂种优势,其中株高、节间长、叶长、茎粗和单株干重表现为中亲优势,叶宽和单株鲜重表现为超亲优势;而茎节数、叶片数和分蘖数表现为负向中亲。

表 6 杂交 F<sub>1</sub>代各产量及相关性状优势率

Table 6 Analysis of relative heritability of F<sub>1</sub> generation of hybrids

| 性状<br>Trait               | 低亲值<br>LP | 中亲值<br>MP | 高亲值<br>HP | F <sub>1</sub> | 中亲优势率<br>RH <sub>m</sub> /% | 超亲优势率<br>RH <sub>b</sub> /% | F <sub>1</sub> 优势表现<br>F <sub>1</sub> advantage performance |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 株高 Plant height/cm        | 141.87    | 209.75    | 277.64    | 253.32         | 20.8                        | -8.8                        | 中亲 Mid-parent                                               |
| 节间长 Internode length/cm   | 3.94      | 7.93      | 11.91     | 10.55          | 33.1                        | -11.5                       | 中亲 Mid-parent                                               |
| 叶长 Flag leaf length/cm    | 62.43     | 82.75     | 103.06    | 92.30          | 11.5                        | -10.4                       | 中亲 Mid-parent                                               |
| 茎粗 Internode diameter/mm  | 10.75     | 12.05     | 13.35     | 12.10          | 0.50                        | -9.3                        | 中亲 Mid-parent                                               |
| 叶宽 Flag leaf width/mm     | 29.53     | 30.89     | 32.25     | 33.48          | 8.4                         | 3.8                         | 超亲 Heterosis                                                |
| 茎节数 Number of internode/节 | 10.00     | 14.03     | 18.07     | 11.24          | -19.9                       | -37.8                       | 负向中亲 Negative mid-parent                                    |
| 叶片数 Number of blades/片    | 18.67     | 21.98     | 25.30     | 18.16          | -17.4                       | -28.2                       | 负向中亲 Negative mid-parent                                    |
| 分蘖数 Number of tillers/个   | 18.00     | 27.65     | 37.30     | 27.36          | -1.1                        | -26.7                       | 负向中亲 Negative mid-parent                                    |
| 单株鲜重 Fresh weight/kg      | 1.50      | 3.55      | 5.60      | 6.14           | 72.9                        | 9.6                         | 超亲 Heterosis                                                |
| 单株干重 Dry weight/kg        | 1.03      | 1.59      | 2.16      | 1.76           | 10.3                        | -18.7                       | 中亲 Mid-parent                                               |

2.6 象草杂交 F<sub>1</sub>代产量及其相关性状的主成分分析及综合评价

对 300 个杂交 F<sub>1</sub>代的产量及其相关性状进行主成分分析,根据特征值大于 1 的原则,筛选出了 2 个主成分,累计贡献率为 64.819%,可近似代表象草 GM1-AI 杂交 F<sub>1</sub>代 10 个性状的遗传变异信息。第一主成分特征值及贡献率分别为 5.466 和 54.657%,其中干重和株高的特征向量值分别为 0.191 和 0.168。第二主成分特征值为 1.016,贡献率为 10.162%,其中分蘖数和节间长的特征向量值较大,分别为 0.509 和 0.466(表 7)。

利用主成分分析对亲本以及 300 个杂交后代进行综合评价,并根据指标的权重进一步计算各单株的 Z 值,Z 值排名为前 15 的优秀单株,亲本及后 15

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 Element |        |
|--------------------------------------|------------|--------|
|                                      | 1          | 2      |
| 分蘖数 Number of tillers/个              | 0.064      | 0.509  |
| 茎节数 Number of internode/节            | 0.161      | -0.056 |
| 叶片数 Number of blades/片               | 0.142      | -0.169 |
| 叶长 Number of blades/片                | 0.15       | 0.135  |
| 叶宽 Flag leaf width/mm                | 0.129      | -0.286 |
| 茎粗 Internode diameter/mm             | 0.107      | -0.591 |
| 节间长 Internode length/cm              | 0.132      | 0.466  |
| 株高 Plant height/cm                   | 0.168      | 0.157  |
| 单株鲜草产量 Fresh weight/kg               | 0.126      | -0.016 |
| 单株干草产量 Dry weight/kg                 | 0.191      | -0.035 |
| 特征值 Eigenvalue                       | 5.466      | 1.016  |
| 贡献率 Contribution rate/%              | 54.657     | 10.162 |
| 累计贡献率 Cumulative contribution rate/% | 54.657     | 64.819 |

的材料如表 8 所示,Z 值介于 0.06~0.93 之间,其中 Z 值最小为 0.06。亲本 GM1 和 F-AI 的 Z 值分别为 ♀G1-♂ AI 51 的 Z 值最大为 0.93;♀G1-♂ AI 205 的 0.74 和 0.19。

表 8 综合评价排名  
Table 8 Comprehensive evaluation ranking

| 材料名称<br>Name | 株高<br>PH | 节间长<br>IL | 叶长<br>LL | 茎粗<br>ID | 叶宽<br>LW | 茎节数<br>NI | 叶片数<br>NL | 分蘖<br>NT | 单株鲜重<br>FW | 单株干重<br>DW | Z    | 排名<br>Pank |
|--------------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|------------|------------|------|------------|
| ♀G1-♂ AI 51  | 363.22   | 14.39     | 111.89   | 14.80    | 45.67    | 15.57     | 22.30     | 56.70    | 8.91       | 4.04       | 0.93 | 1          |
| ♀G1-♂ AI 144 | 342.99   | 12.10     | 112.18   | 12.98    | 35.43    | 14.67     | 21.83     | 64.70    | 10.24      | 3.00       | 0.85 | 2          |
| ♀G1-♂ AI 2   | 327.59   | 13.63     | 112.23   | 15.97    | 42.46    | 15.57     | 22.30     | 42.20    | 11.54      | 2.76       | 0.85 | 3          |
| ♀G1-♂ AI 91  | 334.44   | 14.31     | 99.07    | 14.44    | 41.25    | 16.47     | 22.90     | 51.20    | 8.18       | 3.06       | 0.84 | 4          |
| ♀G1-♂ AI 23  | 339.74   | 14.41     | 104.65   | 14.15    | 40.49    | 15.17     | 21.90     | 44.70    | 8.68       | 3.14       | 0.83 | 5          |
| ♀G1-♂ AI 20  | 334.24   | 15.83     | 106.72   | 13.36    | 40.55    | 14.27     | 21.90     | 48.60    | 7.81       | 2.65       | 0.82 | 6          |
| ♀G1-♂ AI 6   | 366.73   | 15.14     | 104.44   | 14.26    | 37.67    | 14.10     | 21.17     | 51.60    | 7.33       | 2.81       | 0.82 | 7          |
| ♀G1-♂ AI 9   | 299.29   | 13.01     | 113.60   | 12.79    | 37.49    | 19.80     | 32.20     | 36.30    | 6.69       | 1.63       | 0.82 | 8          |
| ♀G1-♂ AI 27  | 311.53   | 13.79     | 103.79   | 12.81    | 40.48    | 15.60     | 22.43     | 36.90    | 10.79      | 2.74       | 0.80 | 9          |
| ♀G1-♂ AI 95  | 321.17   | 11.64     | 105.35   | 13.80    | 48.53    | 20.60     | 32.10     | 10.70    | 7.16       | 2.14       | 0.80 | 10         |
| ♀G1-♂ AI 100 | 325.38   | 13.74     | 104.29   | 14.20    | 38.09    | 14.67     | 21.67     | 19.80    | 11.51      | 3.71       | 0.79 | 11         |
| ♀G1-♂ AI 15  | 337.14   | 14.64     | 101.65   | 13.43    | 40.34    | 13.07     | 19.93     | 49.90    | 8.46       | 2.88       | 0.79 | 12         |
| ♀G1-♂ AI 46  | 320.23   | 14.60     | 109.12   | 15.19    | 46.39    | 12.60     | 19.60     | 26.30    | 13.41      | 2.39       | 0.79 | 13         |
| ♀G1-♂ AI 55  | 344.40   | 11.76     | 99.39    | 15.42    | 37.25    | 14.93     | 21.77     | 25.80    | 11.89      | 3.60       | 0.78 | 14         |
| ♀G1-♂ AI 101 | 335.14   | 14.89     | 95.57    | 12.85    | 39.23    | 16.63     | 23.80     | 36.70    | 7.54       | 2.35       | 0.78 | 15         |
| GM1♀         | 277.64   | 11.91     | 103.06   | 10.75    | 32.25    | 18.07     | 25.30     | 37.30    | 5.60       | 2.16       | 0.74 | 25         |
| F-AI♂        | 141.87   | 3.94      | 62.43    | 13.35    | 29.53    | 10.00     | 18.67     | 18.00    | 1.50       | 1.03       | 0.19 | 292        |
| ♀G1-♂ AI 171 | 138.55   | 11.14     | 56.99    | 9.79     | 23.86    | 7.67      | 11.43     | 8.10     | 4.55       | 1.63       | 0.22 | 287        |
| ♀G1-♂ AI 227 | 135.67   | 5.72      | 62.87    | 7.49     | 28.70    | 5.07      | 12.00     | 49.20    | 4.64       | 0.86       | 0.21 | 288        |
| ♀G1-♂ AI 34  | 125.45   | 3.11      | 58.24    | 12.61    | 25.79    | 9.00      | 19.27     | 18.60    | 7.34       | 1.10       | 0.21 | 289        |
| ♀G1-♂ AI 224 | 148.89   | 4.40      | 67.34    | 9.78     | 28.59    | 6.07      | 14.27     | 30.70    | 4.54       | 1.03       | 0.20 | 290        |
| ♀G1-♂ AI 291 | 146.21   | 4.74      | 71.90    | 11.19    | 32.64    | 5.03      | 14.47     | 31.90    | 3.19       | 0.95       | 0.20 | 291        |
| ♀G1-♂ AI 158 | 120.60   | 4.28      | 52.53    | 10.19    | 22.86    | 6.73      | 16.30     | 28.50    | 7.34       | 1.24       | 0.19 | 293        |
| ♀G1-♂ AI 157 | 144.62   | 4.28      | 66.48    | 11.26    | 26.36    | 7.27      | 18.13     | 12.80    | 3.13       | 1.38       | 0.19 | 294        |
| ♀G1-♂ AI 43  | 166.52   | 8.08      | 70.06    | 10.79    | 26.79    | 4.83      | 11.40     | 10.50    | 4.51       | 0.81       | 0.18 | 295        |
| ♀G1-♂ AI 191 | 128.42   | 5.22      | 59.19    | 8.93     | 31.18    | 7.63      | 13.70     | 20.90    | 4.54       | 0.83       | 0.17 | 296        |
| ♀G1-♂ AI 246 | 142.21   | 5.76      | 80.13    | 9.54     | 25.63    | 4.60      | 12.73     | 30.70    | 0.75       | 0.83       | 0.17 | 297        |
| ♀G1-♂ AI 255 | 129.45   | 3.54      | 62.94    | 11.71    | 25.39    | 7.60      | 14.80     | 37.00    | 3.56       | 0.34       | 0.16 | 298        |
| ♀G1-♂ AI 153 | 134.78   | 3.17      | 60.62    | 12.78    | 29.92    | 6.47      | 16.83     | 14.00    | 4.31       | 1.19       | 0.15 | 299        |
| ♀G1-♂ AI 156 | 118.17   | 4.38      | 58.13    | 11.21    | 24.68    | 6.43      | 14.97     | 14.30    | 4.80       | 1.06       | 0.13 | 300        |
| ♀G1-♂ AI 147 | 93.48    | 3.52      | 53.47    | 11.82    | 22.26    | 4.43      | 14.37     | 44.50    | 4.21       | 0.75       | 0.11 | 301        |
| ♀G1-♂ AI 205 | 101.46   | 2.63      | 59.02    | 10.52    | 28.90    | 2.73      | 10.47     | 21.70    | 4.59       | 0.90       | 0.06 | 302        |

### 3 讨论

#### 3.1 杂交 F<sub>1</sub> 代产量及其相关性状的变异及遗传多样性分析

产量是评价饲草品种生产性能的重要指标<sup>[18]</sup>,而高产的形成并非依赖于单一性状,而是多个相关性状协同作用的结果。因此,通过对杂交后代的产量及其相关性状进行遗传变异和多样性分析,可对杂交后代种质资源的遗传变异丰富度和选育的潜力有初步的判断。本研究发现,GM1-AI 杂交 F<sub>1</sub> 代的产量及其相关性状存在较大的遗传变异,10 个性状的变异系数在 13.91%~45.58%,平均值为 24.51%,这与郭娟等<sup>[19]</sup>关于黑麦种间杂交后代表型性状的研究结果一致。10 个性状的多样性指数

的范围在 1.7~2.84,平均值为 2.042。值得注意的是,各性状的变异系数和多样性指数的变化趋势是不一致的,比如分蘖数和单株干重的变异系数分别为 45.58% 和 36.63% 都远高于平均值,但其多样性指数分别是 1.58 和 1.57,远低于平均值,这说明 GM1-AI 的 F<sub>1</sub> 代中变异范围很大且变异分布不均,这一现象与火艳等<sup>[20]</sup>对石榴的研究中的情况类似。这表明本研究的 F<sub>1</sub> 代群体有筛选优良单株的潜力,可为后续新品种的选育提供基础。

#### 3.2 象草杂交 F<sub>1</sub> 代产量及其相关性状杂种优势分析

杂种优势是生物界的一种普遍现象,而杂交育种和杂种优势的利用也是许多作物遗传育种的重

要方法和途径<sup>[21]</sup>。自杂种优势被提出以来,在苜蓿<sup>[22]</sup>、披碱草<sup>[23]</sup>等牧草中得到了广泛应用。本研究利用亲本和F<sub>1</sub>代产量及相关性状数据进行了相对遗传力分析和杂种优势比较。呈现典型的母系遗传模式,并且因母本‘GM1’是多代选育的优良杂交品种,核基因组已聚合多个优异的等位基因,因此在杂种遗传背景中占主导地位。从F<sub>1</sub>代相对遗传力来比较,母本‘GM1’大部分性状的相对遗传力都强于父本,这从表型上证明了F<sub>1</sub>代与‘GM1’更近,聚类分析也表明,F<sub>1</sub>代与母本GM1距离较近,聚类结果同遗传趋势分析一致。这与刘嘉伟等<sup>[24]</sup>关于三叶草杂种F<sub>1</sub>代表型遗传变异研究的结果一致。

### 3.3 象草杂交F<sub>1</sub>代优良单株初步筛选

牧草产量的影响因子主要集中在株高、茎节数、茎节长等相关性状上<sup>[25-26]</sup>,其中株高是反映牧草生长情况和评价其是否高产的重要指标之一<sup>[27-28]</sup>。本研究也证明了其他产量相关性状与产量都呈极显著正相关,相关系数排序中株高排名第一,这与前人的研究结果一致。通过主成分分析结果发现,株高、干重、分蘖数和节间长是导致杂交F<sub>1</sub>代差异明显的主要因素,结合聚类分析的结果来看,综合性状最好的第Ⅲ类群与综合性状最差的第Ⅱ类群比较,株高、干重、分蘖数和节间长这四个性状在两个类群间的差异也是十分明显的,这表明本群体的高产材料并非依靠“高秆抑制分蘖”或者“分蘖抑制高秆”,而是实现了株高和分蘖协同提升。其中,干重作为对群体变异贡献最大的指标,还说明了此群体可能具有研究木质素遗传调控的潜力。本研究根据综合评价的Z值排名筛选出了15份排名靠前的优异材料和15份排名靠后的差异材料,其中排名前15的材料都属于综合性状最好的第Ⅲ类群,排名后15的材料中有13份材料都属于综合性状最差的第Ⅱ类群,综合评价结果与聚类分析结果基本一致,不同分析方法的相互验证,说明了筛选结果是可靠的,排名前15的材料可作为初步筛选的高产象草新材料。

## 4 结论

供试的象草GM1-AI杂交F<sub>1</sub>代群体的产量及其相关性状具有丰富的遗传多样性,所有相关性状都与单株草产量呈极显著正相关。结合主成分分

析和模糊函数综合评价Z值,再以聚类分析作为验证,初步筛选出了15份综合性状优良且超过亲本的材料,这些材料具有进一步选育的潜力。

### 参考文献

- [1] 陈晓,陈美秀. 象草青贮技术及其在动物应用中的研究进展[J]. 现代畜牧科技,2024(5):71-74  
CHEN X, CHEN M X. Research progress on elephant grass silage processing and its application in animal production [J]. Modern Animal Husbandry Science & Technology, 2024(5):71-74
- [2] XIE H D, PENG L J, LI M W, et al. Effects of mixed sugar-cane tops and napiergrass silages on fermentative quality, nutritional value, and milk yield in water buffaloes [J]. Animal Science Journal, 2023, 94(1):e13824
- [3] 张霞,顾洪如,丁成龙,等. 象草若干生物学性状与产量的关系分析[J]. 草地学报,2009,17(5):670-674  
ZHANG X, GU H R, DING C L, et al. Relation analysis between yield and morphological traits in Pennisetum purpureum schum [J]. Acta Agrestis Sinica, 2009, 17(5):670-674
- [4] 张献芳,聂刚,黄思源,等. 基于SSR标记的象草F<sub>1</sub>代杂种分子鉴定及表型变异分析[J]. 草业学报,2025,34(11):114-124  
ZHANG X F, NIE G, HUANG S Y, et al. Identification of hybrids and analysis of phenotypic variation in the F<sub>1</sub> generation of Pennisetum purpureum based on SSR markers [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(11):114-124
- [5] 亓雯雯,马红媛,李亚晓,等. 优质牧草新品种选育方法研究进展[J]. 草业学报,2024,33(6):187-202  
QI W W, MA H Y, LI Y X, et al. Progress in research on breeding methods to produce new, high-quality forage varieties [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(6):187-202
- [6] 苏聪聪,金燕,徐丰,等. 利用SSR分子标记鉴定刺葡萄F<sub>1</sub>代杂种[J]. 江苏农业科学,2018,46(17):35-38  
SU C C, JIN Y, XU F, et al. Identification of F<sub>1</sub> hybrids of Vitis davidii Foex using SSR molecular markers [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(17):35-38
- [7] DO AMARAL SANTOS DE CARVALHO ROCHA J R, MACHADO J C, CARNEIRO P C S, et al. Bioenergetic potential and genetic diversity of elephantgrass via morpho-agronomic and biomass quality traits [J]. Industrial Crops and Products, 2017, 95:485-492
- [8] 刘伟燕,梁源春,刘婕,等. 不同品种狼尾草的田间栽培比较试验[J]. 广西畜牧兽医,2017,33(4):173-175  
LIU W Y, LIANG Y C, LIU J, et al. Comparative experiment on field cultivation of different varieties of Pennisetum [J]. Guangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2017, 33(4):173-175
- [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. 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-Pennisetum: NY/T 2356-2013. Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [10] 武炳超, 张欢, 童磊, 等. 象草不同辐射剂量诱变系表型及遗传变异研究[J]. 草业学报, 2018, 27(11): 77-86
- WU B C, ZHANG H, TONG L, et al. Research on genetic and phenotypic differences of *Pennisetum purpureum* mutants generated by irradiation[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(11): 77-86
- [11] 李青遥, 刘婷, 张曙恒, 等. 美洲狼尾草 Survey 测序及其 gSSR 分子标记的开发应用[J]. 分子植物育种, 2019, 17(16): 5375-5382
- LI Q Y, LIU T, ZHANG S H, et al. Development and application of survey sequencing and gSSR molecular marker of *Pennisetum glaucum*[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(16): 5375-5382
- [12] 王成然. 基于象草 Survey 测序的 G-SSR 分子标记开发与应用[D]. 成都: 四川农业大学, 2019: 9
- WANG C R. Development and Application of G-SSR Molecular Markers Based on Genome Survey Sequencing of *Pennisetum purpureum* [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019: 9
- [13] 常利芳, 李欣, 郭慧娟, 等. 小偃麦衍生系表型遗传多样性分析及综合评价[J]. 草业学报, 2022, 31(11): 61-74
- CHANG L F, LI X, GUO H J, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of octoploid *Triticum aestivum* derived wheat breeding lines based on agronomic traits[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(11): 61-74
- [14] 裴新澍. 通径系数与相对遗传力的比较分析[J]. 遗传, 1982, 4(2): 28-30
- PEI X S. A comparative analysis between the path coefficient and relative heritability[J]. *Hereditas*, 1982, 4(2): 28-30
- [15] 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 & Pasture Science*, 2010, 61(8): 609-618
- [16] 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
- [17] GUO Y D, LIU L Y, YUE Y S, et al. Development of SSR markers based on transcriptome sequencing and verification of their conservation across species of ornamental *Pennisetum* rich. (Poaceae)[J]. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1683-1683
- [18] 杜红旗, 冯长松, 吕先召, 等. 87 个苜蓿品种草产量及其相关农艺性状评价分析[J]. 家畜生态学报, 2025, 46(5): 90-99
- DU H Q, FENG C S, LÜ X Z, et al. Evaluation and analysis of grass yield and related agronomic traits of 87 alfalfa varieties[J]. *Acta Ecologicae Animalis Domastici*, 2025, 46(5): 90-99
- [19] 郭娟, 魏莱, 杨燕萍, 等. 黑麦种间杂交 F1 代杂种优势及表型变异分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(1): 86-90
- GUO J, WEI L, YANG Y P, et al. Analysis of heterosis and phenotypic variation for F1 progeny of interspecific hybridization of rye[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(1): 86-90
- [20] 火艳, 招雪晴, 黄厚毅, 等. 观赏石榴表型遗传多样性分析[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(5): 939-949
- HUO Y, ZHAO X Q, HUANG H Y, et al. Phenotypic genetic diversity of ornamental pomegranate cultivars[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, 37(5): 939-949
- [21] PARIMALA K, BHADRU D, RAJU C S. Combining ability and heterosis studies for grain yield and its components in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 2018, 9(1): 244
- [22] 杨婕. 苜蓿杂交亲本选择及其杂种 F1 苗期生长优势分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021: 44-37
- YANG J. Selection of parents of *Medicago* hybridization and analysis of growth superiority in F1 seedling stage [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021: 44-37
- [23] 贾学宇. 披碱草属种间杂种 F1 抗旱性生理评价及 DNA 甲基化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022: 11-34
- JIA X Y. Physiological evaluation of drought resistance and DNA methylation of F1 interspecific hybrids [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022: 11-34
- [24] 刘嘉伟, 郝新艳, 杜雨芊, 等. 高加索三叶草与白三叶杂种 F1 代表型遗传变异研究[J]. 中国草地学报, 2024, 46(8): 37-44
- LIU J W, HAO X Y, DU Y Q, et al. Studies on phenotypic genetic variation of F1 hybrids of *Trifolium ambiguum* bieb. and *T. Repens* L [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(8): 37-44
- [25] 白玉龙, 李志明, 赵建平, 等. 紫花苜蓿品种比较试验[J]. 内蒙古草业, 2010, 22(1): 55-59
- BAI Y L, LI Z M, ZHAO J P, et al. Comparative experiment of alfalfa varieties[J]. *Inner Mongolia Prataculture*, 2010, 22(1): 55-59
- [26] LIANG G H L, RIEDL W A. Agronomic traits influencing forage and seed yield in alfalfa[J]. *Crop Science*, 1964, 4(4): 394-396
- [27] LLOVERAS J, FERRAN J, ALVAREZ A, et al. Harvest management effects on alfalfa (*Medicago sativa* L.) production and quality in Mediterranean areas[J]. *Grass and Forage Science*, 1998, 53(1): 88-92
- [28] SENGUL S. Yield components, morphology and forage quality of native alfalfa ecotypes[J]. *Journal of Biological Sciences*, 2002, 2(7): 494-498

(责任编辑 刘婷婷)