

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.020

引用格式:孙绮璐,马杰宇,彭燕,等.不同狼尾草种质资源田间抗寒性鉴定与综合评价[J].草地学报,2026,34(9):3365—3373

SUN Qi-lu, MA Jie-yu, PENG Yan, et al. Field Cold Resistance Identification and Comprehensive Evaluation of Different *Pennisetum* Resources[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3365—3373

不同狼尾草种质资源田间抗寒性鉴定与综合评价

孙绮璐¹, 马杰宇¹, 彭燕¹, 聂刚¹, 穷达², 张新全^{1*}

(1. 四川农业大学草业科技学院, 四川 成都 610000; 2. 西藏自治区阿里地区改则县农业农村和科技水利局农技推广站, 西藏 改则 859200)

摘要:为筛选狼尾草属(*Pennisetum*)抗寒种质资源,明确不同种质的抗寒性差异,为抗寒育种提供理论依据。本研究以118份狼尾草种质为材料,通过田间低温胁迫处理,对8个抗寒相关指标进行测定与综合评价。结果表明,供试种质抗寒相关性状遗传多样性丰富,可为抗寒育种提供充足的遗传基础。叶绿素含量与返青截根苗数、茎秆含糖量显著相关,是影响狼尾草抗寒差异的关键因素。主成分分析结果将8个指标归纳为4个主成分,累计贡献率达80.924%,核心指标为低温胁迫后叶绿素下降值、低温叶绿素含量、返青截根苗数、茎秆含糖量。基于聚类分析将所有种质划分为3个类群,结合隶属函数法筛选出Pp20230630-3, Pp20230628-5, Pp014等30份抗寒优异种质。本研究为狼尾草抗寒种质创新与新品种选育提供重要材料与理论依据。

关键词:狼尾草种质资源;低温胁迫;抗寒性评价;隶属函数

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3365-09

Field Cold Resistance Identification and Comprehensive Evaluation of Different *Pennisetum* Resources

SUN Qi-lu¹, MA Jie-yu¹, PENG Yan¹, NIE Gang¹, QIONG Da², ZHANG Xin-quan^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan Province 610000, China;

2. Agricultural Technology Extension Station, Agriculture, Rural Affairs, Science, Technology and Water Resources Bureau of Gerze County, Ngari Prefecture, Gerze, Xizang 859200, China)

Abstract: To screen cold-tolerant germplasm resources of *Pennisetum*, clarify the cold resistance differences among different germplasms, and provide a theoretical basis for cold resistance breeding, 118 *Pennisetum* germplasm resources were used as experimental materials in this study, and comprehensive evaluation of cold resistance was carried out via field low-temperature stress treatment combined with eight cold resistance-related indicators. The results revealed that the cold resistance-related traits of the tested germplasms possessed abundant genetic diversity, which could provide sufficient genetic basis for cold resistance breeding. Chlorophyll content was significantly correlated with regrowth seedling number and stem sugar content, serving as key factors affecting cold resistance differences among *Pennisetum* germplasms. Principal component analysis simplified eight indicators into four principal components with a cumulative contribution rate of 80.924%, with chlorophyll reduction value after low-temperature stress, chlorophyll content under low temperature, regrowth seedling number and stem sugar content identified as the core indicators. Based on cluster analysis, all the germplasms were classified into three groups, and a total of 30 excellent cold-resistant germplasms including Pp20230630-3, Pp20230628-5 and Pp014 were screened out using membership function method. This study provides impor-

收稿日期:2026-02-05;修回日期:2026-05-18

作者简介:孙绮璐(2002-),女,汉族,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要从事草种质资源创新与利用研究,E-mail:2642747160@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:zhangxq@sicau.edu.cn

tant germplasm resources and theoretical references for cold-resistant germplasm innovation and new variety breeding of *Pennisetum*.

Key words: *Pennisetum* germplasm resources; Low-temperature stress; Cold resistance evaluation; Membership function

狼尾草属(*Pennisetum*)植物原产于非洲,广泛分布于热带、亚热带地区,目前已在我国南方多地引种栽培^[1]。其生物量大、再生能力强,株高可达3 m以上,年刈割6~10次,干物质产量达46.2 t·hm⁻²,一次栽种可利用4~10年^[2-4]。该类植物能适应pH 4.5~8.2的多种土壤,根系发达可抗旱固土,兼具能源、水土保持、绿化等经济与生态价值,是优质植物资源^[5-8]。然而,狼尾草对低温表现出较强的敏感性,其最佳生长温度为30~35℃^[9],温度低于10℃时生长进程受到显著抑制^[10]。霜冻可能导致狼尾草地上部分枯萎,但地下部分仍可安全越冬^[11]。在西南山区等冬季气温较低的区域,狼尾草越冬率普遍较低,严重限制了其推广应用范围^[12]。温度的降低也会导致狼尾草产量的下降,当绝对低温达-12.7℃时,普通狼尾草越冬成活率仅为25%,次年再生产量减少75%^[13]。因此,培育抗寒的狼尾草新品种是目前生产中急需解决的问题。

植物的表型变异能直观体现其环境适应潜能,表型性状精准鉴定既是种质资源性状综合评价的核心,也是抗逆特性系统评价的重要基础^[14]。植株高度、根长和低温胁迫下的生物量积累等表型指标,可直接揭示植物在低温环境下的生长响应与适应机制^[15];叶绿素相对含量(Soil and plant analyzer development, SPAD值)与植株营养状况和发育阶段密切相关,其含量动态变化可作为评估植物冻害程度、评价低温耐受性的关键生理指标。温度剧变会干扰叶绿素合成并改变其含量水平,进而引起植株叶绿素含量变化^[16]。此外,可溶性糖是植物抵御低温胁迫的关键渗透调节物质,可通过维持细胞高渗透势,减轻低温对细胞结构的损伤,从而提升植物耐低温能力。Grimaud等^[17]研究发现同时处理抗寒品种和不抗寒品种的豌豆(*Pisum sativum*),抗寒品种豌豆内可溶性糖含量远远高于不抗寒品种。尽管多数指标与植物的抗寒性相关,但不同抗寒指标之间所反映出的植株抗寒能力不同,单一指标测定结果无法全面、客观地评价植物的抗寒性^[18]。主成分分析(Principal component analysis, PCA)可在最大程度保留原始数据信息的前提下,将关联指标转化为少量独立综合指标,有效规避冗余信息干

扰^[19]。隶属函数评估法(Membership function)是基于模糊数学原理,通过计算每一个指标相应的隶属函数值,并加权得到综合评价值,评价全面、结果可靠且具可比性^[20]。目前,二者已广泛应用在苜蓿(*Medicago sativa*)^[21]、披碱草(*Elymus dahuricus*)^[22]、老芒麦(*Elymus sibiricus*)^[23]等植物的抗寒性评价中。

本研究以经初步抗寒性筛选后的118份狼尾草种质资源为材料,通过田间低温胁迫处理,结合8个抗寒相关指标对其进行抗寒性鉴定,最终通过综合评价筛选出抗寒性强的种质资源,为抗寒狼尾草育种奠定重要基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

课题组前期从国内外狼尾草种质资源不同生态区收集342份材料,经初步评价,筛选出具有较强抗寒性的118份材料进行试验。其中包含野生种质110份,分别采集自云南保山、临沧等中缅边境共33份,海南琼中、东山、儋州等共14份,广西百色、南宁、崇左等共26份以及四川地区37份。此外,还包含育成品种8份,以生产上推广面积较大的‘热研4号’作为对照品种,2022年对118份狼尾草种质进行田间扩繁,采用单茎节斜插方式,株距60 cm,行距80 cm,每株占地0.5 m²,每份种质设置三次重复,采用随机区组设计,所有材料均保存于四川农业大学草业科技学院。

1.2 试验地概况

试验地位于四川省雅安市四川农业大学草业科技学院教学科研基地内,地理坐标为30°08'N, 103°14'E。此地气候类型为亚热带季风性湿润气候,具有温湿多雨的特点,年平均降水量1000~1800 mm。全年平均气温稳定在15.0~17.5℃,夏季最高气温可达38℃,而冬季则相对寒冷,最低温可达-5.4℃。本试验田间观测周期内,设置两个低温胁迫时段(图1):2023年11月12日—2024年3月22日、2024年11月17日—2025年3月25日。其中胁迫期内气温≤4℃的极端低温天数达68天。

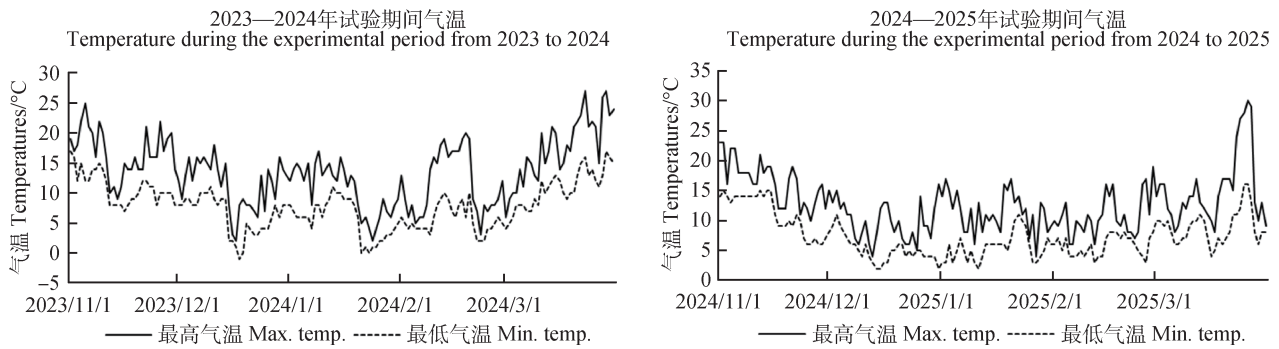


图1 试验地低温胁迫试验期气温气象数据

Fig. 1 Meteorological temperature data for low-temperature stress experiment in experimental field

1.3 试验方法

低温胁迫前叶绿素含量(Chlorophyll, Chl):在最低气温降至10℃(2023年11月12日、2024年11月17日)时,使用叶绿素含量计(CL-01, Hansatech, 英国),夹取叶片中间部位,避开叶脉测定三个重复^[24]。

低温胁迫后叶绿素含量(Chlorophyll Cold, Chl_Cold):在低温胁迫期间气温降到最低(2023年12月18日、2024年12月15日)时再次进行叶绿素含量测定,方法同上^[24];计算两次叶绿素含量差值作为自然低温胁迫后叶绿素下降值($\Delta\text{Chlorophyll Cold}$, $\Delta\text{Chl_Cold}$)。

茎秆含糖量(Soluble solids content, SC):低温胁迫前,利用榨汁机榨取狼尾草茎基部1~2节汁液,使用糖度测定仪(PAL-1, ATAGO, 日本)测定狼尾草茎秆的糖分浓度(°Brix)^[25],每份材料测定3个重复。

返青截根苗数(Ratoons):是在冬季刈割留茬越冬(12月),留茬15 cm,在次年春季最低气温回升至15℃(2024年3月22日、2025年3月25日)时统计返青截根苗数量^[13]。

自然株高(Plant height, PH):营养生长期测量从植株主茎底部至顶端的高度,求平均值(cm)。

茎粗(Stem diameter, SD):营养生长期用游标卡尺测量第一节茎粗,取平均值(mm)。

叶片数(Leaf number, LN):营养生长期记录每单株上全部叶片数,取平均值。

1.4 数据处理

利用Excel 2021进行数据统计,求其平均值、标准差以及变异系数,并计算多样性指数。使用Origin 2022对8个抗寒相关性状进行正态分布检测和相关性分析。对数据进行了标准化处理,随后对118份狼尾草种质进行系统聚类分析,基于欧氏距离构建聚类树。利用SPSS 27对各性状进行方差分析和主成分分析,计算各主成分得分。使用模糊隶

属函数对各主成分得分进行归一化处理,随后根据各主成分贡献率计算其权重系数,最后计算狼尾草种质资源的综合评价D值。

① 隶属函数值:

$$U_j = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: U_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。

② 综合指标权重:

$$G_i = W_i / \sum_{i=1}^n W_i$$

式中: G_i 为第i个综合指标在所有综合指标中的权重, W_i 为各种质第i个综合指标贡献率。

③ 综合评价值:

$$D = \sum_{i=1}^n (U_j \times G_i)$$

2 结果与分析

2.1 狼尾草种质抗寒相关性状多样性分析

对118份狼尾草种质各性状指标进行统计分析,结果如表1所示。低温胁迫前,种质叶绿素含量(SPAD值)变化范围为42.18~67.56,均值为55.99;经历自然低温胁迫后叶绿素含量最大值为30.00,最小值为9.60,其中叶绿素含量最大降幅达50.96,最小降幅为24.18。各种质经历自然低温胁迫后,来年返青截根苗数最多为45个,最少0个。各种质低温胁迫前茎秆含糖量最高为6.70°Brix,最低为2.63°Brix;株高最高为322 cm,最低为93.75 cm;茎粗最大值为28.15 cm,最小值为6.84 cm;叶片数最多为29个,最少为10个。8个性状的变异系数范围为8.89%~54.78%,平均值为22.29%。其中,变异系数最高的性状是返青截根苗,表明经过自然

低温胁迫后狼尾草返青截根苗数变异幅度大。变异系数最低的性状是低温胁迫前叶绿素含量,表明狼尾草叶绿素含量变异幅度较小。各相关性状多样性指数范围为 1.9741~2.0708,平均值为 2.0411。其中,自然低温胁迫后叶绿素下降值多样性指数最大,其次为茎秆含糖量、低温叶绿素含量

和低温胁迫前叶绿素含量,返青截根苗多样性指数最小。狼尾草种质资源各性状间变异系数及多样性指数变化幅度较大,自然低温胁迫后叶绿素下降值相较于低温胁迫前叶绿素含量变异系数变化较大,表明不同种质在应对低温胁迫时具有较大差异,可为后续筛选抗寒狼尾草种质奠定基础。

表 1 狼尾草 118 份种质抗寒相关性状多样性分析

Table 1 Diversity analysis of cold hardiness-related traits of 118 *Pennisetum* resources

性状 Trait	最大值 Max	最小值 Min	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV%	多样性指数 Diversity index
低温胁迫前叶绿素含量 Chl/SPAD	67.56	42.18	55.99	4.98	8.89	2.0445
低温胁迫后叶绿素含量 Chl_Cold/SPAD	30.00	9.60	18.92	3.92	20.70	2.0604
低温胁迫后叶绿素下降值 Δ Chl_Cold/SPAD	50.96	24.18	37.07	6.06	16.36	2.0708
茎秆含糖量 SC/°Brix	6.70	2.63	4.75	0.80	16.84	2.0697
返青截根苗 Ratoons/n	45	0	16.28	8.92	54.78	1.9741
株高 PH/cm	322	93.75	221.51	52.23	23.58	2.0507
茎粗 SD/mm	28.15	6.84	17.02	3.28	19.28	2.0135
叶片数 LN/n	29	10	20.09	3.60	17.93	2.0452

2.2 狼尾草种质各抗寒相关性状相关性分析

118 份狼尾草种质资源各抗寒相关性状数据均呈正态分布,狼尾草各性状相关数据分布范围较大,种质间存在较大差异。Pearson 相关性分析结果表明(图 2),低温胁迫前叶绿素含量与低温胁迫后叶绿素下降值呈极显著正相关($P<0.001$)。茎秆含糖量与茎粗显著正相关($P<0.05$),与自然低温

胁迫后叶绿素下降值、返青截根苗数呈负相关。低温叶绿素含量与自然低温胁迫后叶绿素下降值呈极显著负相关($P<0.001$),与返青截根苗数呈极显著正相关($P<0.001$)。自然低温胁迫后叶绿素下降值与株高显著正相关($P<0.05$),与茎粗和返青截根苗数负相关;株高与茎粗和叶片数极显著正相关($P<0.001$),茎粗与叶片数极显著正相关($P<$

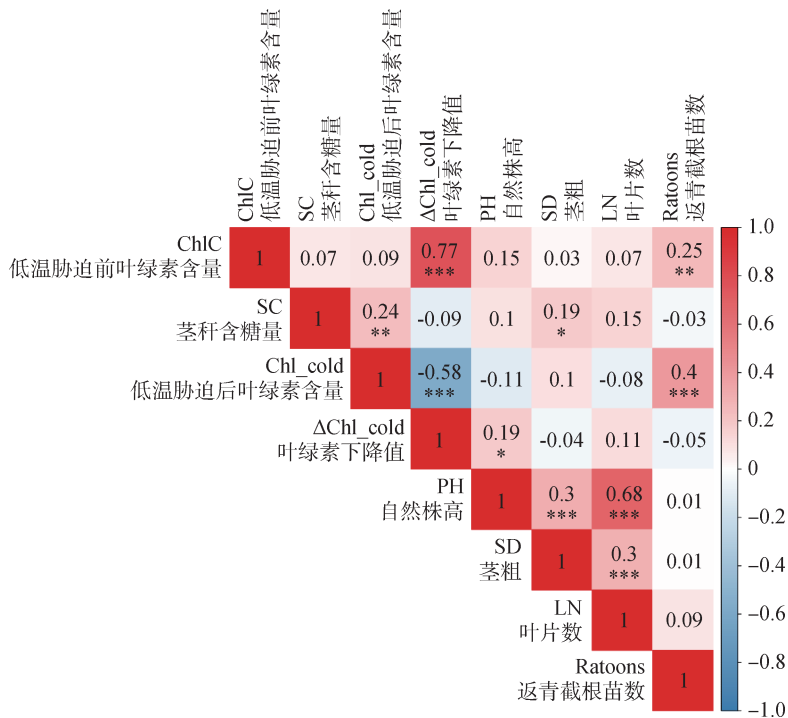


图 2 狼尾草种质资源抗寒相关性状的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficients of cold hardiness-related traits in *Pennisetum* germplasm resources

注:*, **, ***分别代表 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$

Note: *, ** and *** indicate $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively

0.001)。综合分析可知,叶绿素含量与返青截根苗数、茎秆含糖量存在着显著关联,说明叶绿素含量、返青截根苗数、茎秆含糖量是影响狼尾草耐低温的关键因素。

2.3 狼尾草种质抗寒相关性状的主成分分析

主成分分析的目的就是通过线性变换,将原来的多个指标组合成相互独立的少数几个能够充分反映总体信息的指标,从而在不丢失主要信息的前提下避免变量间共线性的问题,便于进一步分析。结果如表 2、图 3 所示,根据累计贡献率大于 80% 的原则,筛选出 4 个主成分,累计贡献率达 80.924%,反映了原始总体数据的大部分信息。第 1 主成分特征值及贡献率分别为 2.159 和 26.990%,低温叶绿素含量是第 1 主成分中唯一正向表征指标,自然低温胁迫后叶绿素下降值是特征向量值最大指标,对第 1 主成分有最大贡献,说明第 1 主成分反映了植株受低温胁迫程度的特征;第 2 主成分特征值为 1.829,贡献率为 22.860%,自然低温胁迫后叶绿素下降值、低温叶绿素含量对它的影响最为突出;第 3 主成分特征值和贡献率分别为 1.491 和 18.633%,返青截根苗、低温胁迫前叶绿素含量对它的影响最为突出,反映了决定种质自身抗寒性的各因素特征;第 4 主成分特征值为 0.995,贡献率为 12.441%,茎秆含糖量特征向量值较大,反映了决定植株渗透压的因素。总之,自然低温胁迫后叶绿素下降值、低温叶绿素含量、返青截根苗数、茎秆含糖量是影响狼尾草种质资源抗寒差异的主要因素。

表 2 各主成分得分系数及贡献率

Table 2 Score coefficient and contribution rate of each principal component

性状 Trait	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
低温胁迫前叶绿素含量 Chl	-0.424	-0.143	0.571	0.180
低温胁迫后叶绿素含量 Chl_Cold	0.263	0.486	0.425	0.022
低温胁迫后叶绿素下降值 Δ Chl_Cold	-0.518	-0.431	0.194	0.133
茎秆含糖量 SC	-0.061	0.353	0.056	0.769
返青截根苗 Ratoons	-0.014	0.250	0.573	-0.460
株高 PH	-0.484	0.294	-0.231	-0.221
茎粗 SD	-0.218	0.396	-0.141	0.181
叶片数 LN	-0.444	0.356	-0.226	-0.254
特征值 Eigenvalue	2.159	1.829	1.491	0.995
贡献率 Contribution rate/%	26.990	22.860	18.633	12.441
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	26.990	49.850	68.483	80.924

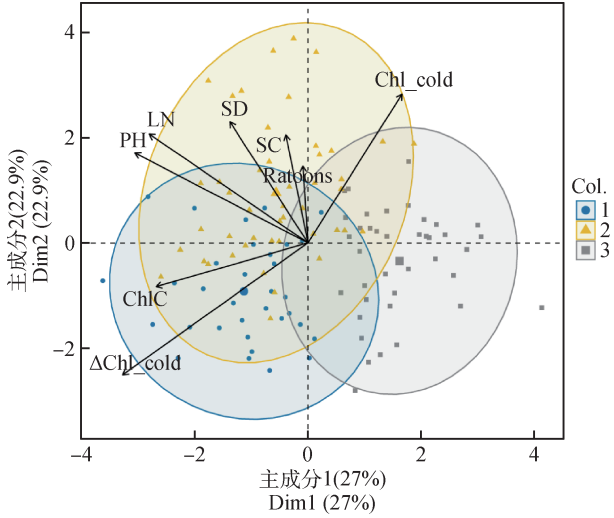


图 3 基于 118 份材料样本和 8 个变量的主成分分析因子载荷图

Fig. 3 Factor map of the pca performed on 118 tissue samples and 8 variables

2.4 狼尾草种质抗寒相关性状聚类分析

对 118 份狼尾草种质 8 个抗寒相关性状数据进行标准化处理并进行系统聚类分析,基于欧氏距离构建聚类树,当欧氏距离为 1.80 时将 118 份狼尾草种质分为 3 类(图 4),并对 3 类种群进行性状统计(表 3)。其中,第 I 类群包含 46 份材料,占供试种质资源的 38.93%。该类种群质株高最高 184.43 cm,茎粗最大值为 28.15 cm,叶片数最多为 28 片,茎秆含糖量为 3.63~6.70 °Brix,整体表现为植株高大、茎粗、叶片多且茎秆含糖量高。第 II 类群包含 39 份材料,占整个种质资源的 33.05%,该类成员株高最

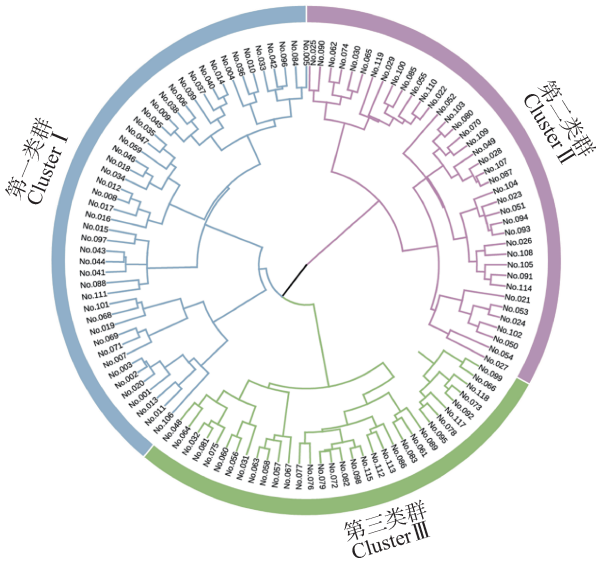


图 4 基于狼尾草抗寒相关性状的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis based on cold hardiness-related traits of *Pennisetum*

高为 243.58 cm, 茎粗最大值为 20.82 cm, 叶片数最多为 22 片, 茎秆含糖量为 2.63~5.70 °Brix, 叶绿素下降值为 24.18~41.88, 其虽表现为植株相对矮小、叶片数偏少、茎秆纤细, 但茎秆含糖量处于较高

水平, 且低温胁迫下叶绿素下降值显著低于其他类群。而第Ⅲ类群各抗寒相关性状的平均表现介于Ⅰ、Ⅱ类群中间, 表现为株高、茎粗、叶片数均为中等水平, 茎秆含糖量低。

表 3 不同类群抗寒相关性状的平均表现

Table 3 Mean performance of phenotypic traits among different groups

性状 Trait		第Ⅰ类群 Cluster I	第Ⅱ类群 Cluster II	第Ⅲ类群 Cluster III	性状 Trait		第Ⅰ类群 Cluster I	第Ⅱ类群 Cluster II	第Ⅲ类群 Cluster III
低温胁迫前叶绿素含量 Chl/SPAD	最大值 Max	67.56	59.84	65.92	返青截根苗 Ratoons/n	最大值 Max	45.00	44.00	26.00
	最小值 Min	46.18	42.18	52.80		最小值 Min	0.00	0.00	8.00
	均值 Mean	55.59	53.12	59.94		均值 Mean	14.43	16.79	18.24
	标准差 SD	5.28	3.81	2.81		标准差 SD	10.28	9.52	5.03
低温胁迫后叶绿素含量 Chl_Cold/SPAD	最大值 Max	30.00	24.94	22.84	株高 PH/cm	最大值 Max	322.00	243.58	310.95
	最小值 Min	9.60	13.28	9.82		最小值 Min	184.43	93.75	145.28
	均值 Mean	19.66	20.09	16.50		均值 Mean	258.27	171.66	229.18
	标准差 SD	4.51	2.77	3.13		标准差 SD	36.99	33.70	40.85
低温胁迫后叶绿素下降值 $\Delta\text{Chl_Cold/SPAD}$	最大值 Max	47.16	41.88	50.96	茎粗 SD/mm	最大值 Max	28.15	20.82	23.02
	最小值 Min	25.50	24.18	34.74		最小值 Min	11.21	6.84	13.28
	均值 Mean	35.93	33.03	43.44		均值 Mean	18.10	15.67	17.11
	标准差 SD	4.97	4.18	3.92		标准差 SD	3.84	2.68	2.50
茎秆含糖量 SC/°Brix	最大值 Max	6.70	5.70	5.37	叶片数 LN/n	最大值 Max	28.00	22.00	26.00
	最小值 Min	3.63	2.63	3.20		最小值 Min	17.00	10.00	14.00
	均值 Mean	5.30	4.46	4.31		均值 Mean	22.46	17.04	20.40
	标准差 SD	0.76	0.67	0.49		标准差 SD	2.91	2.35	3.08

2.5 狼尾草种质抗寒相关性状的综合评价

将 8 个抗寒相关性状分别代入 4 个主成分中, 得到每个种质材料的 4 个主成分得分, 第 1 主成分的线性方程为:

$$y_1 = -0.424X_1 + 0.263X_2 - 0.518X_3 - 0.061X_4 - 0.014X_5 - 0.484X_6 - 0.218X_7 - 0.448X_8$$

将 4 个主成分利用模糊隶属函数进行归一化处理, 随后根据 4 个主成分贡献率计算相应的权重系数 (0.333, 0.282, 0.230, 0.153), 最后计算得到各种质材料的隶属函数值 (D 值)。根据 D 值排名, 将 118 份材料分为抗寒、中抗寒、弱抗寒三个抗寒级别。其中, 抗寒的 No. 106, No. 019, No. 068 等 30 份材料均属于第Ⅰ, Ⅱ类群种质。弱抗寒的 No. 092, No. 085, No. 029 等 28 份材料均属于第Ⅱ, Ⅲ类群。而中抗寒的 60 份材料在三个类群中均有分布。将 30 份抗寒材料作为抗寒育种候选材料并统计其种质资源信息 (表 4), 发现 30 份材料具有高秆、多叶、茎秆高糖的优异性状。

3 讨论

狼尾草具有生长迅速、产量高、再生能力强等

特性, 但低温胁迫显著制约其在温带及高海拔冷凉区域的引种栽培与规模化推广。在植物抗寒性评价指标体系中, 叶绿素含量是反映低温胁迫对植物光合系统损伤的重要参数, 低温会抑制叶绿体合成, 损坏叶绿体结构, 导致植物叶绿素含量下降^[26]。Zhao 等^[16]在水稻 (*Oryza sativa*) 中证实, 低温胁迫破坏水稻叶绿体结构导致叶绿素含量降低, 印证了低温对叶片叶绿素的降解作用。Li 等^[27]对不同抗寒性一年生早熟禾 (*Poa annua*) 的研究发现, 种质间叶绿素降幅存在显著差异, 抗寒性较强的品种叶绿素下降幅度显著低于弱抗寒品种, 表明叶绿素降幅与植物抗寒能力呈负相关。目前, 叶绿素含量已作为评估作物抗逆性状的核心指标, 广泛应用于垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)^[28]、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)^[29] 等多种植物的抗寒性鉴定中。本研究通过田间自然低温胁迫, 发现不同狼尾草种质的叶绿素含量均出现不同程度下降 (表 1)。结合抗寒性综合评价分级结果可知, 30 份抗寒种质经历自然低温胁迫后, 叶绿素下降值介于 26.08~40.04, 60 份中抗寒的种质叶绿素下降值介于 24.18~48.68, 28 份弱抗寒的种质叶绿素下降值在 30.44~50.96 之间, 上述数据充分表明, 狼尾草种质在低温胁迫下的叶

表 4 狼尾草抗寒优异种质综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of cold hardiness elite germplasm resources of *Pennisetum*

编号 Number	种质 Germplasm	隶属度 Membership degree				D 值 D value	排名 Ranking	特点 Type
		U1	U2	U3	U4			
No.106	Pp20230630-3	0.3883	0.9651	0.9485	0.6199	0.7158	1	茎秆高糖 High stem sugar
No.019	Mott	0.7092	0.7013	0.8388	0.4278	0.6936	2	多叶 Multileaf
No.068	Pp20230628-5	0.5510	0.4547	1.0000	0.7224	0.6535	3	茎秆高糖 High stem sugar
No.011	Pp014	0.4349	1.0000	0.4873	0.7400	0.6535	4	高秆、茎秆高糖 Tall culm, high stem sugar
No.101	Pp20230629-29	0.5212	0.6810	0.8042	0.6505	0.6514	5	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.108	Pp20230630-5	0.8541	0.4701	0.5737	0.5109	0.6283	6	茎秆高糖 High stem sugar
No.052	LPSR	0.6968	0.6506	0.7025	0.2724	0.6198	7	多叶、茎秆高糖 Multileaf, high stem sugar
No.003	GM-1	0.3163	0.8513	0.7693	0.6248	0.6192	8	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.013	F-B	0.4862	0.9615	0.5080	0.4427	0.6188	9	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.002	Sum2	0.2957	0.8368	0.8394	0.5708	0.6160	10	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.104	Pp089	0.7575	0.3743	0.7220	0.5838	0.6144	11	茎秆高糖 High stem sugar
No.070	Pp20230629-15	0.5590	0.5731	0.7400	0.6037	0.6115	12	高秆、茎秆高糖 Tall culm, high stem sugar
No.093	Pp20230630-13	0.7799	0.4424	0.5459	0.5752	0.5992	13	多叶 Multileaf
No.001	Pp2023030703	0.3763	0.7470	0.6896	0.6701	0.5983	14	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.103	1-B175	0.6470	0.4379	0.6558	0.6820	0.5953	15	高秆、茎秆高糖 High stem sugar
No.023	Pp20230630-79	0.8291	0.4006	0.5035	0.5508	0.5903	16	多叶 Multileaf
No.020	CN002	0.2407	0.8799	0.7294	0.5694	0.5843	17	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.114	Pp080	0.7599	0.4719	0.4682	0.5772	0.5833	18	高秆 Tall culm
No.091	Pp081	0.6960	0.5257	0.5069	0.5513	0.5821	19	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.050	Pp20230630-26	0.6467	0.5100	0.7021	0.3713	0.5785	20	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.080	1-A715	0.6092	0.4611	0.6688	0.5580	0.5732	21	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.054	Pp20230716-8	1.0000	0.2354	0.5837	0.2486	0.5727	22	多叶 Multileaf
No.094	Pp20230630-4	0.7993	0.3270	0.5810	0.5146	0.5719	23	高秆 Tall culm
No.109	Pp20230630-8	0.5509	0.5675	0.6272	0.5362	0.5709	24	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.041	Pp20230629-31	0.4937	0.6702	0.4075	0.7734	0.5667	25	高秆、茎秆高糖 Tall culm, high stem sugar
No.049	Pp087	0.5531	0.4918	0.7598	0.4196	0.5628	26	多叶 Multileaf
No.051	Pp20230906	0.7369	0.4380	0.5666	0.4071	0.5626	27	高秆 Tall culm
No.087	Pp20230630-22	0.6241	0.4524	0.6179	0.5367	0.5607	28	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.118	Pp236	0.6694	0.1302	0.6377	1.0000	0.5606	29	茎秆高糖 High stem sugar
No.028	Pp037	0.6019	0.5014	0.5341	0.5706	0.5531	30	高秆、多叶 Tall culm, multileaf
No.074	热研 4 号	0.5967	0.2976	0.5519	0.5166	0.4896	对照	高秆、多叶 Tall culm, multileaf

绿素含量降幅越小,其抗寒性越强。

植物抗寒性的本质,是植株遭受低温胁迫后维持自身存活并恢复生长发育的综合能力。返青截根苗数可直观反映狼尾草越冬后地下芽的存活状态与再生潜力,是表征其田间抗寒性的重要指标^[30]。Burner 等^[13]研究发现,在-12.7℃的极端低温环境下,抗寒性最弱的狼尾草的越冬出苗率仅为25%,而抗寒性优良及中等的甘蔗(*Saccharum officinarum*)和蔗茅(*Erianthus*)的越冬出苗率达92%,充分证实植物越冬返青恢复能力与抗寒性的紧密关联。目前,基于返青率的抗寒性评价方法已广泛应用于芒草(*Miscanthus sinensis*)^[31]、结缕草(*Zoysia japonica*)^[32]、红三叶(*Trifolium pratense*)^[33]等多种植物的抗寒鉴定研究中,充分表明返青截根苗数可作为区分不同抗寒等级品种的关键指标,尤其适用于多年生草本植物的田间抗寒性快速评价。本研

究中118份狼尾草种质的返青截根苗数变异系数高达54.78%,为所有抗寒相关性状中最高,表明自然低温胁迫后不同种质的再生能力差异极为显著,这一结果与Burner等^[13]研究结果一致。同时相关性分析进一步揭示,返青截根苗数与低温胁迫后叶绿素含量呈极显著正相关($P<0.001$),与自然低温胁迫后叶绿素下降值呈负相关。上述结果表明,低温胁迫下叶绿素的维持能力直接影响植株越冬后的恢复生长。本研究筛选获得的抗寒种质(如Pp20230630-3, Pp20230628-5)均表现为低温条件下叶绿素含量较高、叶绿素下降幅度较小,且返青截根苗数也显著高于弱抗寒种质,进一步证实了光合系统稳定性与再生抗寒性的协同关系。

抗寒性是由多途径、多机制共同调控的复杂综合性状,不同种质在低温逆境下可能存在差异化的生理响应策略。因此,依托多指标融合的综合评价

体系,能够系统量化和多维度解析种质间抗寒性的遗传分化特征^[34]。已有研究证实,隶属函数 D 值综合评价法可有效用于牧草抗寒性鉴定与优异种质筛选。例如王敏等^[35]运用 D 值综合评价法对10种紫花苜蓿进行抗寒性评价,用于苜蓿耐低温新品种选育研究。本研究选取8个抗寒相关指标,结合主成分分析和隶属函数综合评价法,对118份狼尾草种质进行抗寒性综合评价(表4),评价结果筛选出30份抗寒种质。同时主成分分析结果表明(表2),低温胁迫后叶绿素下降值、低温叶绿素含量、返青截根苗数及茎秆含糖量是影响狼尾草抗寒性差异的核心因子。本研究狼尾草抗寒性评价的关键指标与前人研究存在一定差异^[35],这种差异主要源于试验材料种类、种质群体、环境条件及测定指标体系等多方面因素的综合影响。尽管研究对象和具体指标存在差异,但本研究采用的综合评价方法及筛选获得的核心抗寒指标,与现有研究体系具有较高的一致性与科学合理性,可有效用于狼尾草种质抗寒性评价与抗寒优异种质筛选。

4 结论

供试狼尾草种质资源抗寒相关性状具有丰富的遗传多样性。聚类分析将118份种质资源分为3个类群,其中第Ⅱ类群为综合性状表现优异种质。主成分分析表明,自然低温胁迫后叶绿素下降值、低温叶绿素含量、返青截根苗数及茎秆含糖量可作为抗寒种质评价的综合指标。结合主成分分析和隶属函数综合评价 D 值,筛选出抗寒种质30份,其中‘GM-1’‘Sum2’‘CN002’已经作为优异抗寒种源在狼尾草育种中作为骨干亲本利用,为后续抗寒育种奠定重要基础。

参考文献

- [1] FARRELL G, SIMONS S A, HILLOCKS R J. Aspects of the biology of *Ustilago kamerunensis*, a smut pathogen of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) [J]. *Journal of Phytopathology*, 2001, 149(11/12): 739-744
- [2] BRITO DA SILVA V, DAHER R, DE SOUZA Y P, et al. Assessment of energy production in full-sibling families of elephant grass by mixed models [J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 744-749
- [3] 谭文彪,覃培龙. 象草常规营养成分及总能含量分析[J]. 西南林学院学报, 2008(3): 45-47
TAN W B, QIN P L. Analysis on the contents of routine nutritive components and gross energy of *Pennisetum purpureum* [J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2008(3): 45-47
- [4] WOODARD K R, PRINE G M, BACHREIN S. Solar energy recovery by elephantgrass, energycane, and elephantmillet canopies [J]. *Crop Science*, 1993, 33(4): 824-830
- [5] 袁福锦,周自玮,许艳芬,等. 栽种对象草生产性能的作用[J]. 草业科学, 2008, 25(2): 73-76
YUAN F J, ZHOU Z W, XU Y F, et al. Effect of planting method and row spacing on the productivity of *Pennisetum purpureum* [J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(2): 73-76
- [6] GEZAHAGN K B, FEKEDE F, GETNET A, et al. Agronomic performance and dry matter yield stability of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) genotypes in Southwestern Ethiopia [J]. *Agronomy Journal homepage*, 2024, 116(5): 2304-2317
- [7] 温晓娜,简有志,解新明. 象草资源的综合开发利用[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 108-112
WEN X N, JIAN Y Z, XIE X M. The comprehensive exploitation and utilization of *Pennisetum purpureum* [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(9): 108-112
- [8] ZHANG X, GU H R, DING C L, et al. Path coefficient and cluster analyses of yield and morphological traits in *Pennisetum purpureum* [J]. *Tropical Grasslands*, 2010, 44(2): 95-102
- [9] FERRARIS R. The effect of photoperiod and temperature on the first crop and ratoon growth of *Pennisetum purpureum* Schum [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1978, 29(5): 941-950
- [10] BORRAJO C I. Caracteres morfo-fisiológicos que definen la producción de forraje en agropiro bajo estrés por sequia y salinidad [J]. *Revista Argentina de Producción Animal*, 2025, 44 (S1): 317
- [11] PEREIRA A V, LIRA M A, MACHADO J C, et al. Elephant grass, a tropical grass for cutting and grazing [J]. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 16(3): e9317
- [12] 马婷,李修清,高利. 外源独脚金内酯调控象草 AsA-GSH 循环和激素代谢来适应低温胁迫 [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20251106.1405.009>, 2025-11-06/2026-02-04
MA T, LI X Q, GAO L. Exogenous strigolactone regulates AsA-GSH cycle and hormone metabolism of *Pennisetum purpureum* to adapt to low temperature stress [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20251106.1405.009>, 2025-11-06/2026-02-04
- [13] BURNER D M, HALE A L, VIATOR R P, et al. Ratoon cold tolerance of *Pennisetum*, *Erianthus*, and *Saccharum* bioenergy feedstocks [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 109: 327-334
- [14] GAO S B, MO L D, ZHANG L H, et al. Phenotypic plasticity vs. local adaptation in quantitative traits differences of *Stipa grandis* in semi-arid steppe, China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 3148
- [15] MENG A J, WEN D X, ZHANG C Q. Maize seed germination

- under low-temperature stress impacts seedling growth under normal temperature by modulating photosynthesis and antioxidant metabolism [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 843033
- [16] ZHAO Y Q, HAN Q H, DING C B, et al. Effect of low temperature on chlorophyll biosynthesis and chloroplast biogenesis of rice seedlings during greening [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(4): 1390
- [17] GRIMAUD F, RENAUT J, DUMONT E, et al. Exploring chloroplastic changes related to chilling and freezing tolerance during cold acclimation of pea (*Pisum sativum* L.) [J]. *Journal of Proteomics*, 2013, 80: 145-159
- [18] 陆姣云, 田宏, 熊军波, 等. 14份乡土狼尾草材料幼苗的耐冷性综合评价[J]. *草业学报*, 2024, 33(8): 98-111
- LU J Y, TIAN H, XIONG J B, et al. A multi-trait evaluation of cold resistance of 14 native *Pennisetum alopecuroides* germplasm lines at the seedling stage [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(8): 98-111
- [19] 付宝春, 薄伟. 玉簪抗旱性隶属函数及主成分分析[J]. *草地学报*, 2014, 22(6): 1324-1330
- FU B C, BO W. Analyses of the subordinate function and the principal components of *Hosta* drought resistance [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(6): 1324-1330
- [20] 赵国栋, 赵同生, 李春敏, 等. 11个苹果野生砧木品种低温处理抗性指标的综合评价[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(6): 145-151
- ZHAO G D, ZHAO T S, LI C M, et al. Comprehensive evaluation on cold resistance of eleven wild apple rootstocks [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6): 145-151
- [21] 段伟, 穆妮热·米吉提, 加米丽古丽·伊明, 等. 20份黄花苜蓿种质低温胁迫生理响应及抗寒性评价[J]. *草地学报*, 2026, 34(2): 611-623
- DUAN W, MUNIRE M J T, JIAMILIGULI Y M, et al. Physiological responses to low-temperature stress and cold resistance evaluation of 20 *Medicago falcata* germplasms [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2026, 34(2): 611-623
- [22] 孙婉玉, 吕晔, 李阳晨, 等. 21份西藏野生披碱草属种质抗寒性综合评价[J]. *草业科学*, 2025, 12(12): 3141-3152
- SUN W Y, LÜ Y, LI Y C, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of 21 wild *Elymus* germplasms in Xizang [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 12(12): 3141-3152
- [23] 王若非, 李昕哲, 李祺策, 等. 不同浓度的硅处理对老芒麦苗期抗寒性的影响[J]. *草业学报*, 2026, 35(1): 130-139
- WANG R F, LI X Z, LI Q C, et al. Effects of different concentrations of silicon on the cold resistance of *Elymus sibiricus* seedlings [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(1): 130-139
- [24] DONG H X, GREEN S V, NISHIWAKI A, et al. Winter hardiness of *Miscanthus (I)*: Overwintering ability and yield of new *Miscanthus × giganteus* genotypes in Illinois and Arkansas [J]. *GCB Bioenergy*, 2019, 11(5): 691-705
- [25] BRAR A, SANDHU S K, SHARMA S. Physiological and biochemical traits as indicators for cold tolerance in sugarcane (*Saccharum* species) [J]. *Agricultural Research Journal*, 2018, 55(2): 210
- [26] CHAUHAN H, KHURANA N, NIJHAVAN A, et al. The wheat chloroplastic small heat shock protein (sHSP26) is involved in seed maturation and germination and imparts tolerance to heat stress [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, 35(11): 1912-1931
- [27] LI J, BAI X, RAN F, et al. Effects of combined extreme cold and drought stress on growth, photosynthesis, and physiological characteristics of cool-season grasses [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 116
- [28] 梁坤伦, 贾存智, 孙金豪, 等. 高寒地区垂穗披碱草种质对低温胁迫的生理响应及其耐寒性评价[J]. *草业学报*, 2019, 28(3): 111-121
- LIANG K L, JIA C Z, SUN J H, et al. Evaluation of physiological responses and tolerance to low-temperature stress of ten *Elymus nutans* varieties [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 111-121
- [29] 马香香, 南丽丽, 王利群, 等. 紫花苜蓿新品系幼苗对低温胁迫的响应[J]. *中国草地学报*, 2025, 47(5): 66-77
- MA X X, NAN L L, WANG L Q, et al. Responses of seedlings from new alfalfa lines to low temperature stress [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2025, 47(5): 66-77
- [30] BURNER D M, HALE A L, CARVER P, et al. Biomass yield comparisons of giant *Miscanthus*, giant reed, and miscane grown under irrigated and rainfed conditions [J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 76: 1025-1032
- [31] FONTEYNE S. Evaluation of chilling and frost stress tolerance in miscanthus : from winter survival and early-season growth to final biomass yield [D]. Ghent: Ghent University, 2017: 1-2
- [32] 郭海林, 刘建秀, 朱雪花, 等. 结缕草属杂交后代抗寒性评价[J]. *草地学报*, 2006, 14(1): 24-28
- GUO H L, LIU J X, ZHU X H, et al. Evaluation of cold resistance of *Zoysia hybrids* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(1): 24-28
- [33] ERGON Å, AMDAHL H. Winter survival in red clover: experimental evidence for interactions among stresses [J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 467
- [34] 董双慧, 贾明, 张辉, 等. 四倍体青绿苔草对低温的生理响应及耐寒性评价[J]. *草地学报*, 2024, 32(7): 2089-2098
- DONG S H, JIA M, ZHANG H, et al. The physiological response and tolerance evaluation of tetraploid *Carex breviculmis* to low temperature [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(7): 2089-2098
- [35] 王敏, 李莉, 贾蓉, 等. 10种紫花苜蓿在低温胁迫下的生理特性及耐寒性评价[J]. *草业学报*, 2024, 33(6): 76-88
- WANG M, LI L, JIA R, et al. Evaluation of physiological characteristics and cold resistance of 10 alfalfa varieties under low temperature stress [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 76-88

(责任编辑 闵芝智)