

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.022

引用格式:施丹丹,李世平,欧阳青,等.‘云牧1号’象草新品系耐寒性及在云南不同区域的生产性能评价[J].草地学报,2026,34(9):3385–3394

SHI Dan-dan, LI Shi-ping, OUYANG Qing, et al. Cold Tolerance and Production Performance Evaluation of a New *Pennisetum purpureum* Line ‘Yunmu No. 1’ in Different Regions of Yunnan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3385–3394

‘云牧1号’象草新品系耐寒性及在云南不同区域的生产性能评价

施丹丹¹, 李世平¹, 欧阳青^{1,2}, 刘彦培¹, 梅 娇², 钟 声^{1*}

(1. 云南省草地动物科学研究院, 云南 昆明 650212; 2. 云南农业大学, 云南 昆明 650201)

摘要:基于多年多点田间试验与生理光合测定,本研究以当地主栽品种‘德宏’(DH)和‘热研4号’(RY-4)象草为对照,系统评估了象草新品系‘云牧1号’(YM-1)的耐寒性与生产适应性。结果表明,参试材料的耐寒性强弱顺序为YM-1>DH>RY-4。YM-1的低温半致死温度(-5.413°C)最低,低温胁迫下超氧化物歧化酶活性显著上升237.12%,丙二醛含量仅微增1.25%,主要以抗氧化机制响应低温;DH则主要通过积累可溶性糖(+76.77%)和脯氨酸(+60.24%)等渗透调节物质响应低温;RY-4抗氧化与渗透调节响应均较弱,丙二醛含量增幅达43.07%。初霜期冻害指数与上述生理指标排序一致。在海拔2350 m条件下,YM-1的萌萋率(地下芽萌发成新株丛的比例)(50.4%)与返青率(43.0%)均最高,3年平均干草产量比DH和RY-4分别高出6.1%和11.3%。综上,‘云牧1号’兼具耐寒性和高产稳产潜力,适宜在云南高原区2000 m以下复杂环境中推广;基于低温半致死温度、丙二醛含量、超氧化物歧化酶活性、田间冻害表型及自然越冬能力的综合评价方法,可用于象草耐寒性的系统鉴定。

关键词:象草新品系;耐寒性;生产适应性;冻害生理特性;低温光合特性

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3385-10

Cold Tolerance and Production Performance Evaluation of a New *Pennisetum purpureum* Line ‘Yunmu No. 1’ in Different Regions of Yunnan

SHI Dan-dan¹, LI Shi-ping¹, OUYANG Qing^{1,2}, LIU Yan-pe¹, MEI Jiao², ZHONG Sheng^{1*}

(1. Yunnan Academy of Grassland and Animal Science, Kunming, Yunnan Province 650212, China; 2. Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan Province 650212, China)

Abstract: Based on multi-year, multi-site field trials combined with physiological and photosynthetic measurements, in this study we evaluated the cold tolerance and production adaptability of a new *Pennisetum purpureum* line ‘Yunmu No. 1’ (YM-1), in comparison with two local predominant cultivars, *P. purpureum* ‘Dehong’ (DH) and *P. purpureum* × *P. typhoideum* ‘Reyan No. 4’ (RY-4). The results indicated that the cold tolerance of the tested materials, in descending order, was YM-1>DH>RY-4. YM-1 had the lowest semi-lethal temperature (LT_{50}) of -5.413°C . Under low-temperature stress, its superoxide dismutase (SOD) activity increased significantly by 237.12%, while malondialdehyde (MDA) content increased only marginally by 1.25%, indicating that it primarily responds to low temperature through an antioxidant mechanism. In contrast, DH mainly responded to low temperature by accumulating osmotic adjustment substances, including soluble sugar (+76.77%) and proline (+60.24%). RY-4 exhibited weak responses in both antioxidant and osmotic adjustment mechanisms, with an MDA increase of 43.07%. The freezing injury index during the first-frost period was consistent with the above physiological ranking. At an altitude of 2350 m, YM-1 showed the

收稿日期:2026-02-26;修回日期:2026-04-10

作者简介:施丹丹(1996-),女,云南昆明人,研究实习员,硕士,主要从事牧草资源评价及育种研究,E-mail:1591382765@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:zhongshen01@126.com

highest sprouting rate (50.4%; i. e., the proportion of stumps with newly sprouted tillers) and regreening rate (43.0%). Its three-year average hay yield was 6.1% and 11.3% higher than those of DH and RY-4, respectively. In conclusion, 'Yunmu No. 1' possesses both strong cold tolerance and high and stable yield potential, making it suitable for cultivation in complex environments below 2000 m elevation on the Yunnan Plateau. A comprehensive evaluation method based on LT_{50} , MDA content, SOD activity, field freezing injury phenotype, and natural overwintering capacity can be used for the systematic identification of cold tolerance in *Pennisetum purpureum*.

Key words: New *Pennisetum purpureum* line; Cold tolerance; Production adaptability; Freezing injury physiological characteristics; Photosynthetic characteristics under low temperature

象草(*Pennisetum purpureum* Schum)原产非洲,经东南亚国家自然扩散进入云南,目前在云南南部与缅甸、老挝、越南接壤的德宏、版纳、临沧、红河、文山等州(市)大量逸散分布。象草是全世界温暖地区广泛栽培的优良牧草,具有抗逆性强、生长速度快、饲草产量高、持久性好等优点^[1-2],在我国南方各类边际土壤种植具有广泛的推广应用前景^[3-5]。

饲草缺口是制约云南肉牛产业发展的关键因素。象草在高产和低收获成本方面具有巨大优势,是云南冷凉山区养牛农户自发大规模种植的主要原因。但我国现有象草品种主要是针对热区气候环境培育的,耐寒性相对不足,在冷凉山区生长及越冬表现极不稳定,是当前制约生产应用的关键卡点。国内外研究揭示,象草种内遗传变异丰富,不乏耐寒性较强的基因源,例如,矮生型种质能在-22℃低温及-2℃土温(5 cm 土层深度)下越冬^[6]。已有研究揭示,冷驯化能够提升狼尾草的耐寒性^[7],并已鉴定出相关抗冻基因^[8]及不饱和 C₁₈ 脂肪酸合成途径等耐寒机制^[9]。为此,云南象草育种团队利用自然芽变材料,选育出在云南约 2000 m 海拔区表现出良好越冬稳定性的‘云牧 1 号’象草新品系。本研究拟从光合生理和区域产量等维度,系统评估新品系的耐寒适应性和高产稳定性,为新品种审定与科学区划提供依据。

1 材料与方法

1.1 参试材料

选择云南主栽象草品种‘热研 4 号’和‘德宏’为对照。材料基本情况说明如下:(1)新品系‘云牧 1 号’(YM-1)利用象草芽变材料培育,原始芽变材料(编号 2013-02)于 2013 年 2 月采集自缅甸奈比多(Nay Pyi Taw)亚扎定嘎哈村田地边(96°6'36" E, 19°43'12" N, 海拔 110 m)。该单株表现出生长势旺盛、被毛稀少、物候偏早等特性状,经无性扩繁

连续 2 代表现一致、未发生性状分离,判断为稳定自然芽变。流式细胞仪鉴定其为四倍体($2n=28$),与‘德宏’象草倍性一致。2023 年进入国家草品种区试;(2)国审品种‘热研 4 号’王草(*P. purpureum* × *P. typhoideum* ‘Reyan No. 4’)(RY-4),试验用种茎 2022 年引自云南省农科院热经所热研 4 号王草种质资源圃;(3)国审品种‘德宏’象草(*P. purpureum* ‘Dehong’)(DH),试验用种茎 2022 年引自盈江县水槽河畜牧场。

1.2 研究方法

1.2.1 耐寒性评价 半致死温度测定:取叶位处于倒 2 的叶片,设定的温度梯度分别为 4℃, 0℃, -3℃, -6℃, -9℃, -12℃ 和 -15℃,每 2 个温度间降温过程设为 1 h,并在处理温度处保持 1.5 h。将处理后的材料取出置于 4℃ 冰箱 24 h。由 DDS-11A 型直读电导率仪测定冷冻电导率,再置于沸水浴中 20 min,冷却到室温后测其煮沸电导率,计算出相对电导率^[10]。将处理温度与相对电导率用四参数 Logistic 方程: $y=d+(a-d)/(1+e^{b(t-c)})$ 进行拟合,方程中 y 代表相对电导率(%), t 代表处理温度(℃), a 为低温极限值(最大损伤率), d 为高温极限值(最小损伤率), b 为曲线斜率参数(反映温度敏感性), c 为拐点温度。该拐点对应的 y 值恰好为 $(a+d)/2$,即半致死水平,因此 c 即为低温半致死温度(LT_{50}),可直接从拟合结果中读取^[11]。

初霜期冻害观察:初霜来临时,叶尖出现冻害时开始,连续观测 3 周。参考冬小麦冻害田间调查及分级技术规范^[12],结合象草特点,按各叶上冻斑面积占整个叶面积的百分率划分病级:0 级,无冻斑;1 级,冻斑面积 ≤ 10%;2 级,10% < 冻斑面积 ≤ 25%;3 级,25% < 冻斑面积 ≤ 50%;4 级,冻斑面积 > 50%。冻叶率(%) = (冻叶数/调查总叶数) × 100%;冻害指数 = Σ (各级冻叶数 × 相对级数值)/(调查总叶数 × 最高级数) × 100%。

冻害前后生理生化指标测定:分别于秋末最低气温 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ (非胁迫期)和初霜后叶尖出现冻害时(胁迫期)各采样测定一次。每次采集各材料倒 2 功能叶(即植株顶端向下第 2 片完全展开叶),每处理选取 5 株,每株取 2 片叶混合为一个样品,3 次生物学重复。样品采集后立即置于冰盒中带回实验室,经液氮速冻后保存于 -80°C 冰箱备用。各项指标测定方法如下:过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法测定^[13]。超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定^[13]。脯氨酸(Proline, Pro)含量采用茚基水杨酸法测定^[13]。丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[14]。可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量采用蒽酮比色法测定^[14]。叶绿素采用乙醇提取比色法测定^[15]。

光合参数测定:秋末最低气温 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 和初霜来临、叶尖出现冻害后 14 d 各测一次。使用 Li-6400 便携式光合仪(LI-COR Inc, USA)测光合指标^[16]。于上午 9:00—11:30,选取每个处理完全展开的功能叶,每个重复测定 3 次,取平均值。

自然越冬率调查:在滇东北马鸣(2000 m)和朗目山(2300 m)进行对比调查。试验采用 3 重复随机

区组排列,每重复 50 株。单株种植,株行距 60 cm $\times$ 80 cm,采用统一田间管理措施,种植当年不刈割。返青后 30 d 统计萌茇率、返青率和返青后株高。返青时间:30% 株丛有新萌苗为返青标准。萌茇率:调查小区所有株丛的发茇情况(地间而非残茬新萌茇 ≥ 1 为发茇数)。萌茇率=发茇数/茇总数。返青率:沿小区对角连续观测 10 个株丛,分别统计残茬数和苗高 5 cm 以上的萌苗总数。返青率=萌苗数/残茬数。返青株高:沿地块对角连续观测 10 丛返青苗自然高度。

1.2.2 区域生产性能 试验在云南 5 个典型生态气候区开展,各试验点基本情况见表 1。采用随机区组设计,4 次重复,每小区面积 28.8 m²(6.0 m $\times$ 4.8 m),四周设 1.0 m 保护行。种植当年封行前及次年 3—4 月各中耕除草施肥 1 次,每小区施尿素 0.65 kg(约 226 kg $\cdot\text{hm}^{-2}$)、钙镁磷肥 0.5 kg(约 174 kg $\cdot\text{hm}^{-2}$)、氯化钾 0.2 kg(约 70 kg $\cdot\text{hm}^{-2}$)。每次刈割后追施尿素,用量为每小区 0.65 kg(约 226 kg $\cdot\text{hm}^{-2}$)。种植当年霜冻前一次性测产;第 2 年起,株高达 1.5~2.0 m 时刈割测产,留茬高 5 cm。每次刈割时,每小区随机取 3 株混合各重复样品,取约 1000 g,计算各品种(系)干草产量及干鲜比。

表 1 生产性能评价试验点基本情况

Table 1 Basic information of the experimental sites for productivity evaluation

序号 No.	地区 Region	海拔 Altitude/m	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	区域特点 Regional characteristics
1	昆明 Kunming	1950	103°6′10″	25°19′28″	高原气候,极端低温可至 -9°C ,象草越冬不稳定。
2	红河 Honghe	1200	102°49′45″	23°19′40″	干热河谷气候,年降雨 800 mm,蒸发量大,总体干旱。
3	文山 Wenshan	1650	104°18′49″	23°24′18″	喀斯特地貌区,冬季偏潮湿,短期强霜冻频繁。
4	保山 Baoshan	1300	99°30′13″	24°52′02″	滇西湿润气候,冬季温暖潮,象草能安全越冬。
5	普洱 Pu'er	1100	100°52′05″	22°53′08″	低热河谷气候,水热条件优越,象草最适生长环境。

1.2.3 数据分析 使用 WPS Office 软件进行试验数据的录入与初步整理。采用 SPSS 19.0 统计软件对数据进行方差分析,并用 Duncan's 新复极差法进行多重比较($P<0.05$)。对参试材料的低温半致死温度(LT₅₀)与相对电导率的关系采用 Logistic 回归分析。图表绘制采用 WPS Office 软件。

2 结果与分析

2.1 耐寒性评价

2.1.1 半致死温度差异 此次试验中,3 份材料相对电导率均随温度的降低总体呈上升趋势,其中 RY-4 和 DH 相对电导率在温度 -15°C 时达到峰值,而 YM-1 相对电导率在温度 -12°C 时达到峰值,与

其他温度差异显著;与 0°C 的相对电导率相比,RY-4 高 761.23%、YM-1 高 791.44%、DH 高 643.32% (图 1)。其中,RY-4 的相对电导率在 -12°C 时较 -9°C 略有下降,但整体随温度降低而升高的趋势不变。

3 份材料在低温胁迫后相对电导率拟合回归方程各参数和拐点温度见表 2。RY-4、YM-1 和 DH 等象草材料半致死温度 LT₅₀ 分别为: -3.969°C 、 -5.413°C 、 -5.396°C ;根据 LT₅₀ 大小,YM-1 略强于 DH,二者均明显强于 RY-4。

2.1.2 初霜期冻害表现 由图 2 可知,3 份象草材料在霜冻来临后,冻叶率和冻害指数均随着冻害时间增加而升高,RY-4 从霜冻初期至 21 天的冻叶率和冻害指数均为最高值,对低温较为敏感且反应强

表 2 Logistic 方程及半致死温度

Table 2 Logistic equation and semi-lethal temperature of *Pennisetum purpureum* resources

材料 Material	Logistic 方程参数 Parameter for Logistic function			半致死温度 (Semi-lethal temperature, LT ₅₀)/°C	曲线拟合度 (Curve estimation, R ²)
	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>b</i>		
RY-4	90.066	12.050	-2.566	-3.969	0.958
YM-1	93.710	11.949	-3.418	-5.413	0.982
DH	91.005	12.063	-4.782	-5.396	0.985

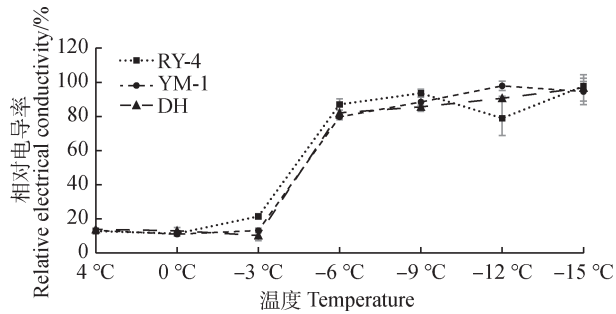


图 1 不同低温胁迫下象草相对电导率变化曲线

Fig. 1 Changes in relative electrical conductivity of *Pennisetum purpureum* under different low temperature stress

烈;而 YM-1 和 DH 从霜冻前期的冻叶率和冻害指数均较小,后期增加明显,初期对低温不敏感,但 DH 在整个初霜期冻叶率和冻害指数在 3 个品种中均较小。综合初霜期冻害表现分析可以发现:YM-1 和 DH 相近,二者明显强于 RY-4。

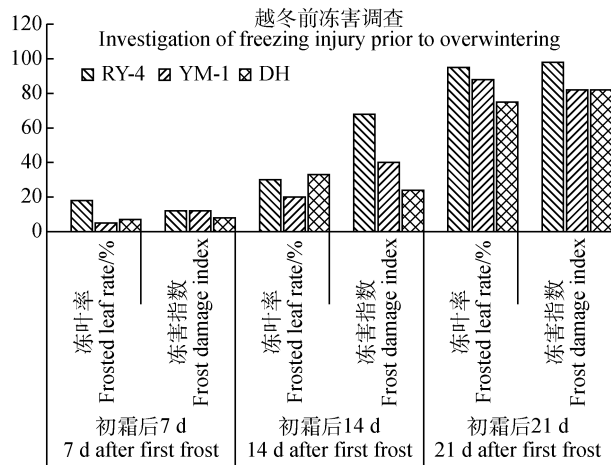


图 2 越冬前冻害调查

Fig. 2 Investigation of freezing injury prior to overwintering

2.1.3 低温期生理指标 从胁迫前后生理指标变化角度分析(表 3),胁迫后的参试材料的生理指标均有增加,且增幅差异明显,胁迫后 3 个材料间丙二醛(MDA)含量增幅在 1.25%~43.07%,过氧化物酶(POD)活性增幅 3.61%~10.99%,可溶性糖(SS)含量增幅 31.56%~76.77%,超氧化物歧化酶(SOD)活性增幅 1.67%~237.12%,脯氨酸(Pro)

含量增幅 8.69%~60.24%。其中 YM-1 的 MDA 含量、POD 活性和 SS 含量霜冻胁迫后增幅均为最小值,且 MDA 含量变化幅度最高的 RY-4 (43.07%)是 YM-1 (1.25%)的 34.4 倍,POD 活性变化幅度最高的 DH (10.99%)是 YM-1 (3.61%)的 3 倍,SS 含量变化幅度最高的 DH (76.77%)是 YM-1 (31.56%)的 2.4 倍。Pro 含量变化幅度最高的 DH (60.24%)是 YM-1 (22.30%)的 2.7 倍。但 YM-1 的 SOD 活性增幅显著,达 237.12%。

2.1.4 低温期光合指标 由表 4 可知,低温胁迫后,参试材料间的叶绿素总含量和光合参数变化差异明显。胁迫后 3 个材料间叶绿素总含量变化在 -23.23%~22.31%,差异较大,RY-4 未有降低,YM-1 降幅较小(-2.20%),DH 降幅最大(-23.23%)。光合参数均呈下降趋势,且降幅差异显著。胁迫后净光合速率 3 个材料间降幅在 -11.02%~-52.17%,DH 降幅最小(-11.02%),RY-4 降幅最大(-52.17%),YM-1 居中(-47.11%)。胞间 CO₂ 浓度降幅在 -13.58%~-19.27%,其中 YM-1 降幅最小(-13.58%),DH 降幅最大(-19.27%),RY-4 居中(-14.45%)。气孔导度降幅在 -27.41%~-29.96%,蒸腾速率降幅在 -15.26%~-19.47%,且气孔导度和蒸腾速率降幅最大的均是 YM-1,RY-4 和 DH 降幅均略低于 YM-1,且 2 个材料间相差不大。

2.2 自然越冬率

萌萐率反映植株地下芽在土壤深层越冬存活的能力,是评价植株整体越冬性能的关键指标;返青率主要由地表残茬或近地芽越冬后恢复生长的苗所决定,其高低直接影响宿根萌发后的饲草生产潜力;返青后相同生长期内的株高则表征植株恢复生长的速率。综合上述 3 项指标,可系统评估参试材料的越冬耐寒性。由表 5 可知,在 1950 m 海拔条件下,3 个材料返青时间均为 3 月 10 日,且各项生长指标均维持在较高水平,说明该海拔的低温胁迫影响较轻。从材料表现差异来看,DH 与 YM-1 的返青萌

表 3 低温期 3 个象草的生理指标

Table 3 Physiological indices of three accessions of *Pennisetum purpureum* during low-temperature period

指标 Indicator	材料 Material	非胁迫($\geq 15^{\circ}\text{C}$) Non-stress ($\geq 15^{\circ}\text{C}$)	胁迫(初霜后 14 d) Stress (14 d after first frost)	变化量 Change amount	变化幅度 Change range
丙二醛含量 MDA content/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	RY-4	33.57 ± 3.21	48.03 ± 1.53	14.46 ± 0.91	43.07%
	YM-1	23.93 ± 1.73	24.23 ± 0.54	0.30 ± 0.02	1.25%
	DH	33.47 ± 0.54	40.20 ± 0.78	6.73 ± 0.47	20.11%
过氧化物酶 POD activity/ $(\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	RY-4	368.83 ± 11.29	388.00 ± 11.58	19.17 ± 1.01	5.20%
	YM-1	309.83 ± 18.52	321.00 ± 12.34	11.17 ± 0.76	3.61%
	DH	409.50 ± 10.02	454.50 ± 9.12	45.00 ± 2.44	10.99%
可溶性糖含量 SS content/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	RY-4	5.00 ± 1.27	7.63 ± 0.20	2.63 ± 0.32	52.60%
	YM-1	5.83 ± 0.62	7.67 ± 0.19	1.84 ± 0.08	31.56%
	DH	6.07 ± 1.18	10.73 ± 0.17	4.66 ± 0.19	76.77%
超氧化物歧化酶 SOD activity/ $(\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	RY-4	215.73 ± 17.74	219.33 ± 28.85	3.60 ± 0.25	1.67%
	YM-1	103.93 ± 2.16	350.37 ± 14.66	246.44 ± 13.19	237.12%
	DH	294.40 ± 9.53	316.40 ± 39.00	22.00 ± 1.36	7.47%
脯氨酸含量 Pro content/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	RY-4	44.07 ± 0.61	47.90 ± 4.02	3.83 ± 0.21	8.69%
	YM-1	64.43 ± 2.93	78.80 ± 3.46	14.37 ± 1.03	22.30%
	DH	53.17 ± 1.33	85.20 ± 4.77	32.03 ± 1.11	60.24%

表 4 低温期 3 个象草的叶绿素变化和光合特征

Table 4 Chlorophyll changes and photosynthetic characteristics of three accessions of *Pennisetum purpureum* during low-temperature period

指标 Indicator	材料 Material	非胁迫($\geq 15^{\circ}\text{C}$) Non-stress ($\geq 15^{\circ}\text{C}$)	胁迫(初霜后 14 d) Stress (14 d after first frost)	变化量 Change amount	变化幅度 Change range
叶绿素总含量 (Total chlorophyll content, Chl T) / $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})$	RY-4	1.12 ± 0.11	1.37 ± 0.03	0.25 ± 0.01	22.32%
	YM-1	1.82 ± 0.22	1.78 ± 0.10	-0.04 ± 0.01	-2.20%
	DH	1.55 ± 0.07	1.19 ± 0.11	-0.36 ± 0.01	-23.23%
净光合速率 (Photosynthetic rate, Pn) / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	RY-4	0.476 ± 0.0025	0.227 ± 0.003	-0.248 ± 0.001	-52.17%
	YM-1	0.358 ± 0.0250	0.189 ± 0.004	-0.168 ± 0.029	-47.11%
	DH	0.514 ± 0.0017	0.457 ± 0.001	-0.056 ± 0.003	-11.02%
气孔导度 (Stomatal conductance, Gs) / $(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	RY-4	0.024 ± 0.0001	0.017 ± 0.0002	-0.006 ± 0.001	-27.41%
	YM-1	0.018 ± 0.0003	0.012 ± 0.0001	-0.005 ± 0.001	-29.96%
	DH	0.021 ± 0.0008	0.015 ± 0.0001	-0.005 ± 0.001	-27.59%
胞间 CO_2 浓度 (Intercellular CO_2 Concentration, Ci) / $(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	RY-4	422.00 ± 2.00	361.00 ± 2.51	-61.00 ± 4.50	-14.45%
	YM-1	422.33 ± 1.76	365.00 ± 2.08	-57.33 ± 3.28	-13.58%
	DH	392.66 ± 6.00	317.00 ± 2.08	-75.67 ± 4.33	-19.27%
蒸腾速率 (Transpiration rate, Tr) / $(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	RY-4	0.294 ± 0.002	0.245 ± 0.001	-0.049 ± 0.002	-16.74%
	YM-1	0.275 ± 0.004	0.222 ± 0.002	-0.053 ± 0.004	-19.47%
	DH	0.323 ± 0.001	0.274 ± 0.001	-0.049 ± 0.002	-15.26%

莠率接近 80%、返青率接近 100%，株高也明显高于 RY-4($P<0.05$)，表明二者在该海拔下具备良好的宿根自然越冬能力，可满足实际生产要求。然而，2024—2025 年度试验期间恰逢云南暖冬，据云南省气候中心公报，该冬季平均气温较常年偏高约 1°C 。因此，上述材料在该海拔区域的越冬稳定性仍需多年多点数据进一步验证。相比之下，RY-4 的萌莠率和返青率均约为 70%，尤其是近地芽越冬能力明显不如 YM-1 和 DH，可能影响后续饲草产量，因此在该海拔下的生产适用性低于 DH 与 YM-1。

当海拔升至 2350 m 时，低温胁迫效应显著加

剧。所有材料的返青时间均推迟至 4 月 5 日，萌莠率、返青率及株高均大幅下降，反映出低温对其存活与生长恢复造成了明显抑制。在此环境中，YM-1 的 3 项指标(萌莠率 50.32%，返青率 42.95%，株高 37.60 cm)均为最高，说明其耐寒性与低温后恢复能力最强；DH 各项指标居中(萌莠率 47.95%，返青率 37.47%，株高 35.83 cm)；而 RY-4 表现最弱，返青率仅 26.35%，萌莠率 43.64%，株高 31.73 cm，显示其对低温最为敏感。值得注意的是，在该海拔下所有材料的返青率均低于 50%，表明其均不具备直接生产应用价值。

综上所述,参试材料的耐寒性排序为:YM-1 $\geq$ DH $>$ RY-4。YM-1在低温胁迫下维持了相对较高的生理活性和恢复生长潜力,表现出较强的抗寒适应能力;而RY-4耐寒性较差,在本次试验代表的海拔或类似低温环境应用可能受限。

为进一步揭示生理指标与越冬表现的内在关联,将参试材料的低温生理参数(LT₅₀、MDA增幅、SOD增幅)与高海拔(2350 m)返青率进行相关性分

析。结果表明,LT₅₀、MDA增幅、SOD增幅与返青率的相关系数分别为-0.94,-0.991和0.768,均表现出较强的相关性。其中,LT₅₀和MDA增幅与返青率呈极强负相关,即半致死温度越低、膜脂过氧化程度越轻,越冬返青能力越强;SOD增幅与返青率呈强正相关,即抗氧化酶活性越强,低温后恢复生长能力越优。上述结果表明,离体条件下测定的关键生理指标与田间越冬表现存在密切的内在关联。

表5 象草材料在不同海拔的自然越冬性

Table 5 Natural overwintering performance of *Pennisetum purpureum* materials at different altitudes

海拔 Altitude	材料 Material	返青时间 Regreening time	萌芽率 Sprouting rate/%	返青率 Regreening rate/%	株高 Plant height/cm
1950 m	RY-4	3月10日	69.10 $\pm$ 1.47 ^b	70.04 $\pm$ 8.35 ^b	40.37 $\pm$ 0.81 ^b
	YM-1	3月10日	78.15 $\pm$ 1.98 ^a	97.73 $\pm$ 5.29 ^a	47.33 $\pm$ 1.41 ^a
	DH	3月10日	78.68 $\pm$ 0.51 ^a	101.05 $\pm$ 6.69 ^{a*}	43.93 $\pm$ 0.71 ^a
2350 m	RY-4	4月5日	43.64 $\pm$ 2.07 ^a	26.35 $\pm$ 2.28 ^b	31.73 $\pm$ 1.79 ^b
	YM-1	4月5日	50.32 $\pm$ 3.26 ^a	42.96 $\pm$ 2.86 ^a	37.60 $\pm$ 0.72 ^a
	DH	4月5日	47.95 $\pm$ 1.80 ^a	37.47 $\pm$ 1.18 ^a	35.83 $\pm$ 0.82 ^{ab}

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。*返青新萌芽多于越冬前残茬数,故计算结果 $\geq 100\%$

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P<0.05$). The same below. * New regreening shoots outnumber the pre-overwintering stubble, resulting in a calculated value of $\geq 100\%$

2.3 生产性能

2.3.1 不同区域的饲草产量 从表6中可见,YM-1在5个试验点3年平均鲜草产量为216.27 t $\cdot$ hm⁻²,变化范围在135.59~253.71 t $\cdot$ hm⁻²之间。5个点的平均产量均高于DH,增产幅度为1.54%~16.08%。除普洱(1100 m)点(减产11.33%)外,其余4个点均高于RY-4,增产幅度4.14%~32.88%。统计分析结果显示:种植第1年的所有试验点差异均未达到显著水平;种植第2年,除保山点外,其余均达到显著差异($P<0.05$);种植第3年,仅昆明和红河差异达到显著水平($P<0.05$)。

从表6中可见干草产量,YM-1在5个试验点3年平均干草产量为41.29 t $\cdot$ hm⁻²,变化范围23.48~49.33 t $\cdot$ hm⁻²。除普洱(1100 m)点减产外,其余4个点的平均产量均高于DH和RY-4,增产幅度分别为2.31%~16.29%和7.45%~29.23%。统计分析结果显示:种植第1年的所有试验点差异均未达到显著水平;种植第2年,均达到显著差异($P<0.05$);种植第3年,仅昆明和红河差异达到显著水平($P<0.05$)。

2.3.2 环境对饲草产量的影响 3份材料多地区干草产量分析见图3。本次试验结果显示,象草在

低热河谷区(普洱)饲草产量最高,干草平均产量可达50.69 t $\cdot$ hm⁻²,其次是滇西温暖湿润区(保山)和滇东南喀斯特地区(文山),干草产量分别为47.01 t $\cdot$ hm⁻²和42.20 t $\cdot$ hm⁻²,上述区域也是象草在云南的优势种植区。但在滇中高原(昆明),平均干草产量(21.53 t $\cdot$ hm⁻²)仅相当于低热河谷区的40%。干热河谷区(红河)虽然热量资源充沛,但受水分因素的制约,平均干草产量(35.54 t $\cdot$ hm⁻²)仅相当于相近海拔(保山)的75.60%。且多地区三年累计干草总产量除普洱(RY-4最高)外,YM-1累计干草总产量在其他4个地区均为最高值。上述说明温度和水分是限制象草产量的关键环境因子,不同品种对温度和水分响应不同,低温是RY-4饲草生产首要限制因子,DH则对于干旱较为敏感,YM-1对温度和水分有更宽泛的适应性。从不同年份的变动差异角度分析,所有品种在所有地点均呈现一致规律:第1年产量最低,第2年产量大幅跃升,第3年产量与第2年持平或略有波动,表明象草作为多年生牧草,在定植后需要一个生长季才能进入高产稳产阶段,不太适合用作一年生栽培应用。

表 6 不同区域三年的产量分析
Table 6 Yield analysis across different regions over three years

	地区 Region	材料 Material	第 1 年 Year 1 yield	第 2 年 Year 2 yield	第 3 年 Year 3 yield	平均 Average yield
鲜草产量 Fresh yield/ (t·hm ⁻²)	昆明 Kunming (1950 m)	RY-4	89.43±8.20 ^a	110.06±3.75 ^b	106.62±5.53 ^b	102.04±6.38
		YM-1	100.85±5.80 ^a	151.78±5.85 ^a	154.16±11.54 ^a	135.59±17.39
		DH	97.62±13.94 ^a	141.66±5.22 ^a	136.37±8.29 ^{ab}	125.22±13.88
	红河 Honghe (1200 m)	RY-4	163.49±16.22 ^a	204.49±2.78 ^b	192.99±12.77 ^{ab}	186.99±12.21
		YM-1	158.42±16.43 ^a	229.02±2.63 ^a	231.89±11.31 ^a	206.44±24.03
		DH	173.66±8.80 ^a	182.34±1.45 ^c	177.52±10.21 ^b	177.84±2.51
	保山 Baoshan (1300 m)	RY-4	187.82±11.17 ^a	260.27±5.07 ^a	282.78±8.79 ^a	243.62±28.65
		YM-1	214.13±24.43 ^a	272.79±6.04 ^a	274.21±13.92 ^a	253.71±19.79
		DH	212.73±13.18 ^a	253.52±5.14 ^a	237.20±15.67 ^a	234.48±11.85
	文山 Wenshan (1650 m)	RY-4	168.24±23.98 ^a	231.63±6.45 ^b	223.09±10.56 ^a	207.65±19.86
		YM-1	185.47±6.04 ^a	260.80±4.02 ^a	269.93±6.63 ^a	238.74±26.76
		DH	174.96±9.64 ^a	230.02±10.08 ^b	229.42±21.16 ^a	211.46±18.26
	普洱 Pu'er (1100 m)	RY-4	219.15±31.09 ^a	323.86±5.07 ^a	292.20±21.96 ^a	278.40±31.00
		YM-1	193.65±18.15 ^a	269.31±12.10 ^b	277.64±12.34 ^a	246.87±26.71
		DH	208.6±22.06 ^a	265.42±10.76 ^b	255.39±17.99 ^a	243.13±17.51
干草产量 Dry yield/ (t·hm ⁻²)	昆明 Kunming (1950 m)	RY-4	15.65±1.44 ^a	19.65±0.67 ^b	19.22±1.00 ^b	18.17±1.27
		YM-1	17.14±0.99 ^a	26.32±1.02 ^a	26.99±2.02 ^a	23.48±3.18
		DH	17.57±2.51 ^a	26.01±0.96 ^a	25.29±1.54 ^a	22.95±2.70
	红河 Honghe (1200 m)	RY-4	29.43±2.92 ^a	37.54±0.51 ^b	35.78±2.36 ^b	34.25±2.46
		YM-1	29.31±3.04 ^a	43.22±0.50 ^a	44.19±2.15 ^a	38.91±4.81
		DH	32.13±1.63 ^a	34.41±0.27 ^c	33.83±1.94 ^b	33.46±0.68
	保山 Baoshan (1300 m)	RY-4	34.75±2.07 ^a	49.11±0.96 ^b	53.89±1.67 ^a	45.91±5.75
		YM-1	40.90±4.67 ^a	53.14±1.18 ^a	53.94±2.74 ^a	49.33±4.22
		DH	40.84±2.53 ^a	49.65±1.01 ^{ab}	46.91±3.10 ^a	45.80±2.60
	文山 Wenshan (1650 m)	RY-4	31.80±4.53 ^a	44.65±1.24 ^b	43.43±2.06 ^a	39.96±4.10
		YM-1	34.87±1.14 ^a	50.01±0.77 ^a	52.27±1.28 ^a	45.72±5.46
		DH	33.24±1.83 ^a	44.58±1.96 ^b	44.90±4.14 ^a	40.91±3.83
	普洱 Pu'er (1100 m)	RY-4	41.20±5.84 ^a	62.10±0.97 ^a	56.58±4.25 ^a	53.29±6.25
		YM-1	37.76±3.54 ^a	53.56±2.41 ^b	55.76±2.48 ^a	49.03±5.67
		DH	41.93±4.43 ^a	54.42±2.21 ^b	52.87±3.72 ^a	49.74±3.93

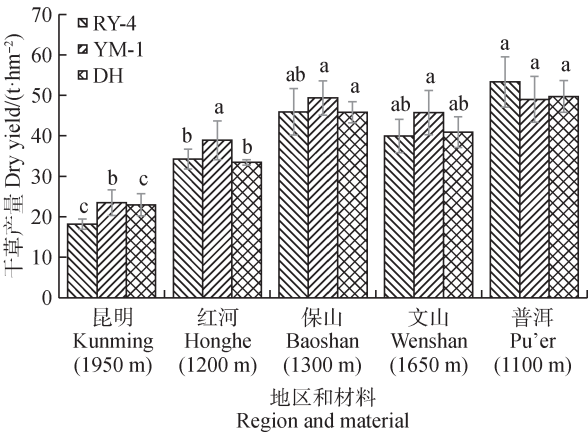


图 3 多地区三年均值干草产量

Fig. 3 Mean hay yield over three years across multiple regions
注:同一材料内的不同字母表示在地区间差异显著 ($P<0.05$)
Note: Different letters within the same material indicate significant differences across regions ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 不同区域的产量稳定性分析

高产性、稳产性与广泛适应性是评判新品种未来推广应用范围和前景的核心指标。高产性定义了品种的产量潜力,稳产性决定了产量潜力在不同年份气候波动下的可实现程度,而广泛适应性确保了品种在多变环境和不同区域中能最大程度维持其优良性状,是应对气候变化与扩大种植范围的关键^[17]。本研究中不同品种在不同环境点的干草产量表现存在较大差异。YM-1在多数地点(昆明、红河、保山、文山)的平均产量均为最高;DH在多数地点表现与YM-1相似,但在红河点表现较差,显示其对干热环境的明显不适;RY-4在普洱点表现较好,

高于YM-1和DH,但在其余点产量均低于YM-1,显示其在湿热环境的高产潜力和对冷凉、干热和喀斯特气候环境下生产潜力受限。对所有试验点数据进行标准化处理,再计算不同品种的相对平均产量和变异系数^[18]。计算结果,YM-1多点相对平均产量为1.048,比DH(0.979)和RY-4(0.973)分别高7.05%和7.71%;YM-1变异系数为10.69%,略高于DH(10.16%),低于RY-4(11.75%)。即从高产稳产性角度评价,YM-1在多数试验点表现优于对照,尤其在冷凉和干热区域优势明显。尽管在湿热环境(普洱点)其产量略低于RY-4,但综合来看,YM-1展现出更广泛的适应性和高产稳产潜力。

3.2 低温半致死温度评价耐寒的客观性和局限性

植物在遭受低温胁迫伤害时,细胞膜受损会导致电解质外渗,通过测定电解质的相对电导率来评估膜损伤程度,是评价植物离体组织抗冻性的常用方法,即电导法^[19-20]。然而,该方法基于离体条件测定,所计算出的半致死低温(LT₅₀)能否准确反映植株整体水平上的耐寒性,学界存在不同看法。综合分析国内相关研究数据可见,单纯依据LT₅₀评估植物的耐寒性存在一定的局限性。例如,董文科等^[21]测定的10个草地早熟禾(*Poa pratensis* L.)品种的LT₅₀范围为-17.50℃至-3.20℃,陈鸣晖等^[10]测定暖季型狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) LT₅₀范围为-8.70℃至-0.70℃,林兴生等^[22]对5种亚热带禾草的测定结果显示,其LT₅₀范围跨度更大,从-21.28℃至0.69℃,其中象草和巨菌草的LT₅₀分别为0.18℃和0.69℃。这些数据显示,温带与热带禾草的LT₅₀数值存在广泛重叠,仅凭绝对值评估耐寒性强弱可能失真。本次研究中,3个材料的LT₅₀范围为-5.41℃至-3.97℃,其数值不仅明显低于前述同类研究中的部分热带禾草,甚至低于某些冷季型草种(如草地早熟禾)的数据。这一现象表明,LT₅₀作为一个离体测定指标,在绝对值比较上存在局限,难以直接跨研究进行耐寒性强弱的判定。值得注意的是,本研究发现LT₅₀排序与田间实际抗寒观测结果并非完全一致。虽然YM-1与DH的LT₅₀值极为接近(-5.413℃ vs. -5.396℃),但在高海拔(2350 m)田间自然越冬表现上,YM-1(萌茺率50.32%,返青率42.96%)显著优于DH(萌茺率47.95%,返青率37.47%)。这一差异说明,LT₅₀仅能反映离体组织在冷冻胁迫下的细胞膜损

伤程度,而无法完全模拟植株在复杂田间环境下(如土壤缓冲、根系活力、微气候等)的综合越冬能力^[23]。

综上,虽然低温半致死温度作为一个孤立指标在绝对值比较上存在局限,但本研究中LT₅₀排序结果与田间观测趋势总体一致,表明其作为辅助性评价指标,在同一研究体系内进行比较时仍具有重要参考价值。然而,YM-1与DH的表现差异进一步证实,LT₅₀必须与田间冻害表型、自然越冬率等指标相结合,才能对草的耐寒性作出全面、准确的评价。

3.3 不同材料的耐寒生理响应策略

低温胁迫下,植物活性氧(reactive oxygen species, ROS)积累引发膜脂过氧化与渗透失衡。植物通过上调POD和SOD活性以清除ROS,并积累Pro和SS含量以维持渗透平衡,共同缓解伤害^[24-25]。MDA含量作为膜脂过氧化的终产物,其含量直接指示膜损伤程度^[26]。因此,POD, SOD, Pro, SS与MDA的协同变化构成一个关键响应网络:有效的抗氧化与渗透调节能减轻膜损伤(低MDA),该网络的整体效能共同决定了植物的耐寒性强弱。本次试验结果显示:不同材料间冻害引起上述生理指标存在一定差异,YM-1耐寒性的核心机制可能与霜冻胁迫下SOD活性爆发性增长(增幅237.12%)关系密切;SOD活性的爆发性增长能有效清除活性氧,这使得其细胞膜受损极轻,故MDA含量仅微增1.25%,表明其通过强大的主动抗氧化防御成功维持了膜系统完整性。DH的耐寒性则主要依靠大量积累渗透调节物质来应对低温,其SS和Pro含量增幅最高(分别为76.77%和60.24%),这在一定程度上缓解了胁迫伤害,但保护效率明显不及YM-1,故MDA含量因此上升了20.11%。RY-4的抗氧化酶(SOD)与渗透调节物质(脯氨酸)对低温胁迫的响应幅度均微弱,导致其活性氧清除与细胞保护能力不足,因此,其膜脂过氧化程度最为严重,MDA含量大幅升高43.07%,揭示了其耐寒性最弱的直接生理表现。本研究与胡远彬等^[27]对8个狼尾草属牧草耐寒性生理指标规律研究有相似之处。上述不同品种耐寒策略在效应上的梯度差异,为进一步解析植物耐寒的生理机制提供了潜在的表型对比体系。

3.4 不同材料的低温光合响应策略

低温胁迫下的光合作用是反映植物耐寒性的综合功能指标,低温胁迫会导致光合速率下降,气

孔导度降低,胞间 CO_2 浓度升高,蒸腾速率下降,水分利用效率升高,从而影响植物的生长发育^[28-29]。本次研究显示,三种材料的光合响应策略与其生理抗寒机制存在较强的关联性。YM-1的光合特性表现为:叶绿素含量与胞间 CO_2 浓度降幅最小(分别为-2.20%和-13.58%),结合其SOD活性激增237.12%考虑,表明其可能通过较强的抗氧化防御策略有效保护了光合机构,但大量资源向抗氧化系统倾斜也可能导致碳同化酶活性受到抑制,使其净光合速率仍下降47.11%。DH则通过高效积累渗透调节物质(可溶性糖与脯氨酸增幅分别为76.77%和60.24%),为光合作用提供了稳定的细胞微环境与底物支持,从而在叶绿素含量下降明显(-23.23%)的情况下,保持了较强的光合功能稳定性。而RY-4因基础保护机制缺失,膜系统氧化损伤严重(MDA增幅43.07%),导致叶绿体结构紊乱(叶绿素异常升高22.32%)和光合核心功能崩溃。三个材料不同的低温光合响应策略为阐明耐寒性差异提供了直接的生理表型依据。

3.5 象草耐寒性评价方法

象草耐寒性评价面临诸多挑战:首先,耐寒性是多层面协同作用的复杂数量性状,难以通过单一指标精确量化;其次,耐寒表型受基因型与环境互动强烈影响,室内可控条件下的鉴定结果常难以准确预测田间复杂环境下的实际表现;此外,作为多年生牧草,象草越冬存活与再生能力需经历完整生长周期及极端气候的长期验证,评估周期长且成本高。针对上述问题,结合本次研究结果,建议象草耐寒性评价采用田间与实验室相结合的综合评价体系。该体系以田间越冬存活率(如返青率)为最终判据,整合低温半致死温度(LT_{50})、MDA含量增幅、SOD活性等关键生理指标,以及初霜期间冻害表型,进行协同评估。具体技术路线为:首先利用 LT_{50} 进行快速初筛,淘汰极端不耐寒材料;其次,通过MDA和SOD等指标的协同变化解析材料的核心耐寒生理策略(如强抗氧化型或渗透调节型);进而,将生理响应与田间冻害表型相关联,验证其一致性;最终,以自然越冬后的恢复生长能力对所有早期指标进行验证与裁决。以本研究为例,该体系的有效性得到验证:‘ LT_{50} 初筛’(表2)有效区分了极端不耐寒的RY-4(-3.969℃)与耐寒材料YM-1/DH(约-5.4℃);‘生理机制解析’(表3)揭

示了YM-1(SOD激增237.12%)与DH(Pro增60.24%,SS增76.77%)的不同策略;上述结果与‘田间表型验证’(图2,冻害指数)和最终的‘越冬能力判定’(表5,返青率)结果高度一致,证明该体系可靠。该“初筛—解析—验证—判定”体系,旨在实现对象草耐寒性高效、准确且机理明确的综合评判。

4 结论

YM-1象草耐寒,对云南主要生态气候类型适应性强。在冷凉区和干热河谷,其饲草产量显著高于RY-4和DH等云南主栽品种,具备云南高原区2000 m以下复杂环境中广泛推广应用的潜力。将低温半致死温度(LT_{50})、初霜期间冻害指数、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性等指标,与田间自然越冬率相结合,可更客观、高效地评价不同象草材料的耐寒性差异。

参考文献

- [1] 田静,申成利,张建国. 狼尾草属4种牧草饲用价值研究[J]. 饲料研究,2021,44(7):114-118
TIAN J, SHEN C L, ZHANG J G. Study on the nutritional value of four *Pennisetum* grasses[J]. Feed Research, 2021, 44(7):114-118
- [2] 柏杉杉,王兆凤,宋希亮,等. 狼尾草属牧草品种在山东的生长表现[J]. 中国农学通报,2023,39(19):131-136
BAI S S, WANG Z F, SONG X L, et al. The growth performance of *Pennisetum* forage varieties in Shandong[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(19):131-136
- [3] 张怀山. 狼尾草属牧草种质资源的开发利用[J]. 中国草食动物, 2011, 31(3):43-44
ZHANG H S. Development and utilization of *Pennisetum* forage germplasm resources [J]. China Herbivore Science, 2011, 31(3):43-44
- [4] 范希峰,侯新村,朱毅,等. 杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 48-52
FAN X F, HOU X C, ZHU Y, et al. Biomass yield and quality of hybrid *Pennisetum* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2012, 34(1):48-52
- [5] 王丽宏,李会彬,孙鑫博,等. 狼尾草野生种质资源的评价与分析[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 134-140
WANG L H, LI H B, SUN X B, et al. Evaluation and analysis on wild germplasm resources of *Pennisetum alopecuroides* [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(3): 134-140
- [6] HANNA W W, MONSON W G. Registration of Tift N75 napiergrass germplasm[J]. Crop Science, 1988, 28:870-871
- [7] MIURA K, FURUMOTO T. Cold signaling and cold response in plants[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(3):5312-5337
- [8] 颜朗,吴燕,陈鼎,等. 皇竹草转录组分析揭示其抗冻特性[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3):459-466

- YAN L, WU Y, CHEN D, et al. Transcriptome analysis reveals cold acclimation in *Pennisetum sinense* Roxb[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(3): 459-466
- [9] LI Q Y, XIANG C L, XU L, et al. SMRT sequencing of a full-length transcriptome reveals transcript variants involved in C₁₈ unsaturated fatty acid biosynthesis and metabolism pathways at chilling temperature in *Pennisetum giganteum* [J]. BMC Genomics, 2020, 21(1):52
- [10] 陈鸣晖, 冯渝茜, 金诗璇, 等. 经纬度梯度上狗牙根半致死温度及耐寒性评价[J]. 中国草地学报, 2022, 44(3):49-57
- CHEN M H, FENG Y X, JIN S X, et al. Evaluation of semi-lethal temperature and cold tolerance of Bermudagrass (*Cynodon dactylon*) on latitude and longitude gradient[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(3):49-57
- [11] 朱根海, 刘祖祺, 朱培仁. 应用 Logistic 方程确定植物组织低温半致死温度的研究[J]. 南京农业大学学报, 1986, 9(3): 11-16
- ZHU G H, LIU Z Q, ZHU P R. Study on determining the semi-lethal temperature of plant tissue at low temperature by Logistic equation[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1986, 9(3):11-16
- [12] 中华人民共和国农业部. NY/T 2283. 3-2012 冬小麦灾害田间调查及分级技术规范 第3部分: 冬小麦霜冻害[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012:15-19
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 2283. 3-2012 Rules of field investigation and grading of damage to winter wheat-Part 3: Frost damage to winter wheat [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012, 15-19
- [13] 李铁冰, 杨顺强, 任广鑫, 等. 低温处理下不同禾本科牧草的生理变化及其抗寒性比较[J]. 生态学报, 2009, 29(3):1341-1347
- LI Y B, YANG S Q, REN G X, et al. Changes analysis in physiological properties of several gramineous grass species and cold-resistance comparison on under cold stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1341-1347
- [14] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理学实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004:106-108
- HAO Z B, CANG J, XU Z. Plant physiology experiments[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004:106-108
- [15] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2015:134-136
- WANG X K, HUANG J L. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015: 134-136
- [16] 李双, 王爱英, 焦焱, 等. 盐胁迫下不同抗性小麦幼苗生理生化特性及转录组分析[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(2): 20-32
- LI S, WANG A Y, JIAO Z, et al. Physiological and chemical characteristics and transcriptome analysis of different type of wheat seedlings under salt stress [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(2):20-32
- [17] 张嘉程, 王稳江, 冯帆. 高产稳产国审小麦新品种职院 171 的选育及特性分析[J]. 中国种业, 2025, (12):88-92
- ZHANG J C, WANG W J, FENG F. Breeding and characteristic analysis of new national approved wheat variety Zhiyuan 171 with high and stable yield[J]. China Seed Industry, 2025(12): 88-92
- [18] 刘传斌, 余乐安, 刘斌, 等. 基于数据标准化的专家群组评分聚合方法比较[J]. 系统工程理论与实践, 2026, 46(1): 412-427
- LIU C B, YU L A, LIU B, et al. A comparative study of expert group scoring aggregation methods based on data standardization[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2026, 46(1):412-427
- [19] 徐田, 毕玮, 陈剑. 应用 Logistic 方程确定巨龙竹叶片低温半致死温度[J]. 竹子学报, 2018, 37(2):75-78
- XU T, BI W, CHEN J. Application of logistic equation on determination of semilethal low temperature of *Dendrocalamus sinicus* [J]. Journal of Bamboo Research, 2018, 37(2):75-78
- [20] 王勇, 宋宇琴, 田建保, 等. 核桃枝条电解质渗出率与抗寒性的关系[J]. 江西农业大学学报, 2007(2):230-233
- WANG Y, SONG Y Q, TIAN J B, et al. A study on the Relationship between electrolyte osmotic rate of branches of walnuts and cold resistance[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2007(2):230-233
- [21] 董文科, 张玉娟, 马福钦, 等. 草地早熟禾苗期耐低温的生理特性研究[J]. 中国草地学报, 2024, 46(5):33-43
- DONG W K, ZHANG Y J, MA F Q, et al. Physiological characteristics of low temperature tolerance in *Poa pratensis* seedling stage[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(5):33-43
- [22] 林兴生, 林占焱, 林冬梅, 等. 低温胁迫 5 种菌草的抗寒性评价[J]. 草业学报, 2013, 22(2):227-234
- LIN X S, LIN Z X, LIN D M, et al. Cold-resistance of 5 Juncao under low temperature stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(2):227-234
- [23] REPO T, RYYPÖ A. The electrolyte leakage method can be misleading for assessing the frost hardness of roots[J]. Plant Biosystems, 2008, 142(2):298-301
- [24] 胡爱双, 张小栋, 王文成, 等. 盐胁迫对不同耐盐性八棱海棠株系生理特性的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(3):335-343
- HU A S, ZHANG X D, WANG W C, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics of two strains of *Malus × micromalus* Makino. with different salt tolerance[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(3):335-343
- [25] CELIK Ö, ATA K. The effect of salt stress on antioxidative enzymes and proline content of two Turkish tobacco varieties [J]. Turkish journal of biology, 2012, 36(3):339-352
- [26] 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
- [27] 胡远彬, 刘亚男, 张靓, 等. 自然低温胁迫下 8 个狼尾草属牧草品种(系)耐寒性初步评价[J]. 草学, 2025, (2):43-49
- HU Y B, LIU Y N, ZHANG L, et al. Preliminary evaluation of cold tolerance of 8 *Pennisetum* forage varieties (lines) under natural low temperature[J]. Journal of Grassland Science, 2025 (2):43-49
- [28] 姜子颖. 低温与干旱胁迫对小叶朴幼苗生理生化指标的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018:22-26
- JIANG Z Y. Effects of low temperature and drought stress on physiological and biochemical indexes of *Celtis bungeana* seedlings[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018:22-26
- [29] 张涵奇, 杨再强, 罗靖, 等. 花期低温对草莓叶片光合及气孔特性的影响[J]. 中国农业气象, 2024, 45(5): 525-536
- ZHANG H Q, YANG Z Q, LUO J, et al. Effect of low temperature on photosynthesis and stomatal characteristics of strawberry leaves during the flowering stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(5):525-536