

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.009

引用格式:赵春桥,房风光,郭强,等.多年生饲用狼尾草耐寒性评价研究[J].草地学报,2026,34(9):3234—3245

Zhao Chun-qiao, Fang Feng-guang, Guo Qiang, et al. Research on Evaluation of Cold Tolerance of Perennial Forage *Pennisetums*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3234—3245

多年生饲用狼尾草耐寒性评价研究

赵春桥^{1,2}, 房风光^{1,2}, 郭强¹, 李翠¹, 郑美¹, 岳跃森^{1*}, 范希峰^{1*}

(1. 北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所, 北京 100097; 2. 齐齐哈尔大学生命科学与农林学院, 黑龙江齐齐哈尔 161006)

摘要:为明确表征多年生饲用狼尾草(*Pennisetum* spp.)耐寒性的关键指标,本研究以42份狼尾草种质为材料,采用室内低温模拟试验和田间试验相结合的方法,分析了狼尾草苗期和全生育期生长生理特征、越冬率及相关性。低温胁迫显著降低幼苗干物质累积(41.55%)和株高(11.53%),叶片和分蘖节丙二醛含量显著升高90.43%和108.48%,渗透调节物质以及抗氧化酶活性响应显著,通过主成分分析筛选出分蘖节和叶片可溶性糖(SS)、丙二醛(MDA)含量等9个表征苗期抗寒性的指标;‘苏牧2号’‘桂牧1号’、杂交狼尾草7号和甜象草耐寒性较强(越冬率>75%),武强杂交狼尾草和中华粮草耐寒性较弱(越冬率<50%);越冬率与分蘖节MDA含量显著负相关,与芽SS含量显著正相关。MDA和SS含量是表征狼尾草耐寒性的重要指标。本研究为高抗寒性饲用狼尾草新种源的创制提供了理论参考。

关键词:杂交狼尾草;象草;耐寒性;生理响应;越冬率

中图分类号:S813.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3234-12

Research on Evaluation of Cold Tolerance of Perennial Forage *Pennisetum*

ZHAO Chun-qiao^{1,2}, FANG Feng-guang^{1,2}, GUO Qiang¹, LI Cui¹, ZHENG Mei¹,
YUE Yue-sen^{1*}, FAN Xi-feng^{1*}

(1. Institute of Grassland, Flowers and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Life Science, Agriculture and Forestry, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang Province 161006, China)

Abstract: To clarify the key indicators for evaluating the cold tolerance of perennial forage *Pennisetum* spp., a total of 42 *Pennisetum* germplasms were used as experimental materials in this study. Combining indoor low-temperature simulation with field trials, we analyzed the growth and physiological characteristics at the seedling stage and full growth period, overwintering rate, and their correlations of *Pennisetum*. The results showed that: Low-temperature stress significantly reduced seedling dry matter accumulation by 41.55% and plant height by 11.53%. The malondialdehyde (MDA) content in leaves and tiller nodes increased significantly by 90.43% and 108.48%, respectively. Osmotic regulation substances and antioxidant enzyme activities exhibited distinct responses to low temperature. A total of 9 indicators including soluble sugar and MDA contents in tiller nodes and leaves were screened out by principal component analysis to characterize cold tolerance at the seedling stage. Four accessions including ‘Sumu No. 2’ ‘Guimu No. 1’, Hybrid *Pennisetum* No. 7 and Sweet Elephant Grass exhibited strong cold tolerance with an above 75% overwintering rate, while WQ Hybrid *Pennisetum* and Chinese Forage Grass showed weak cold tolerance with a below 50% overwintering rate. The overwintering rate was significantly negatively correlated with MDA content in tiller nodes, and significantly positively correlated with bud soluble sugar content. Soluble sugar and MDA contents were crucial indicators for characterizing the cold tolerance of *Pennisetum*. This study provides a theoretical foundation for the breeding and innovation of new *Pennisetum* germplasms with high cold tolerance.

Key words: *Pennisetum americanum*×*Pennisetum purpureum*; *Pennisetum purpureum*; Cold resistance; Physiological responses; Winter survival rate

收稿日期:2026-03-03;修回日期:2025-05-08

作者简介:赵春桥(1986-),男,汉族,山东临清人,博士,副研究员,主要从事草逆境生理生态方向研究, E-mail: zhaochunqiao@baafs.net.cn;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: yueyuesen@baafs.net.cn; fanxifeng@baafs.net.cn

饲草产业已成为我国畜牧业高质量发展的战略性新兴产业,但其发展仍面临诸多严峻瓶颈,严重影响了饲草产业发展和国家粮食安全^[1]。(1)供需总量失衡,进口依赖度高:优质饲草产量缺口持续扩大,仅2024年全国饲草供需缺口达5000万吨,高蛋白饲草自给率仍低于70%^[2];(2)自主优质品种匮乏,品种数量差距显著^[3]:截至2022年,国家和省级审定饲草品种不足1000个,远低于美国等国外水平,且我国自主知识产权品种在抗逆性、高产性等核心性状上仍落后于国际先进水平^[4];(3)品种区域适配性不足:多年生饲草品种占比不足40%,适合北方寒冷地区品种较少,导致“种不适地”问题突出^[5]。因此,挖掘高产优质饲草种质资源、创制自主知识产权新品种,并推动规模化应用,是摆脱我国饲草产业困境的关键,具有重要战略意义。

多年生饲用狼尾草主要为杂交狼尾草(*Pennisetum americanum*×*P. purpureum*)和象草(*Pennisetum purpureum*),作为热带及亚热带地区典型的C₄高产多年生饲草^[6-7],产业潜能突出^[8]:(1)产量高,鲜草亩产可达150 t·hm⁻²以上,远高于青贮玉米的鲜草产量^[9];(2)营养丰富,营养期粗蛋白含量可达10%以上,氨基酸组成平衡,能有效替代部分精饲料^[8];(3)适应范围广,抗逆性较强,可在边际土地种植^[10]。近年来,该类饲草审定品种数量逐年增加,备受国内饲草领域研究人员关注。但因其起源于热带非洲,耐寒性先天不足,长江以北地区难以自然越冬^[11],且依赖种茎无性繁殖,导致每年种植,成本居高不下,严重限制了其在我国北方饲草短缺区域的推广^[12]。因此,很有必要开展多年生饲用狼尾草耐寒性评价研究,为新品种创制提供材料基础,具有重要意义。

目前,国内外关于杂交狼尾草与象草耐寒性的研究已取得初步进展,主要体现在品种筛选与驯化、生理生化响应和分子机制3方面。通过驯化选育的耐寒象草品系可在海拔2200~2500米高海拔区域正常越冬^[13];国外学者通过杂交育种培育出耐寒性较强‘Merkeron’象草新品系,表现出较强的耐寒特性^[14]。在生理生化响应机制方面,低温胁迫下,饲用狼尾草叶片叶绿素含量明显下降、光合速率降低,超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等抗氧化酶活性呈“先升后降”趋势,通过清除活性氧从而降低丙二醛含量,缓解细胞膜脂质过氧化损伤;叶片游离脯氨酸、可溶性糖和海藻糖等渗透调节物质显著积

累,利于维持细胞渗透压,缓解低温胁迫对细胞的损伤;也有报道表明,低温胁迫后,根部木质素含量增加,能够增强细胞壁机械强度以抵御低温伤害。上述生长、生理生化指标已被广泛应用到植物耐寒性评价鉴定中^[11]。基于这些指标,李建平^[11]通过田间冻害调查、低温半致死温度拟合、隶属函数综合分析等方法,筛选出GM1、JJ、WDH等耐寒象草种质资源。在分子机制研究方面,前人在不同植物中挖掘到了一批耐寒关键基因,但尚未开发出能够快速鉴定饲用狼尾草耐寒性的分子标记^[15]。

尽管前人在狼尾草耐寒性评价方面取得一定进展,但仍存在诸多不足^[11,16]:(1)不同研究采用的低温胁迫条件(温度梯度、胁迫时长)、选用的评价指标差异较大,导致不同研究间难以横向比较;(2)多数研究为室内模拟试验,缺乏田间越冬率数据的验证和支撑,评价结果田间适用性不足;(3)研究多聚焦于叶片的生理响应,忽略了对地下根茎和芽等关键越冬器官的研究;(4)尚缺乏简洁高效、省时节本的评价指标体系。

针对多年生饲用狼尾草耐寒性评价指标体系尚缺乏的问题,本研究采用室内控制试验与田间试验相结合的方法,系统研究低温胁迫后苗期生长及叶片、分蘖节生理生化特性、以及生长季末根茎与芽生理生化状态,并调查田间自然越冬率,通过相关性分析,旨在筛出能够表征越冬率的关键指标,为高抗寒狼尾草种质资源筛选与新品种创制提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究挑选代表性饲用狼尾草种质资源42份开展苗期低温胁迫试验(表1)。其中,杂交狼尾草1~8号为团队前期选育的优良单株,‘桂牧1号’和‘热研4号’为国家审定品种,28—42为采用‘热研4号’种茎进行辐射诱变产生的不同株系。42份种质资源中1~3号,6~9号,11~19号,21~22号,24号,共19份种质用于田间试验布置。试验开展前,统一采用种茎于12 cm营养钵中育苗,培养基质为草炭土,每盆中种植一个种茎,形成单株幼苗。在国家精准农业示范基地温室内培养2个月后开始低温胁迫试验。培养过程中保持所有材料管护措施一致。

表 1 供试的 42 份多年生饲用狼尾草种质
Table 1 The germplasms of perennial forage *Pennisetum*
tested in this study

编号 Item	种质资源名称 Germplasm resource	种质资源代号 Code name
1	杂交狼尾草 1 号	ZL1
2	杂交狼尾草 2 号	ZL2
3	杂交狼尾草 3 号	ZL3
4	杂交狼尾草 4 号	ZL4
5	杂交狼尾草 5 号	ZL5
6	杂交狼尾草 6 号	ZL6
7	杂交狼尾草 7 号	ZL7
8	杂交狼尾草 8 号	ZL8
9	象草 JJ	JJ
10	JJ-3-4	JJ34
11	甜象草	TXC
12	皇竹草	HZC
13	桂牧 1 号杂交象草	GM1
14	武强象草	WQXC
15	武强紫象草	WQZXC
16	热研 2300	RY2300
17	GG 杂狼	GGZL
18	武强杂交狼尾草	WQZL
19	热研 4 号王草	RY4
20	HZT-CK	HZTCK
21	金牧粮草	JMLC
22	中华粮草	ZHLC
23	HTZI-5-1	HTZI51
24	苏牧 2 号象草	SM2
25	JJT1-61	JJT161
26	W1CK	W1CK
27	W2CK	W2CK
28	W2T2-6-1	W2T261
29	W4T3-2-15①	W4T32151
30	W4T3-2-15②	W4T32152
31	W4T3-2-15③	W4T32153
32	W4T3-2-15④	W4T32154
33	W4T3-2-16③	W4T32163
34	W4T3-4-16②	W4T34162
35	W4T3-4-16③	W4T34163
36	W4T3-4-16④	W4T34164
37	W4T3-4-16⑤	W4T34165
38	W4T3-4-16⑥	W4T34166
39	W4T3-4-16⑦	W4T34167
40	W4T3-4-16⑧	W4T34168
41	W1T1-2-13	W1T1213
42	W1T1-4-22	W1T1422

注:表中黑色加粗红色标记种质为田间试验所用材料

Note: Germplasms marked in bold black and red in the table are the materials used in the field experiment

1.2 试验设计

1.2.1 苗期低温培养箱控制模拟试验 苗期低温胁迫试验于低温培养箱中开展。试验开展前首先

于温室内挑选各种质资源长势一致的幼苗植株进行试验。根据团队前期预试验结果,优化明确了低温胁迫处理条件和取样部位。根据前期研究,武汉的气温条件是评价杂交狼尾草和象草越冬率阈值区域,因此,苗期评价筛选试验参考了武汉冬季最高和最低气温的平均值,又进一步通过预试验明确了最适处理条件:处理(T):白天(10 h,10℃),黑夜(14 h,1℃),湿度 50%,光强 39 000 lx。对照(Control):白天(10 h,25℃),黑夜(14 h,20℃),湿度 50%,光强 39 000 lx。根据团队前期研究基础,此条件下,不同狼尾草种质幼苗无论在表型还是在生理生化方面均表现出明显差异。每份种质资源对照组和处理组均准备 6 单株作为 6 重复,在此循环条件下低温胁迫处理 3 天后对倒 2 叶片和分蘖节分别取样,液氮速冻后用于生理生化指标测定。苗期低温胁迫试验同时设置平行试验,用于低温胁迫处理 3 天后恢复生长,恢复生长 2 周后,分别剪取对照组和处理组新生组织样品,用于恢复生长后干物质累积量指标测定。

1.2.2 田间试验 根据团队前期研究基础和经验,在武汉江夏区中科院武汉植物园试验基地(30°27' N, 114°14' E),不同种质资源在自然条件下能够体现明显的越冬率梯度差异,是开展本研究适宜的试验场地。从 42 份种质资源中挑选核心种质资源 19 份进行田间试验布置,这 19 份资源来源比较清晰,在表型和品质方面体现出较大的差异,颇具代表性。种植地年无霜期较长,近 5 年平均气温 16.8℃,极端罕见最低温度可达-5℃,年平均降雨量 1300 mm,年平均日照时数 1800 h。种植地地势平坦,肥力均匀,为红壤土。于春季(4 月初)选取各种质资源长势一致的幼苗单株,试验采用随机区组设计。各种质资源均种植 5 小区,每小区 5 m×5 m,作为 5 重复。每小区 24 株,行距为 80 cm,种植初期,一次性浇足安家水,适时除草,营养生长期后使其完全处于自然生长状况。

在生长季末(11 月中旬),剪取各种质资源地下根茎附着的芽体组织,每小区随机选取 3 单株进行取样、并混合成为 1 重复,5 小区共获取 5 重复样品。取样后迅速将样品置于液氮速冻,保存于-80℃超低温冰箱中,用于各生理生化指标测定。取完样品后,将各种质资源所有植株地上部完全刈割,留茬高度约 15 cm,清理干净地上部凋落物,自然裸露,待次年春季(3 月底)调查各种质资源越冬返青情况。

1.3 指标测定与方法

苗期试验中低温胁迫处理后恢复生长干物质累积量采用烘干恒重法测定,叶片和根茎各渗透调节物质含量采用试剂盒微量法进行测定,具体操作严格按照试剂盒说明书进行操作,各酶活性采用酶联免疫吸附法参照试剂盒说明书进行测定。

1.4 数据统计与分析

数据均采用 Microsoft Excel 2010 软件进行整理。采用 R(4.1.0)中“ggplot2”与“FactoMineR”核心包完成统计分析和作图,组间差异采用独立样本 t 检验分析,相关性采用 Pearson 相关分析。苗期各生长、生理生化指标采用处理组与对照组的比值进行相关性分析。对叶片和分蘖节共 16 个指标进行标准化后主成分分析(PCA),以累计方差解释度达到 65% 以上作为主成分保留标准,并结合各指标在

保留主成分上的贡献度筛选关键评价指标

2 结果与分析

2.1 苗期多年生饲用狼尾草低温胁迫下生长生理生化响应特征

低温胁迫处理后,42 份狼尾草种质在生物物质累积干重和株高均呈现出显著降低的趋势(图 1)。就累积生物物质干重而言(图 1a),对照组数据变化范围为 0.15~0.59 g,试验组数据变化范围为 0.07~0.44 g。与对照组相比,试验组极显著降低 41.55% ($P<0.0001$);就株高而言(图 1b),两组数据均较为分散,对照组和试验组变化范围分别为 46.97~75.67 cm, 36.33~76.00 cm, 试验组平均值相比较对照组极显著降低 11.53% ($P<0.0001$)。各狼尾草种质在正常生长条件下和低温胁迫处理条件下生长特征均表现出显著差异。

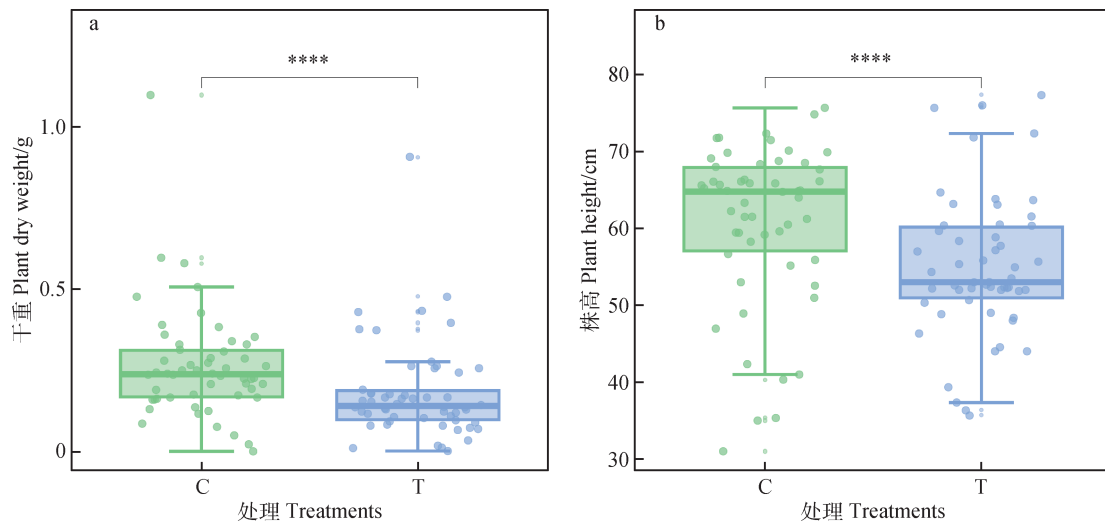


图 1 各种质低温胁迫处理后恢复生长后(a)干物质累积量和(b)株高差异

Fig. 1 Differences in (a) dry matter accumulation and (b) plant height of various germplasms after recovery from low-temperature stress
注:****代表差异极显著($P<0.0001$)

Note: **** indicates an extremely significant difference ($P<0.0001$)

低温胁迫处理后,各种质叶片生理生化特征均体现出显著差异(图 2a-i)。与对照相比,低温胁迫处理后,丙二醛含量数据分布较为集中,对照组数据变化范围为 6.13~129.93 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$,试验组数据变化范围为 14.20~203.31 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 。主要渗透调节物质可溶性蛋白、可溶性糖以及游离脯氨酸含量数据分布较为分散,对照组和实验组数据变化范围分别为:13.19~120.31 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 和 16.26~133.66 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$, 2.18~14.65 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 和 2.34~19.24 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$, 49.00~786.54 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 和 43.20~790.76 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 。超氧化

物歧化酶等各种酶活性数据分布在分散性方面与对照类似。与对照组相比,丙二醛含量(90.43%, $P<0.0001$)、过氧化物酶活性(83.71%, $P<0.0001$)、可溶性蛋白含量(18.81%, $P<0.01$)、可溶性糖含量(21.54%, $P<0.0001$)、游离脯氨酸含量(33.00%, $P<0.05$)和过氧化氢酶活性(83.71%, $P<0.0001$)均显著提高,超氧化物歧化酶活性(51.90%, $P<0.0001$)、1,5-二磷酸核酮糖羧化酶活性(47.57%, $P<0.0001$)和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性(44.92%, $P<0.0001$)均呈现极显著降低趋势。

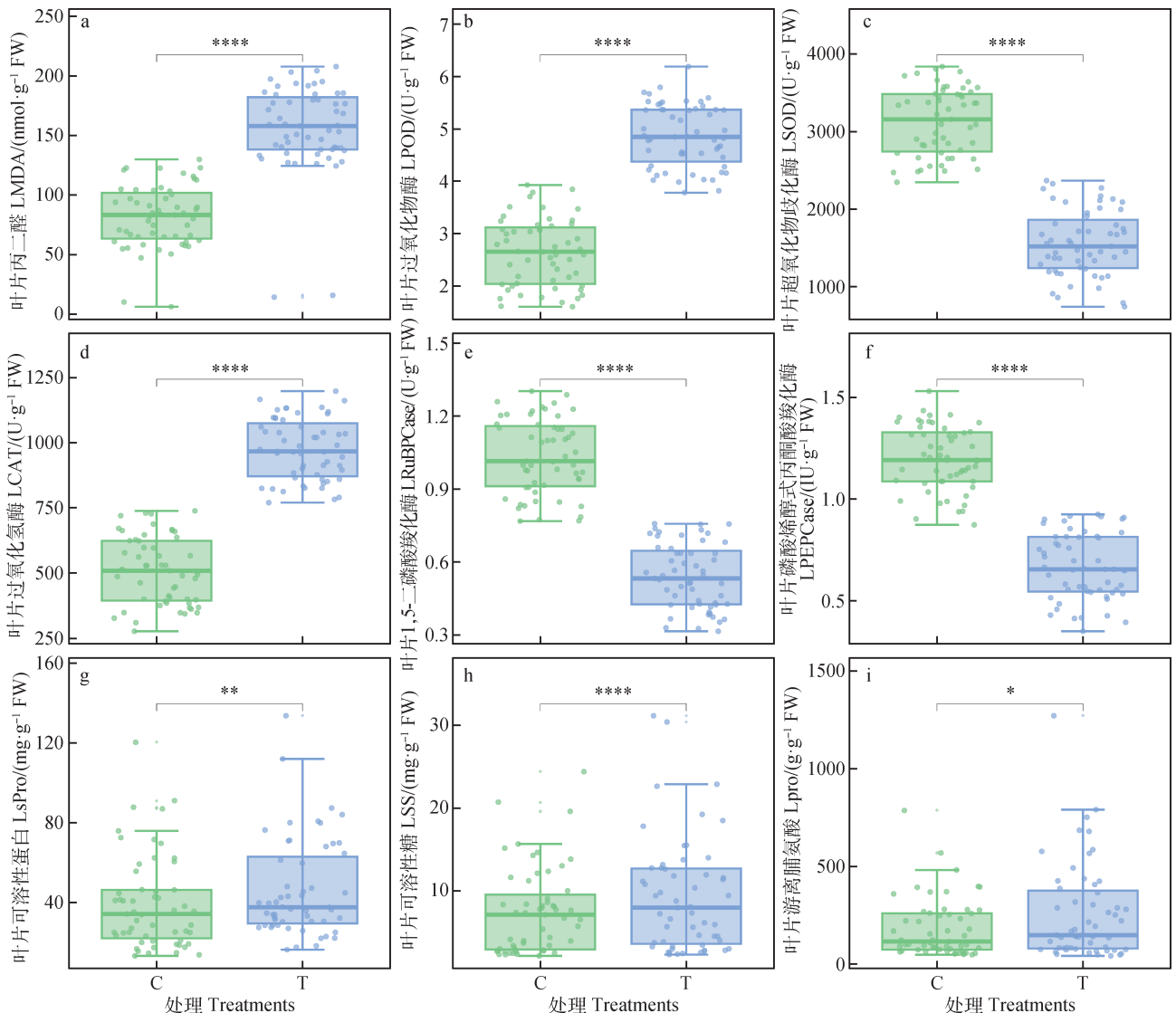


图2 各种质低温胁迫处理后叶片(a)丙二醛含量(b)过氧化物酶活性(c)超氧化物歧化酶活性(d)过氧化氢酶活性(e)1,5-二磷酸核酮糖羧化酶活性(f)磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性(g)可溶性蛋白含量(h)可溶性糖含量和(i)游离脯氨酸含量响应特征
Fig. 2 Response characteristics of (a) malondialdehyde (MDA) content, (b) peroxidase (POD) activity, (c) superoxide dismutase (SOD) activity, (d) catalase (CAT) activity, (e) ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase (RuBPCase) activity, (f) phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC) activity, (g) soluble protein content, (h) soluble sugar content, and (i) free proline content in leaves of various germplasms after low-temperature stress treatment

注: *代表差异显著($P < 0.05$), **代表差异极显著($P < 0.01$), ****代表差异极显著($P < 0.0001$)

Note: * indicates a significant difference ($P < 0.05$), ** indicates an extremely significant difference ($P < 0.01$), and **** indicates an extremely significant difference ($P < 0.0001$)

分蘖节生理生化指标测定结果表明,低温胁迫处理后分蘖节丙二醛含量显著增加(108.48%, $P < 0.0001$,图3a),主要渗透调节物质可溶性蛋白含量(35.96%, $P < 0.0001$,图3d)和可溶性糖含量(29.49%, $P < 0.0001$,图3e)均显著增加,分蘖节过氧化物酶活性显著增加(91.80%, $P < 0.0001$,图3b),而超氧化物歧化酶活性显著降低(50.48%, $P < 0.0001$,图3c)。分

蘖节各生理生化指标的响应特征与叶片响应类似。分散程度方面,试验组数据均比对照组数据较为分散,体现出不同种质对低温胁迫响应的明显差异。

进一步比较不同种质叶片与分蘖节丙二醛含量变化发现,两种器官对低温胁迫的膜脂过氧化响应并不同步(图2和3)。部分种质在叶片丙二醛显著升高的同时,分蘖节丙二醛仍维持在相对较低水

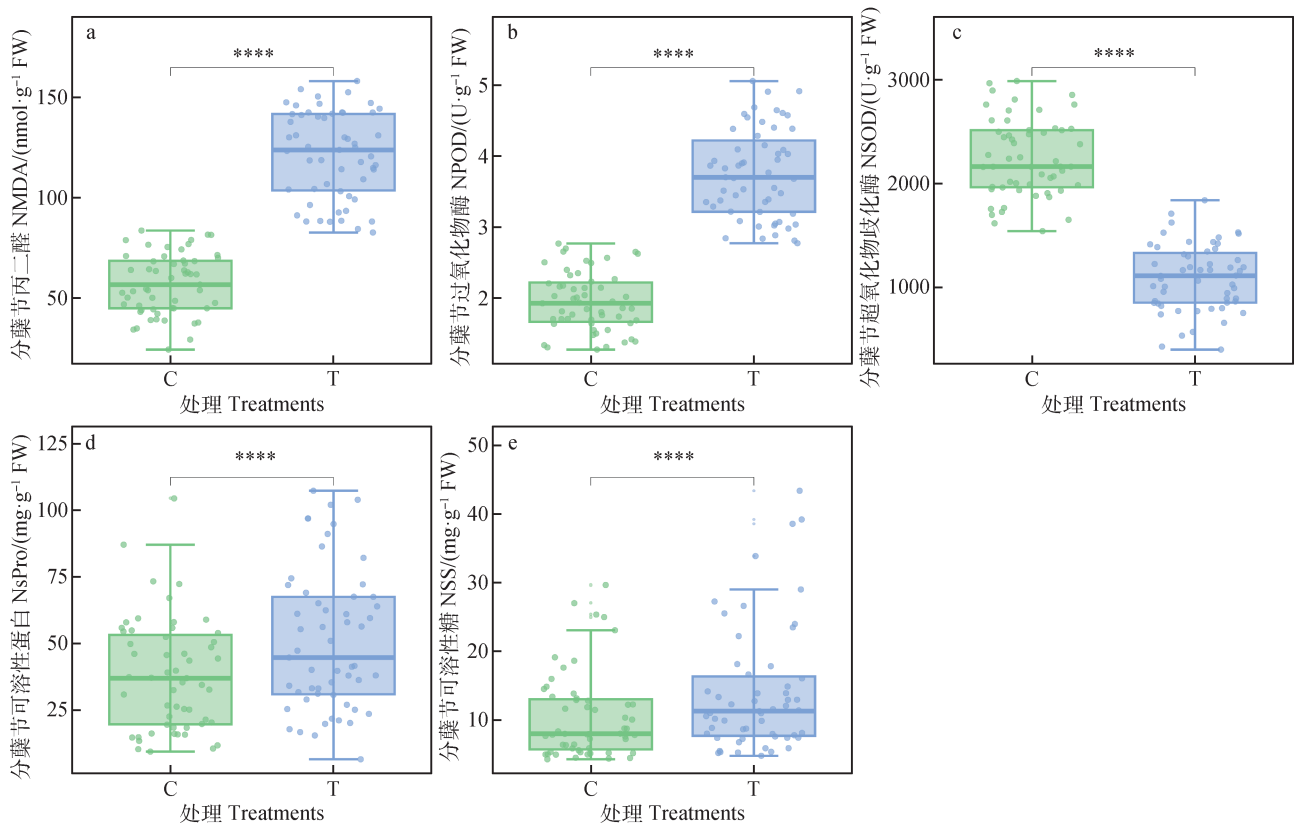


图3 各种质低温胁迫处理后分蘖节(a)丙二醛含量(b)过氧化物酶活性(c)超氧化物歧化酶活性(d)可溶性蛋白含量(e)可溶性糖含量响应特征

Fig. 3 Response characteristics of (a) malondialdehyde (MDA) content, (b) peroxidase (POD) activity, (c) superoxide dismutase (SOD) activity, (d) soluble protein content, and (e) soluble sugar content in the tiller nodes of various germplasms after low-temperature stress treatment

注:*代表差异显著($P<0.05$),**代表差异极显著($P<0.01$),****代表差异极显著($P<0.0001$)

Note: * indicates a significant difference ($P<0.05$), ** indicates an extremely significant difference ($P<0.01$), and **** indicates an extremely significant difference ($P<0.0001$)

平(图2和3)。例如,ZL7叶片丙二醛增幅为175.8%,分蘖节仅增加65.1%;RY4和ZL3也表现出类似趋势,叶片丙二醛增幅分别达到295.7%和188.1%,而分蘖节增幅分别为75.5%和84.2%(图2和3)。这一结果表明,不同种质在器官层面存在差异化低温响应模式。

叶片和分蘖节共16个生理生化指标主成分分析结果表明,第一主成分对方差总解释度为15.8%,第二主成分对方差解释度为13.2%,由于所测指标涵盖叶片和分蘖节两个组织,并涉及膜脂过氧化、抗氧化防御、渗透调节及光合代谢等多个生理过程,变量间信息分布较为分散,因此总体变异未集中于前两个主成分。以方差解释度65%以上作为标准,需要考虑前6个主成分,总解释度可达65.5%(图4a),综合考虑各指标对前6个主成分上的贡献度,筛选出关键表征指标9个,按照贡献度大

小排序分别为分蘖节可溶性糖含量、叶片丙二醛含量、分蘖节丙二醛含量、叶片可溶性糖含量、叶片过氧化物酶活性、恢复生长后株高、叶片磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性和过氧化物酶活性和恢复生长后累积生物质干重(图4b)。

2.2 多年生饲用狼尾草芽生理生化指标特征及田间越冬率

为了明确狼尾草地下芽中渗透调节物质含量和生理状态与越冬率间的关系,研究进一步对地下芽生理生化指标进行了测定,结果表明(图5a-f),在生长季末芽中过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性和过氧化物酶活性变化范围较大,分别为:1.08~3.67 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$, 525~2164 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和177~669 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$,主要渗透调节物质可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量变化范围分别为:15.83~88.00 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 4.57~

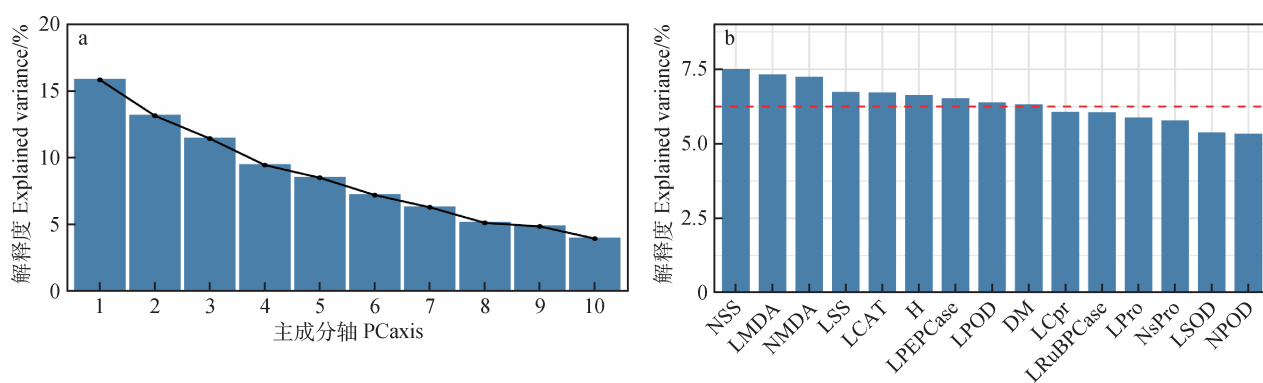


图 4 叶片和分蘖节各生理生化指标 (a) 主成分分析和 (b) 关键评价指标筛选

Fig. 4 Principal component analysis (a) and screening of key evaluation indicators (b) for various physiological and biochemical parameters in leaves and tiller nodes.

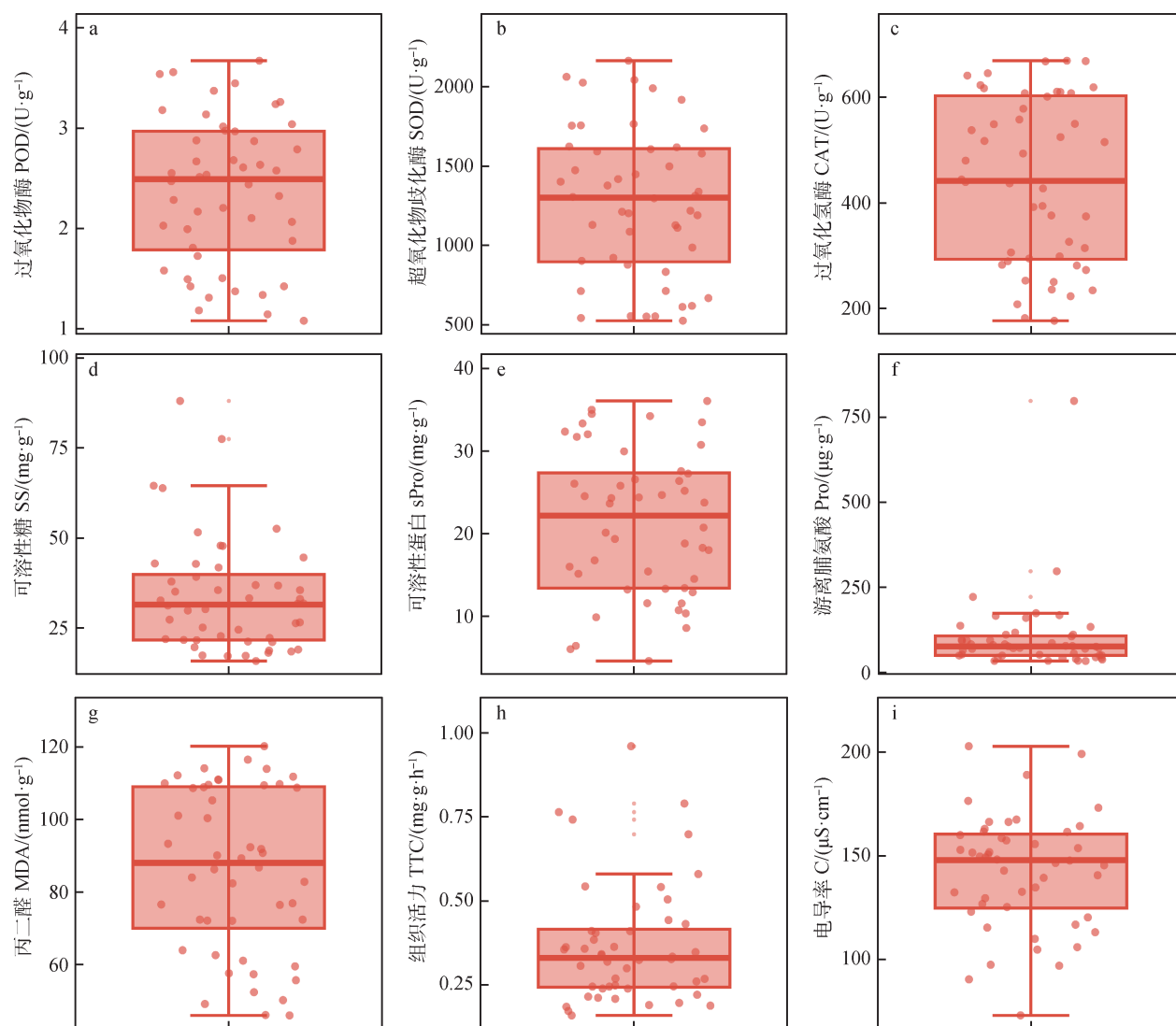


图 5 芽生理生化指标特征 (a) 过氧化物酶活性 (b) 超氧化物歧化酶活性 (c) 过氧化氢酶活性 (d) 可溶性糖含量 (e) 可溶性蛋白含量 (f) 游离脯氨酸含量 (g) 丙二醛 (h) 组织活力 (i) 电导率

Fig. 5 Characteristics of physiological and biochemical indicators in buds: (a) peroxidase (POD) activity, (b) superoxide dismutase (SOD) activity, (c) catalase (CAT) activity, (d) soluble sugar content, (e) soluble protein content, (f) free proline content, (g) malondialdehyde (MDA) content, (h) tissue vitality, and (i) electrical conductivity

36.07 mg·g⁻¹, 33.15~796.95 mg·g⁻¹。芽组织活力和电导率变化范围分别为:0.16~0.96 mg·g⁻¹·h⁻¹和73~203 μS·cm⁻¹细胞膜损伤主要指示性物质丙二醛含量变化范围为:45.89~120.16 nmol·g⁻¹。过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性、过氧化氢酶活性以及主要渗透调节物质可溶性糖含量均体现出较大的变化范围,可溶性蛋白含量数据相对比较集中,游离脯氨酸含量数据最为集中,不同种质间差异较小。

对田间种植的19份种质越冬率调查结果表明(图6),不同狼尾草种质田间越冬率体现出较大差异。其中以SM2越冬率最大,达到90%以上,WQZL越冬率最低,仅为33.33%。按照四分位划分抗寒性等级,强抗寒性(75%~100%)种质主要包括4份材料,分别为SM2、GM1、ZL7和TXC,大部分种质为一般抗寒性(50%~75%)材料,弱抗寒性(25%~50%)材料仅包括两份材料,分别为ZHLC和WQZL。

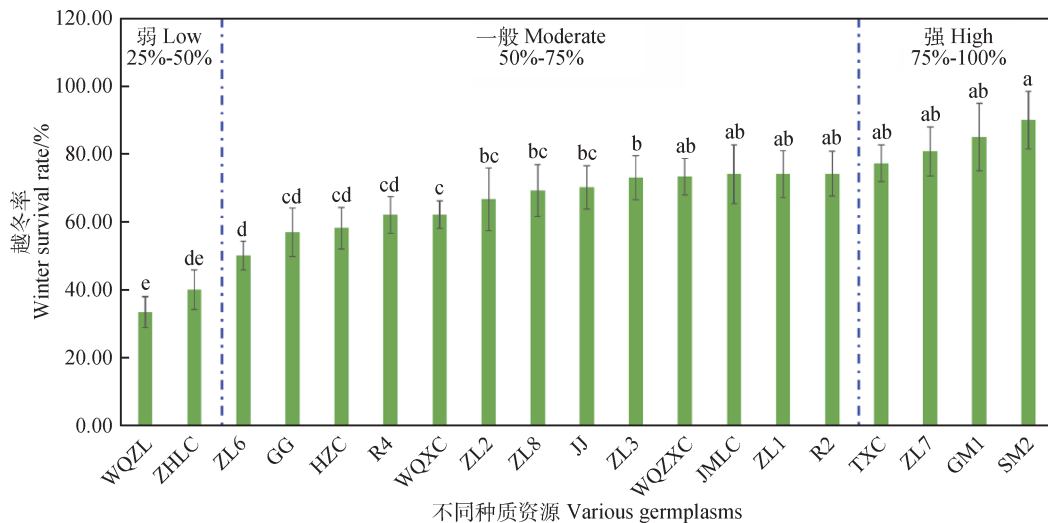


图6 不同狼尾草种质田间越冬率对比

Fig. 6 Comparison of field winter survival rates among different *Pennisetum* germplasms

注:图中不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences ($P < 0.05$)

2.3 各生理生化指标与越冬率相关性分析

苗期生长、生理生化指标和芽各生理生化指标与越冬率相关性分析结果表明(图7),越冬率与苗期叶片超氧化物歧化酶活性呈显著正相关关系($P < 0.05$),与叶片磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性呈现显著负相关关系($P < 0.05$),与分蘖节丙二醛($P < 0.001$)和分蘖节可溶性糖($P < 0.01$)呈极显著负相关关系。苗期各指标间也表现出一定关联关系。但与芽各生理生化指标相关性分析结果表明,越冬率仅与芽可溶性糖含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与游离脯氨酸含量呈显出一定的负相关关系。芽各生理生化指标间呈现的关联性较弱。

为更直观展示苗期分蘖节丙二醛含量与田间越冬率之间的关系,进一步绘制了散点图并进行了线性回归分析(图8),发现分蘖节丙二醛对照组与处理组的比值与越冬率呈极显著负线性关系,回归方程为 $y = -0.5969x + 0.9887$ ($R^2 = 0.5157$, $P <$

0.001)。说明随着分蘖节丙二醛比值升高,即受到低温胁迫后,随着分蘖节丙二醛的上升,材料的田间越冬率显著下降。

进一步标注4份强抗寒材料发现,‘桂牧1号’‘苏牧2号’‘甜象草’和‘杂交狼尾草7号’整体位于相对低NMDA、高越冬率区域,表明强抗寒材料在低温胁迫下分蘖节膜脂过氧化水平较低,与其较高的田间越冬能力相一致。

3 讨论

本研究以42份多年生饲用狼尾草种质为研究对象,通过室内低温模拟试验研究了饲用狼尾草苗期生长、生理生化响应特征,通过武汉田间试验研究了地下芽生理生化状态,并调查了越冬率,通过相关性分析筛选出表征越冬率的关键指标。通过室内控制试验,取样部位聚焦叶片和分蘖节是前人并未开展过的研究内容,体现了本研究的亮点,同

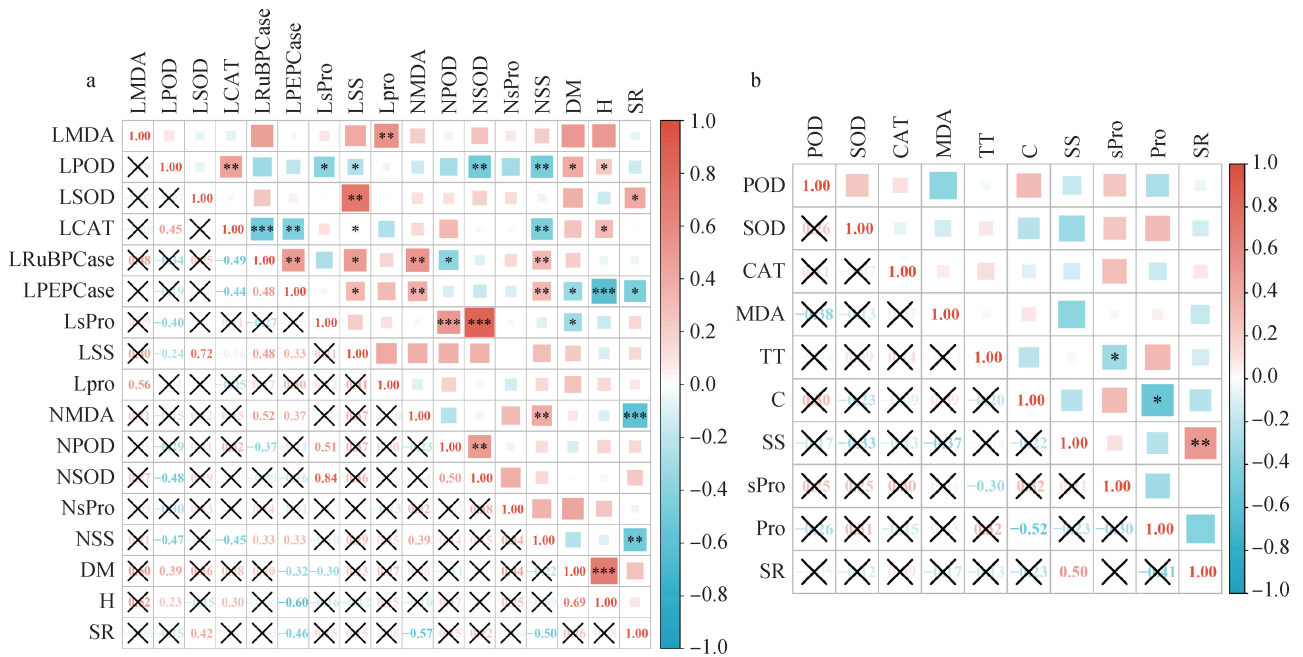


图7 (a)苗期各生长生理生化指标与(b)芽各生理生化指标与越冬率相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between (a) various growth, physiological and biochemical indicators at the seedling stage and (b) various physiological and biochemical indicators of buds, and the winter survival rate

注:图中红色代表正相关关系,蓝色代表负相关关系,*代表显著相关($P<0.05$),**代表极显著相关($P<0.01$),***代表极显著相关($P<0.001$)
Note: Red indicates a positive correlation, blue indicates a negative correlation. * indicates a significant correlation ($P<0.05$), ** indicates an extremely significant correlation ($P<0.01$), and *** indicates an extremely significant correlation ($P<0.001$)

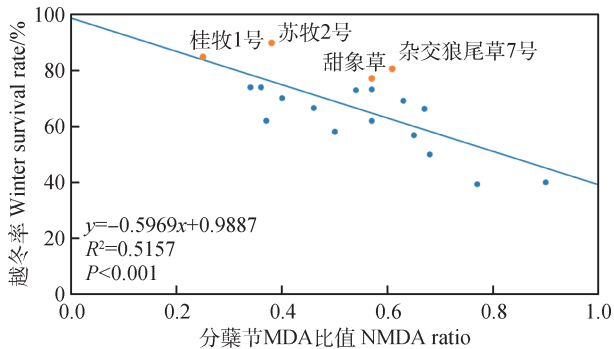


图8 苗期分蘖节丙二醛相对变化与田间越冬率的线性回归分析

Fig. 8 Linear regression analysis of the relative change of malondialdehyde (MDA) in tiller nodes at the seedling stage and the field winter survival rate

时结合田间试验的进一步关联分析和校正,筛选耐寒性鉴定的关键指标也是本研究的重要创新之处。

低温胁迫是影响植物生长发育的主要非生物胁迫之一,可通过破坏细胞结构、抑制生理代谢、干扰物质合成与转运等途径,从形态建成到生理生化反应等多维度抑制植物生长^[17-19]。本研究中42份多年生饲用狼尾草种质在苗期低温胁迫下,累积生物质干重极显著降低41.55%($P<0.0001$),株高极显著降低11.53%($P<0.0001$),直观反映出低温胁迫

对热带地区起源作物生长的显著抑制作用。本研究中,低温胁迫下,1,5-二磷酸核酮糖羧化酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性分别极显著降低47.57%、44.92%($P<0.0001$),狼尾草叶片光合作用关键酶活性严重受抑,进而导致光合同化产物和呼吸消耗的失衡,干物质累积严重受阻,生长被严重抑制。值得关注的是,低温胁迫下,狼尾草生物质累积的降幅(41.55%)远高于株高的降幅(11.53%),这种现象也在其他多种草本饲用植物中得到验证。株高的相对稳定则可能是饲用狼尾草通过维持基本的营养生长形态以适应低温环境的一种生态策略^[20-21]。

细胞膜系统的完整性是植物维持正常生理代谢的基础,低温胁迫首先会破坏细胞膜液晶结构,触发膜脂过氧化链式反应,丙二醛作为该过程的标志性产物,其含量变化直接反映细胞膜损伤程度^[22,23]。本研究结果表明,低温胁迫下狼尾草叶片丙二醛含量极显著提升90.43%($P<0.0001$),分蘖节增幅更高达108.48%($P<0.0001$),且分蘖节试验组指标数据分散性显著高于叶片,这一特征与羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvelev)、小麦(*Triticum aestivum* L.)和玉米(*Zea mays* L.)等其他作物

对低温响应的规律一致^[24-26]。作为重要的越冬器官,狼尾草分蘖节丙二醛数据的较高增幅和高分散性也反映了不同种质对低温胁迫响应和耐受性的差异,值得注意的是部分种质在叶片丙二醛显著升高时,分蘖节仍维持较低的丙二醛水平,例如ZL7的叶片丙二醛增幅分别达到175.8%,而分蘖节增幅仅为65.1%。这可能源于分蘖节作为关键越冬器官,其细胞膜稳定性直接关系到分生组织活性、养分运输及再生能力;而叶片即使在低温中受到较大损伤,后期仍可通过再生得到一定补偿。因此,分蘖节膜脂过氧化水平较叶片更能反映材料最终的越冬表现。本研究中显示低温下分蘖节中渗透调节物质增幅高于叶片,提示狼尾草对该器官具有更强的保护性调控,从而减轻关键越冬器官损伤。表明多年生饲用狼尾草在不同器官间可能存在“叶片优先受损—分蘖节优先保护”的差异化响应策略。这可能是部分种质耐寒性较强的重要生理基础。细胞膜的严重损伤直接引发细胞内物质外渗、代谢酶失活,成为狼尾草植株生长受抑的初始诱因。植物抗氧化酶系统是清除活性氧、缓解氧化损伤的重要防线,其中超氧化物歧化酶为活性氧清除的第一道防线,过氧化物酶则负责后续过氧化氢的分解^[17,27,28]。本研究中,狼尾草叶片与分蘖节的过氧化物酶活性均极显著升高,叶片增幅83.71% ($P<0.0001$)、分蘖节91.80% ($P<0.0001$)。超氧化物歧化酶活性则均极显著降低,叶片降幅51.90% ($P<0.0001$)、分蘖节50.48% ($P<0.0001$)。超氧化物歧化酶活性正好处于“先升高后降低”中降低的过程中,低温胁迫抑制了超氧化物歧化酶蛋白合成或活性中心构象变化,其功能有所减弱,而过氧化物酶成为清除活性氧的主导酶类,通过活性大幅提升弥补超氧化物歧化酶功能的缺失。

为缓解细胞膜脂过氧化损伤与渗透势失衡,植物会进一步启动渗透调节系统,通过积累可溶性蛋白、可溶性糖、游离脯氨酸等渗透调节物质维持细胞渗透压与细胞膜稳定性,且该系统的响应呈现出明显的器官优先性^[29,30]。本研究中,狼尾草叶片与分蘖节的渗透调节物质均显著增加,其中叶片可溶性蛋白、可溶性糖、游离脯氨酸含量分别提升18.81% ($P<0.01$)、21.54% ($P<0.0001$)、33.00% ($P<0.05$),而分蘖节可溶性蛋白、可溶性糖增幅更高达35.96%、29.49% ($P<0.0001$)。这表明狼尾草会向分蘖节这一关键越冬器官优先分配渗透调

节物质,通过降低细胞冰点,维持细胞膜液晶结构,最大程度缓解低温带来的膜损伤,是其应对低温的核心生理调控机制^[31]。但值得注意的是,渗透调节物质的积累仅能在一定程度上缓解损伤,无法抵消细胞膜破坏与光合抑制带来的生长阻滞,且试验组指标的高分散性,也反映出不同种质渗透调节能力的显著差异,这也是不同种质耐寒性差异评价的重要生化基础。

虽然前人也通过测定广泛通用的生理生化指标对饲用狼尾草耐寒性进行了评价筛选,但从生长、不同生理响应和生化作用过程分别设置代表性指标进行综合评价,并筛选关键表征指标,是前人未曾开展过的研究^[11,32]。本研究通过主成分分析筛选出9个狼尾草抗寒关键表征指标,其中分蘖节可溶性糖含量、叶片丙二醛含量贡献度最高,表明渗透调节能力与细胞膜稳定性是评价狼尾草抗寒性的核心指标,且分蘖节指标的重要性高于叶片,这为狼尾草抗寒种质快速筛选提供了简便、高效的检测指标体系。在此基础上,进一步通过田间试验,收集生长季末芽生理生化指标特征,并采用越冬率这一衡量耐寒性最为准确的指标予以关联校正,在饲用狼尾草耐寒性评价研究中也属首次。本研究通过田间试验直接证实了不同种质越冬率的极大差异,并明确了丙二醛含量与越冬率相关性最强,可作为表征不同种质越冬率和耐寒性的关键表征指标之一,实现了多年生饲用狼尾草早期室内耐寒性简单高效评价的目标。除此之外,与越冬率关联性很强的芽可溶性糖含量,佐证了芽中可溶性糖的积累是狼尾草田间越冬的关键保障,这与多年生草本植物地下芽通过积累碳水化合物应对冬季低温的生理特性相符。作为选择性指标可进一步提升不同种质越冬率和耐寒性鉴定的准确性。

本研究也存在一定的局限性,例如种质资源数量有限,影响了关键指标的筛选;田间试验仅在武汉一地开展,虽然为两年数据,但缺乏不同地点空间广泛代表性;仅在生长季末对芽取样、测定生理生化指标,缺乏越冬期关键阶段的动态变化特征等。在后续研究过程中,将不断克服以上问题,进一步优化耐寒性鉴定标准和体系。另外,采用多组学,如转录组、代谢组和基因组等,从分子与代谢层面挖掘耐寒关键基因,开发高效精准分子标记,解析关键代谢小分子物质,也是将来此项研究需要开展的研究内容^[33-35]。

4 结论

基于42份种质筛选出多年生饲用狼尾草苗期耐寒性评价关键指标:分蘖节可溶性糖含量、叶片丙二醛含量、分蘖节丙二醛含量、叶片可溶性糖含量、叶片过氧化物酶活性、恢复生长后株高、叶片磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶活性和过氧化物酶活性和恢复生长后累积生物量干重;明确了19份核心种质越冬率差异,并完成了耐寒性等级划分。‘苏牧2号’、‘桂牧1号’、杂交狼尾草7号和甜象草越冬率均在75%以上,为强耐寒种质;武强杂交狼尾草和中华粮草越冬率低于50%,为弱耐寒种质;其余均为一般耐寒种质抗寒性较弱;以越冬率为重要依据,筛选出表征多年生饲用狼尾草耐寒性的关键指标:苗期分蘖节丙二醛含量和生长季末地下芽可溶性糖含量。

参考文献

- [1] 于法稳,黄鑫,王广梁. 畜牧业高质量发展:理论阐释与实现路径[J]. 中国农村经济,2021(4):85-99
YU F W, HUANG X, WANG G L. High-quality development of animal husbandry: Theoretical explanation and implementation path[J]. China Rural Economy, 2021(4):85-99
- [2] 李辉尚,李美琪,黄晓慧,等. 农业强国战略背景下中国大豆供给安全:现实基础,潜力研判与策略选择[J]. 农业经济问题,2024,45(7):48-58
LI H S, LI M Q, HUANG X H, et al. Soybean supply security in China under the strategic background of an agricultural power: The current basis, potential assessment, and strategy choices[J]. Agricultural Economic Issues, 2024,45(7):48-58
- [3] 南志标,王彦荣,贺金生,等. 我国草种业的成就,挑战与展望[J]. 草业学报,2022,31(6):1
NAN Z B, WANG Y R, HE J S, et al. Achievements, challenges and prospects of China's grass seed industry[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(6):1
- [4] 刘志鹏,刘文献,杨青川,等. 我国牧草育种进展及存在问题[J]. 中国科学基金,2023,37(4):528-536
LIU Z P, LIU W X, YANG Q C, et al. Progress and existing problems in pasture breeding in China[J]. China Science Fund, 2023,37(4):528-536
- [5] 林克剑,刘志鹏,罗栋,等. 饲草种质资源研究现状,存在问题与发展建议[J]. 植物学报,2023,58(2):241-247
LIN K J, LIU Z P, LUO D, et al. Current research status, existing problems and development suggestions of forage germplasm resources [J]. Acta Botanica Sinica, 2023, 58 (2) : 241-247
- [6] 王静,沈文彤,张蕴薇,等. 种植密度和刘割频率对杂交狼尾草产量和品质的影响[J]. 草地学报,2010,18(4):589-593
WANG J, SHEN W T, ZHANG Y W, et al. Effects of planting density and cutting frequency on yield and quality of hybrid *Pennisetum* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010,18(4):589-593
- [7] 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. Analysis of relationship between several biological traits and yield of elephant grass [J]. Acta Agrestia Sinica, 2009,17(5):670-674
- [8] 侯新村,滕珂,郭强,等. 狼尾草属牧草研究进展[J]. 植物学报,2022,57(6):814-825
HOU X C, TENG K, GUO Q, et al. Research progress on the *Pennisetum* genus forage grass [J]. Acta Botanica Sinica, 2022,57(6):814-825
- [9] 刘贵波,仁甫. 几种饲草作物的饲用品质及产草量比较试验[J]. 作物杂志,2005(4):20-22
LIU G B, REN F. Comparative experiments on the forage quality and yield of several forage crops [J]. Crops Journal, 2005(4):20-22
- [10] 李萍,陈鑫,赵春桥,等. 高大禾草的栽培与综合利用研究进展[J]. 植物学报,2024,59(5):847-860
LI P, CHEN X, ZHAO C Q, et al. Research progress on the cultivation and comprehensive utilisation of tall grasses [J]. Acta Botanica Sinica, 2024, 59(5):847-860
- [11] 李建平. 狼尾草属19份资源耐寒性评价[D]. 昆明:云南农业大学,2024:57
LI J P. Evaluation of cold tolerance of 19 resources of the *Pennisetum* genus [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2024:57
- [12] 温海峰,范希峰,朱毅,等. 杂交狼尾草作为能源植物的研究进展[J]. 中国农学通报,2017,33(3):99-104
WEN H F, FAN X F, ZHU Y, et al. Research progress on hybrid *Pennisetum* as an energy crop [J]. Chinese Agricultural Bulletin, 2017,33(3):99-104
- [13] 邹冬梅,蒋昌顺. 我国热带牧草育种现状与前景[J]. 中国草地,2002,24(5):65-68
ZOU D M, JIANG C S. Current status and prospects of tropical forage breeding in China [J]. Chinese Grassland, 2002, 24 (5):65-68
- [14] BURTON G W. Registration of 'Merkeron' napiergrass [J]. Crop Science, 1989,29(6):1327
BURTON G W. Registration of 'merkeron' napiergrass [J]. Crop Science, 1989,29(5): cropscl1989.0011183X0029000500 50x
- [15] 景海春,张景昱,金京波,等. 饲草作物基础生物学与生物育种[J]. 中国科学基金,2023,37(4):537-551
JING H C, ZHANG J Y, JIN J B, et al. Basic biology and biological breeding of forage crops [J]. National Natural Science Foundation of China, 2023,37(4):537-551
- [16] 陆皎云,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):1-10
LU J Y, TIAN H, XIONG J B, et al. Comprehensive evaluation of cold tolerance of seedlings of 14 native *Pennisetum* mate-

- rials[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(8):1-10
- [17] 吴广霞,唐献龙,杨德龙,等. 植物低温胁迫生理进展[J]. 作物杂志, 2008(3):17-19
WU G X, TANG X L, YANG D G. Advances in the study of plant physiological responses to low-temperature stress [J]. Crop Journal, 2008(3):17-19
- [18] 权威,薛文通,赵天瑶,等. 植物对低温胁迫的响应机制研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(2):14-22
QUAN W, XUE W T, ZHAO T Y, et al. Research progress on the response mechanisms of plants to low temperature stress [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(2):14-22
- [19] 王芳,王淇,赵曦阳. 低温胁迫下植物的表型及生理响应机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2019, 17(15):5144-5153
WANG F, WANG Q, ZHAO X Y. Research progress on the phenotypic and physiological response mechanisms of plants under low temperature stress [J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(15):5144-5153
- [20] 李轶冰,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. Physiological changes and cold resistance comparison of different Poaceae forage under low-temperature treatment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3):1341-1347
- [21] 毛桃桃,赵小强,柏小栋,等. 低温胁迫对玉米幼苗光合性能,抗氧化酶系统及相关基因表达的影响[J]. 中国农业科技导报, 2025, 27(5):49-58
MAO T T, ZHAO X Q, BAI X D, et al. Effects of low-temperature stress on photosynthetic performance, antioxidant enzyme system and related gene expression in maize seedlings [J]. China Agricultural Science and Technology Bulletin, 2025, 27(5):49-58
- [22] 姜述君,常纓,范文艳,等. 温度逆境锻炼对低温胁迫下番茄幼苗细胞膜脂质过氧化产物及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10):444-448
JIANG S J, CHANG Y, FAN W Y, et al. Effects of temperature stress training on lipid peroxidation products and antioxidant enzyme activities in tomato seedlings under low temperature stress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(10):444-448
- [23] 项洪涛,郑殿峰,何宁,等. 植物对低温胁迫的生理响应及外源脱落酸缓解胁迫效应的研究进展[J]. 草业学报, 2021, 30(1):1-10
XIANG H T, ZHENG D F, HE N, et al. Research progress on the physiological responses of plants to low-temperature stress and the alleviating effects of exogenous abscisic acid [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1):1-10
- [24] 秦东玲,李钊,尉菊萍,等. 作物抗冷性及其化学控制机理研究进展[J]. 作物杂志, 2016(4):26-35
QIN D L, LI Z, WEI J P, et al. Research progress on crop cold resistance and its chemical regulation mechanisms [J]. Crop Journal, 2016(4):26-35
- [25] 关贤交,欧阳西荣. 玉米低温冷害研究进展[J]. 作物研究, 2004(S1):353-357
GUAN X J, OUYANG X R. Research progress on low-temperature cold damage in maize [J]. Crop Research, 2004(S1):353-357
- [26] 刘国兵,焦德志,周婵. 羊草生物学和生态学特性研究进展[J]. 生态科学, 2024, 43(6):1-10
LIU G B, JIAO D Z, ZHOU C. Research progress on the biological and ecological characteristics of *Leymus chinensis* [J]. Ecological Science, 2024, 43(6):1-10
- [27] 计淑霞,戴绍军,刘炜. 植物应答低温胁迫机制的研究进展[J]. 生命科学, 2010, 22(10):973-979
JI S X, DAI S J, LIU W. Research progress on the mechanisms of plant response to low temperature stress [J]. Life Sciences, 2010, 22(10):973-979
- [28] 尹永强,胡建斌,邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1):105-110
YIN Y Q, HU J B, DENG M J. Research progress on the antioxidant system of plant leaves and their response to abiotic stress [J]. Chinese Agricultural Bulletin, 2007, 23(1):105-110
- [29] 孙萌,罗志雄,彭敏,等. 低温对水稻幼苗根系活性氧代谢及其相关基因表达的影响[J]. 分子植物育种, 2025, 23(24):1-12
SUN M, LUO Z X, PENG M, et al. Effects of low temperature on reactive oxygen metabolism in rice seedling roots and the expression of related genes [J]. Molecular Plant Breeding, 2025, 23(24):1-12
- [30] 林佳怡,陈强,张磊,等. 褪黑素在植物低温胁迫中的研究进展[J]. 生物技术通报, 2025, 41(7):1-10
LIN J Y, CHEN Q, ZHANG L, et al. Research progress on melatonin in plant low-temperature stress [J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(7):1-10
- [31] XU Q, YAN Y, WEI Q, et al. Salicylic acid alleviates cold stress in rice via regulating nutrient absorption, osmotic material content, antioxidation system, and expression of cold tolerance genes [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2025, 44(6):3260-3272
- [32] 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 eight *Pennisetum* forage varieties (lines) under natural low-temperature stress [J]. Grass Science, 2025(2):43-49
- [33] HU Y, SUN M, LUO D, et al. Transcriptome profiling the response of elephant grass (*Cenchrus purpureus*) root to cold stress [J]. Grass Research, 2025, 5(1):1-15
- [34] MAO C, ZHANG Y, YANG D, et al. Proteomic analysis reveals lignin and trehalose pathways involved in cold stress response of elephant grass [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025(338):149707
- [35] WU B, LUO D, YUE Y, et al. New insights into the cold tolerance of upland switchgrass by integrating a haplotype-resolved genome and multi-omics analysis [J]. Genome Biology, 2025, 26(1):128