

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.020

引用格式:贾纪原,林松,杨丹,等.象草品种(系)的生产性能比较及区域越冬性研究[J].草地学报,2026,34(8):2971–2979
JIA Ji-yuan, LIN Song, YANG Dan, et al. Comparative Study on Production Performance and Regional Overwintering Ability of Elephant Grass Varieties (Lines)[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (8):2971–2979

象草品种(系)的生产性能比较及区域越冬性研究

贾纪原¹, 林松¹, 杨丹¹, 冀士俊¹, 邹晓彬¹, 胡志勇², 靳雅荣¹, 严海东¹, 黄琳凯^{1*}

(1. 四川农业大学草业科技学院, 四川成都 611130; 2. 四川久鼎绿科工程技术有限公司, 四川成都 610100)

摘要:筛选适宜成都平原及周边生态区种植的狼尾草属(*Pennisetum*)牧草品种,明确其生产性能、营养品质及抗寒性。以9个象草(*P. purpureum*)和杂交狼尾草品种(系)为材料,在崇州开展3年田间试验,测定农艺性状、产量、营养品质、越冬率及低温胁迫生理指标,结合隶属函数与灰色关联度分析进行综合评价。GM1的鲜草产量最高,为203 121 kg·hm⁻²,其次为CY1(183 138 kg·hm⁻²),第三为JMLC(168 798 kg·hm⁻²),CN005可溶性糖含量最高(91.19 mg·g⁻¹),GM1粗蛋白(6.82%)和粗脂肪(1.03%)含量最高,营养品质最优;CY1在崇州、新津等低海拔地区越冬率达95%以上,四川美姑等高海拔凉山地区亦表现稳定,并且抗寒生理综合评价排名第一。GM1适合作为高产型品种推广,GM1适合青贮,CY1抗寒性强,适宜在西南冷凉山区推广。本研究为成都平原及类似生态区狼尾草的品种选择和抗寒机制解析提供了科学依据。

关键词:狼尾草属;隶属函数;灰色关联度分析;农艺性状;越冬率

中图分类号:S324

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-2971-09

Comparative Study on Production Performance and Regional Overwintering Ability of Elephant Grass Varieties (Lines)

JIA Ji-yuan¹, LIN Song¹, YANG Dan¹, JI Shi-jun¹, ZOU Xiao-bin¹, HU Zhi-yong², JIN Ya-rong¹,
YAN Hai-dong¹, HUANG Lin-kai^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan Province 611130, China;

2. Sichuan Jiuding Lvke Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan Province 610100, China)

Abstract: To screen *Pennisetum* forage varieties suitable for cultivation in the Chengdu Plain and surrounding ecological zones and clarify their production performance, nutritional quality, and cold resistance, Using nine elephant grass and hybrid *Pennisetum* varieties (lines) as materials, a three-year field experiment was conducted in Chongzhou. Agronomic traits, yield, nutritional quality, winter survival rate, and physiological indicators under low-temperature stress were measured. Comprehensive evaluation was performed using the membership function method and grey correlation degree analysis. GM1 had the highest fresh yield (203 121 kg·hm⁻²), followed by CY1 (183 138 kg·hm⁻²) and JMLC (168 798 kg·hm⁻²), respectively. CN005 had the highest soluble sugar content (91.19 mg·g⁻¹). GM1 had the highest crude protein (6.82%) and crude fat (1.03%) content, indicating the best nutritional quality. CY1 achieved a winter survival rate of over 95% in low-altitude areas such as Chongzhou and Xinjin, and also showed stable performance in high-altitude cold areas such as Meigu, Sichuan, ranking first in the comprehensive evaluation of cold resistance physiology. GM1 was suitable for promotion as a high-yielding variety, GM1 was suitable for silage, and CY1 possessed strong cold resistance, making it suitable for promotion in high-altitude areas. This study provides a scientific basis for variety selection and cold resistance mechanism analysis of *Pennisetum* in the Chengdu Plain and similar ecological zones.

Key words: *Pennisetum*; Membership function; Grey correlation degree analysis; Agronomic traits; Winter survival rate

收稿日期:2026-04-07;修回日期:2026-04-30

作者简介:贾纪原(1997-),男,满族,河北承德人,博士研究生,主要从事牧草基因资源挖掘及分子育种研究,E-mail:jy13558640726@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:huanglinkai@sicau.edu.cn

狼尾草属(*Pennisetum*)牧草属于禾本科黍亚科一年或多年生草本植物,全世界约有 140 种,主要分布于热带和亚热带地区^[1]。我国人工栽培利用的主要有多年生象草(*P. purpureum*)、一年生美洲狼尾草(*P. glaucum*)及其杂交种杂交狼尾草(*P. purpureum*×*P. glaucum*)^[2]。象草生长速度快、生物量高、营养品质优良,是草食家畜和鱼类的优质青饲料,亦可作为造纸原料和能源植物;杂交狼尾草则兼具高产、抗逆、优质等杂种优势。随着我国畜牧业的发展以及“粮改饲”政策的推进,优质饲草的供需矛盾日益凸显^[3]。据农业农村部测算,优质饲草年需求缺口近 5000 万 t。狼尾草作为西南地区重要的刈割型牧草,筛选高产优质品种并推广种植,是缓解饲草短缺的有效举措^[4]。

自 20 世纪 80 年代我国引进象草和杂交狼尾草以来,相继开展了大量引种驯化、杂交育种及分子育种工作,取得了显著的经济和生态效益^[5]。截至目前,我国已有‘桂牧 1 号’‘热研 4 号’‘川育 1 号’等多个狼尾草属牧草品种通过国家审定^[6]。然而,现有狼尾草主栽品种大多选育自热带地区,耐寒性普遍欠佳,在西南冷凉区域越冬率低、产量不稳定,制约了其推广应用。成都平原气候温和、雨量充沛,但冬季低温仍对多年生牧草的越冬构成挑战^[7]。田静等^[8]对‘热研 4 号’‘桂牧 1 号’等 4 个狼尾草属牧草的饲用价值进行比较分析,发现不同品种间的产量和营养价值存在显著差异。杨智青等^[9]在江苏沿海滩涂盐碱地对 17 个杂交狼尾草品种的生产性状进行评价,筛选出适宜该地区推广的优良品种。目前,针对狼尾草在成都平原的系统品种比较、营养品质评价及区域越冬性研究尚不充分,主推品种的适应边界与推广潜力尚不明确。

本研究以国内主推象草和杂交狼尾草品种

(系)为研究材料,并将成都平原及周边生态区当前广泛种植的象草商品材料‘金牧粮草’‘热研 4 号’‘桂闽引’和‘桂牧 1 号’作为对照纳入田间试验。在成都平原典型区域(崇州)开展多年品种比较试验,系统评估其农艺性状、产草量、营养品质及越冬性能,并结合四川、云南、贵州等地越冬率调查数据,剖析主推品种的区域适应性,旨在筛选适宜成都平原及周边地区的优质狼尾草种源,为其推广利用和品种保护提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

品种比较试验于 2023 年 7 月至 2025 年 12 月在四川省崇州市桤泉镇的四川农业大学现代农业研发基地实施。该基地地处东经 103°39′,北纬 30°32′,海拔 508 m,属亚热带湿润季风气候,四季特征分明,春秋季节时长较短,冬夏季时长较长,日照时长偏少,降水量充沛,无霜期相对较长。2023 年至 2025 年试验期间,年平均气温为 15.9℃,最热月(2024 年 8 月)平均气温为 28.5℃,极端高温可达 39.4℃,最冷月(2024 年 1 月)平均气温为 5.8℃,极端低温可达-1.5℃。年平均日照时数为 1161.5 h,年平均降水量为 1112.4 mm,平均无霜期为 285 d。土壤 pH 值为 6.2,有机质含量 37.6 g·kg⁻¹,全氮 2.03 mg·kg⁻¹,碱解氮 135.7 mg·kg⁻¹,有效磷 10.2 mg·kg⁻¹,速效钾 101.1 mg·kg⁻¹。

1.2 供试材料

供试狼尾草属牧草品种(系)共 9 个,分别是‘RY4’‘GM1’‘GMY’‘CY1’‘ZJ 1001’‘JMLC’‘HJ’‘CN005’‘CN007’(表 1),均来源于四川农业大学草业科技学院。

表 1 9 份参试狼尾草品种(系)信息

Table 1 Information of nine *Pennisetum* cultivars (lines) tested

品种(系)名 Cultivar (Line)	编号 Number	种名 Species	品种类型 Variety type
热研 4 号 Reyan 4 hao	RY4	杂交狼尾草(<i>Pennisetum purpureum</i> × <i>P. thyoides</i>)	国审引进品种 Introduced variety
桂牧 1 号 Guimu 1hao	GM1	杂交象草[(<i>P. glaucum</i> × <i>P. purpureum</i>)× <i>P. purpureum</i>]	国审育成品种 Breeding variety
桂闽引 Guimin Yin	GMY	象草(<i>Pennisetum purpureum</i>)	国审引进品种 Introduced variety
川育 1 号 Chuanyu 1hao	CY1	象草(<i>Pennisetum purpureum</i>)	国审育成品种 Breeding variety
杂交 1001Zajiao 1001	ZJ1001	杂交狼尾草(<i>P. glaucum</i> × <i>P. purpureum</i>)	新品系 New line
JMLC	JMLC	象草(<i>Pennisetum purpureum</i>)	商业材料 Commercial variety
HJ	HJ	象草(<i>Pennisetum purpureum</i>)	新品系 New line
CN005	CN005	象草(<i>Pennisetum purpureum</i>)	新品系 New line
CN007	CN007	象草(<i>Pennisetum purpureum</i>)	新品系 New line

1.3 试验设计与方法

1.3.1 田间试验设计 试验采用随机区组设计,设置9个品种(系),进行3次重复,共计27个小区,各小区面积为 $30\text{ m}^2(6\text{ m}\times 5\text{ m})$,小区间距为1 m,试验地四周设置1 m保护行。试验于2023年7月15日进行播种,播种前施加复合肥 $50\ 750\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 作为基肥,采用种茎穴播方式播种:选取粗壮、无病且无损伤的植株割取种茎,以包含2个茎节为标准,将种茎芽尖向上倾斜插入土壤,使土壤覆盖一个茎节,株距为60 cm,行距为100 cm,每个小区均匀种植60株。播种后持续观察,若出现缺苗情况及时补栽。在整个生长期适时开展中耕除草、病虫害防治工作。

1.3.2 测定指标及方法 农艺性状:每次刈割时每小区随机选10株,测定株高、茎粗、分蘖数、叶片数、叶长、叶宽、茎叶比(烘干法)。

产草量:测产区刈割后称鲜重,取1 kg样品 65°C 烘干至恒重,计算鲜干比及干草产量。

越冬率:越冬前记录株丛数,次年返青后统计存活株数。越冬率($\%$)=(返青后存活株数/越冬前株丛数) $\times 100\%$ 。

营养品质:取烘干样粉碎,测定粗蛋白(Crude protein, CP, 凯氏定氮法)、粗脂肪(Ether extract, EE, 索氏抽提法)、可溶性糖(Total soluble sugar, SS, 蒽酮比色法)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF, Van Soest法)、粗灰分(Crude ash, Ash)、钙(Ca)和磷(P)。

1.3.3 抗寒性生理指标测定 选取生长一致的种茎水培,在 4°C 人工气候室中分别胁迫3 d和7 d,以 25°C 处理为对照。测定根系:

相对电导率(Electrolyte leakage):电导仪法。

丙二醛(Malondialdehyde content, MDA)含量:硫代巴比妥酸法。

抗氧化酶活性:超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD, 核黄素-NBT法)、过氧化物酶(Peroxidase, POD, 愈创木酚法)、抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, 紫外吸收法)。

根系活力:TTC染色法。

各指标以变化率(胁迫/对照)进行分析。

1.3.4 区域越冬率调查 结合四川、云南、贵州等14个试验点的协作调查数据,试验点具体位置:四川:成都(崇州、新津)、内江、巴中、广元、达州、美姑,重庆:云阳(金峡、嘉耀)、南川,贵州:关岭,云

南:普洱,对主推品种‘CY1’在不同生态区域的越冬表现展开系统分析。

1.4 数据统计与分析

采用Excel 2019整理数据,SPSS 19.0进行方差分析(One-way ANOVA)和LSD多重比较($P<0.05$)。采用模糊隶属函数法和灰色关联度分析法(熵权法确定权重)对6个核心指标(干草产量、越冬率、再生速率、CP、EE、TSS)进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 农艺性状分析

由表2可知,在株高方面,‘JMLC’表现尤为突出,平均株高达到4.15 m,显著高于‘RY4’(3.73 m),‘GM1’(3.45 m)和‘CY1’(3.67 m)($P<0.05$),其中‘GM1’株高最低,为3.45 m。茎粗测定结果显示,‘JMLC’茎粗最大,达20.87 mm,除‘HJ’外显著高于另外其他7个品种($P<0.05$),‘CY1’茎粗最小(15.29 mm),与其他多数品种存在显著差异。分蘖数和叶片数在所有材料间差异不显著。在叶长方面,‘RY4’(112.23 cm),‘HJ’(108.88 cm)和‘JMLC’(107.86 cm)表现良好,‘RY4’叶长最长,相较于叶长最短的‘CN007’(75.53 cm)高出48.59%。叶宽差异显著,‘RY4’叶宽最大(4.95 cm),‘CN007’叶宽最小,为3.28 cm,二者相差达50.91%。此外,‘RY4’(1.34)和‘GM1’(1.35)的茎叶比最小,显著低于其他品种,这表明其叶片所占比例较高,饲用价值更为优良。

2.2 产草量比较分析

2023—2025年对9个狼尾草品种(系)的年平均鲜草产量、干草产量和鲜干比进行方差分析,结果表明各品种间的生产性能差异显著($P<0.05$),具体数据见图1。

鲜草和干草产量是衡量牧草生物量的重要指标。图1A中,GMY的鲜草产量最高,为 $203\ 121\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,除‘CY1’‘JMLC’外,显著高于其他品种($P<0.05$);CY1($183\ 138\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和JMLC($168\ 798\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)次之,三者间差异不显著,但均显著高于其他材料。图1B中,CY1的干草产量最高,为 $53\ 864\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于JMLC($42\ 095\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)($P<0.05$)。图1C中,鲜干比反映牧草的干物质积累效

表 2 不同狼尾草品种(系)主要农艺性状比较

Table 2 Comparison of main agronomic traits among different *Pennisetum* varieties (lines)

品种(系) Variety(Line)	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem dia meter/mm	分蘖数 Tiller number	叶片数 Leaf number	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm
GM1	3.45 ^e	16.59 ^{bc}	17.68 ^a	13.76 ^a	79.38 ^a	4.22 ^{abc}
RY4	3.73 ^{cde}	17.82 ^b	13.77 ^a	14.35 ^a	112.23 ^a	4.95 ^a
GMY	4.05 ^{ab}	18.11 ^b	12.89 ^a	14.67 ^a	89.29 ^a	3.81 ^{abc}
CY1	3.67 ^{de}	15.29 ^c	18.05 ^a	14.05 ^a	76.33 ^a	3.49 ^{bc}
ZJ1001	3.99 ^{abc}	17.14 ^{bc}	14.99 ^a	14.61 ^a	86.99 ^a	3.71 ^{abc}
CN005	4.08 ^a	18.29 ^b	15.60 ^a	14.69 ^a	87.54 ^a	3.80 ^{abc}
CN007	3.75 ^{bcde}	16.55 ^{bc}	14.64 ^a	14.84 ^a	75.53 ^a	3.28 ^c
HJ	3.93 ^{abcd}	18.95 ^{ab}	14.65 ^a	14.61 ^a	108.88 ^a	4.85 ^{ab}
JMLC	4.15 ^a	20.87 ^a	12.99 ^a	15.87 ^a	107.86 ^a	4.82 ^{ab}

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$), the same as below

率,比值越低,干物质含量越高。GMY的鲜干比最高(4.36),其次为JMLC(4.01),两者显著高于其他品种($P<0.05$),说明其水分含量较高;CY1(3.40),

RY4(3.44),CN005(3.40),GM1(3.30),ZJ1001(3.09),CN007(3.24),HJ(3.09)的鲜干比较低,干物质积累能力更强,更适宜作为高能量饲草。

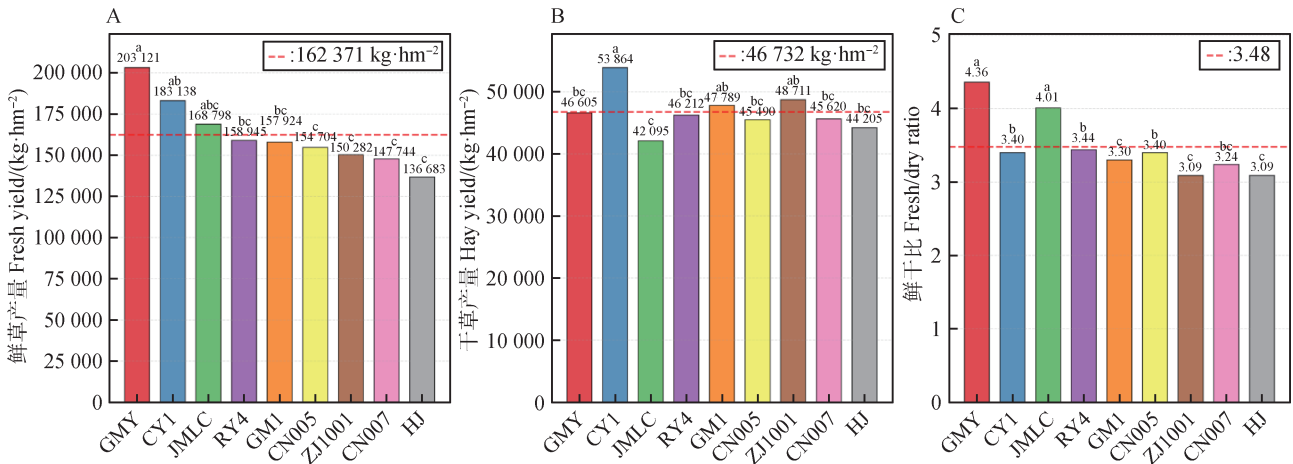


图 1 9个狼尾草品种(系)生产性能比较

Fig. 1 Comparison of production performance of nine *Pennisetum* varieties (lines)

注:A 鲜草产量比较;B 干草产量比较;C 鲜干比比较。柱上不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$),红色虚线表示总体平均值

Note: A Comparison of fresh yield; B Comparison of hay yield; C Comparison of fresh/dry ratio. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among varieties at $P<0.05$, and the red dashed line represents the overall mean value

2.3 营养品质比较分析

对9个参试狼尾草品种(系)的9项营养成分进行测定,结果表明各品种间营养品质存在显著差异(表3)。在粗蛋白含量方面,‘GM1’表现最为优异,达6.82%,显著高于‘RY4’(5.08%),‘GMY’(4.82%),‘ZJ1001’(4.42%)等($P<0.05$);‘ZJ1001’粗蛋白含量最低(4.42%),与‘GM1’相差54.30%。粗脂肪含量以‘ZJ1001’(1.05%),‘GM1’(1.03%)和‘RY4’(1.02%)较高,三者间差异不显著,但均显著高于‘JMLC’(0.58%)和‘CN007’(0.66%)($P<0.05$)。可溶性糖含量是影响

青贮质量的关键指标,‘CN005’可溶性糖含量最高($91.19\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),显著高于‘RY4’($73.68\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),‘CY1’($62.16\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),‘HJ’($63.36\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)等($P<0.05$);‘JMLC’最低($59.06\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),与‘CN005’相差54.4%。

营养品质分析表明(表3),‘GM1’营养品质综合最优,其CP含量(6.82%)和EE含量(1.03%)均为最高,ADF含量(38.97%)最低,且P含量($1.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于其他品种($P<0.05$)。‘CN005’的TSS含量最高($91.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),适合优质青贮。‘CY1’粗灰分含量最高(9.37%),‘GMY’Ca含量最高($1.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

表 3 不同狼尾草品种(系)营养品质比较(干物质基础)

Table 3 Comparison of nutritional components among different *Pennisetum* varieties (lines)

品种(系)	粗蛋白	粗脂肪	可溶性糖	中性洗涤纤维	酸性洗涤纤维	粗灰分	磷	钙
Variety(Line)	CP/%	EE/%	SS/(mg·g ⁻¹)	NDF/%	ADF/%	Ash/%	P/(g·kg ⁻¹)	Ca/(g·kg ⁻¹)
RY4	5.08 ^{cd}	1.02 ^a	73.68 ^c	62.13 ^e	41.41 ^{bc}	7.77 ^{bc}	1.04 ^d	1.25 ^{abc}
GM1	6.82 ^a	1.03 ^a	85.04 ^{ab}	67.59 ^{abc}	38.97 ^c	8.27 ^b	1.60 ^a	1.15 ^c
GMY	4.82 ^{cd}	0.78 ^b	83.03 ^{ab}	65.05 ^{de}	42.56 ^b	6.69 ^{ef}	1.06 ^d	1.27 ^a
CY1	6.22 ^{ab}	0.72 ^{ab}	62.16 ^d	66.03 ^{abc}	41.22 ^{bc}	9.37 ^a	1.47 ^b	1.01 ^d
CN005	4.63 ^d	0.73 ^{ab}	91.19 ^a	64.76 ^{de}	43.03 ^b	7.30 ^{cd}	1.06 ^d	1.26 ^{ab}
CN007	5.19 ^{cd}	0.66 ^{bc}	82.50 ^b	69.13 ^{ab}	41.32 ^{bc}	7.21 ^{cde}	1.43 ^{bc}	1.17 ^{abc}
HJ	5.61 ^{bc}	0.69 ^{ab}	63.36 ^d	67.13 ^{abc}	40.86 ^{bc}	6.70 ^{ef}	1.03 ^d	1.16 ^{bc}
ZJ1001	4.42 ^d	1.05 ^a	87.20 ^{ab}	69.36 ^a	46.81 ^a	6.12 ^f	1.08 ^d	1.21 ^{abc}
JMLC	6.24 ^{ab}	0.58 ^c	59.06 ^d	65.59 ^{cde}	43.77 ^{ab}	7.17 ^{de}	1.34 ^c	1.21 ^{abc}

2.4 抗寒生理机制与越冬性

2.4.1 抗寒性生理指标分析 本研究测定了 9 个狼尾草品种在 4℃低温胁迫 3 d 和 7 d 后的 6 个生理指标变化。随着低温胁迫时间延长,各品种相对电导率均呈上升趋势。图 2A 中,胁迫 3 d 时,RY4 相对电导率变化率最低(1.01),CN007 变化率最高(1.28);胁迫 7 d 时,CY1 相对电导率变化率最低(1.07),显著低于其他品种($P<0.05$),HJ 变化率最高(1.31)。图 2B 中,丙二醛含量在低温胁迫后均高于对照。胁迫 3 d 时,JMLC 的 MDA 含量变化率最高(1.54),

CY1 变化率最低(1.04);胁迫 7 d 时,GM1 的 MDA 含量变化率最低(1.01),显著低于 ZJ1001(1.34)($P<0.05$)。图 2C 中,超氧化物歧化酶(SOD)活性变化呈现品种差异。胁迫 3 d 时,RY4 的 SOD 活性变化率最高(2.71),ZJ1001 变化率最低(0.47);胁迫 7 d 时,CN007 的 SOD 活性变化率最高(3.71),显著高于其他品种($P<0.05$),CN005 变化率最低(0.89)。图 2D 中,过氧化物酶活性方面,胁迫 3 d 时 ZJ1001 变化率最高(1.44);胁迫 7 d 时 GMY 变化率最高(2.40),与 GM1,CN005 差异不显著,HJ 变化率最低

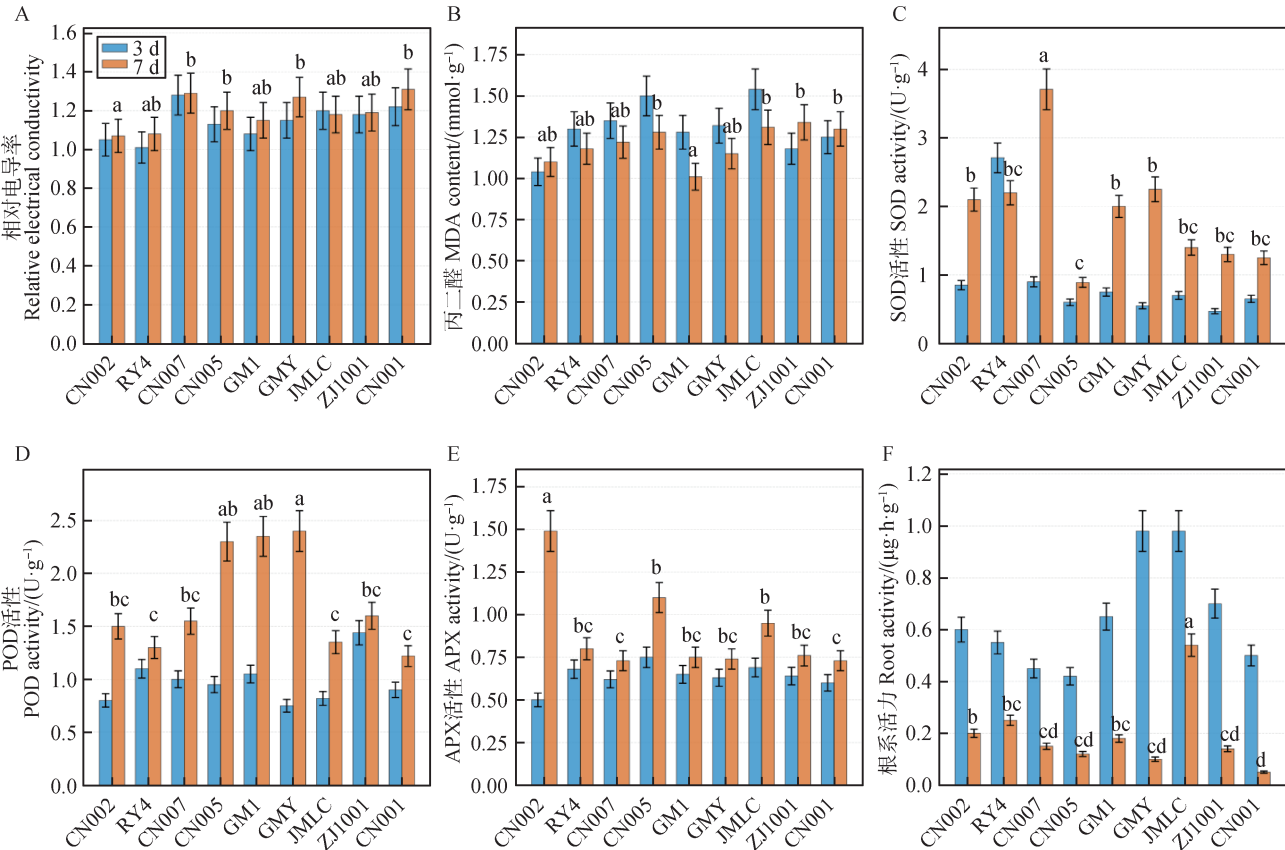


图 2 低温胁迫对不同狼尾草品种生理指标的影响

Fig. 2 Effects of cold stress on physiological indexes of different *Pennisetum* varieties

注:A,相对电导率;B,丙二醛含量;C,超氧化物歧化酶活性;D,过氧化物酶活性;E,抗坏血酸过氧化物酶活性;F,根系活力。柱状图上方小写字母表示 7 d 处理下不同品种间的显著性差异($P<0.05$);数据为均值±标准差
Note: A, Relative electrical conductivity; B, MDA content; C, SOD activity; D, POD activity; E, APX activity; F, Root activity. Lowercase letters above bars indicate significant differences among varieties at 7 d ($P<0.05$); Data are mean ± SD

(1.22)。图2E中,抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性在胁迫3 d时所有品种均低于对照;胁迫7 d时CY1、CN005、JMLC3个品种APX活性高于对照,其中CY1变化率最高(1.49),显著高于其他品种($P < 0.05$),HJ和CN007变化率最低(均为0.73)。图2F中,根系活力随胁迫时间延长呈下降趋势。胁迫3 d时JMLC和GMY根系活力变化率最高(均为0.98),CN005变化率最低(0.42);胁迫7 d时JMLC变化率最高(0.54),显著高于其他品种($P < 0.05$),HJ变化率最低(0.05)。

采用隶属函数法对6个生理指标进行综合评价,得出9个狼尾草品种抗寒性强弱顺序为:CY1(综合评价0.683) > RY4(0.550) > CN007(0.543) > CN005(0.529) > GM1(0.508) > GMY(0.444) > JMLC(0.438) > ZJ1001(0.306) > HJ(0.130)。

2.4.2 ‘CY1’区域越冬率 越冬率是评价狼尾草属牧草在西南区适应性的关键指标。其中JMLC和

RY4是成都平原地区及周边生态区种植的主推品种,崇州点越冬率调查结果显示(图3A),所有参试品种(系)在成都平原的种植条件下均能实现安全越冬,越冬率均高于80%。2023年和2024年越冬率最高的两个品种均为‘CY1’和‘CN007’,二者间差异不显著。2023年,‘CN007’的越冬率最高,为98.33%,显著高于‘RY4’‘GM1’‘JMLC’等($P < 0.05$);2024年,‘CY1’的越冬率达100%,显著高于‘RY4’‘GM1’‘JMLC’等($P < 0.05$)。两年越冬率最低品种均为‘HJ’(83.33%和86.67%),与多数品种差异显著($P < 0.05$)。整体而言,所有参试品种的越冬率均呈现逐年增加的趋势,这表明随着种植年限的延长,植株根系发育更为完善,抗寒能力逐步增强。

对‘CY1’在四川、云南、贵州等9个地点的越冬率调查结果显示(图3B),该品种在不同生态区域均展现出良好的越冬性能。在海拔450~530 m的四

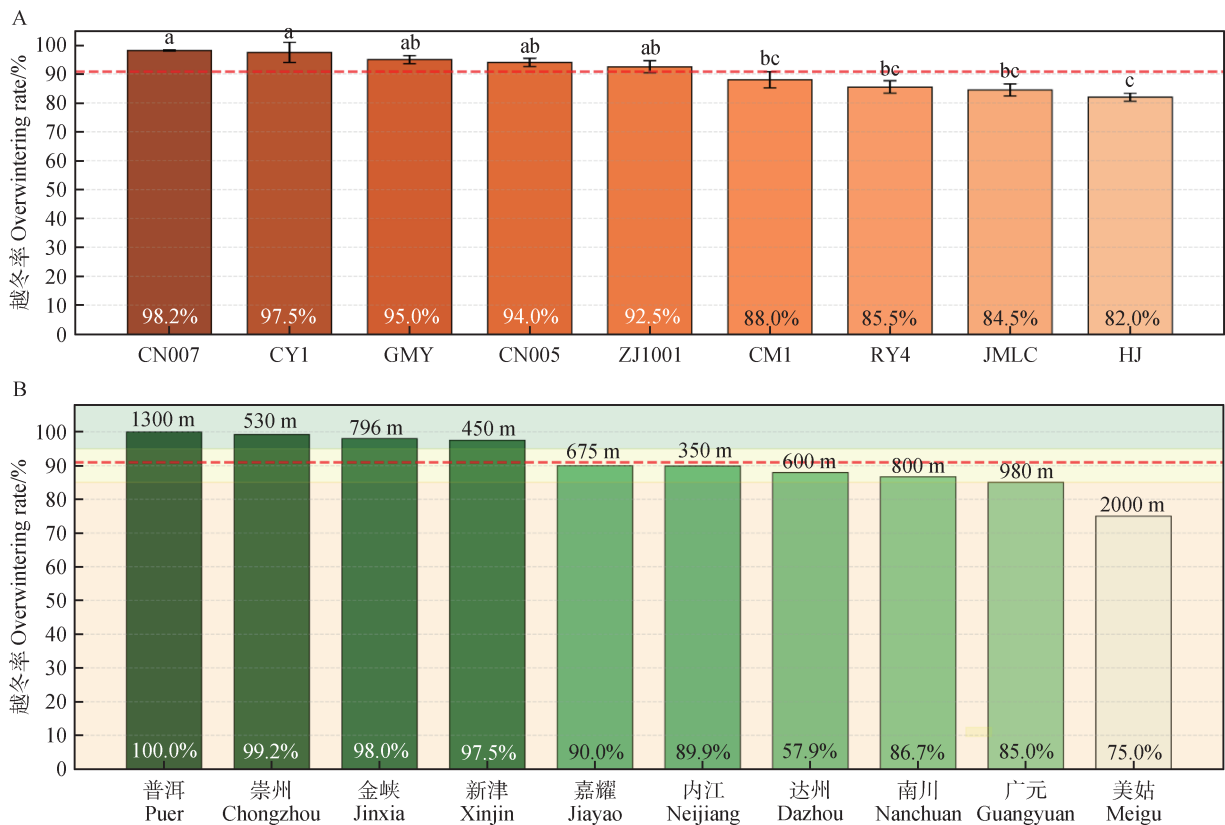


图3 狼尾草品种(系)越冬率比较

Fig. 3 Comparison of overwintering rates of *Pennisetum* varieties (lines)

注: A, 崇州地区9个品种(系)越冬率比较; B, CY1象草不同地区越冬率比较。柱状图上方小写字母表示不同品种间的显著性差异($P < 0.05$); 柱顶数字表示海拔高度(m), 柱内数字表示越冬率(%); 绿色区域(>95%)为优异, 黄色区域(85%~95%)为良好, 橙色区域(<85%)为较差; 红色虚线表示总体平均值。数据为均值±标准差

Note: A, Comparison of overwintering rates of nine varieties (lines) in Chongzhou; B, Comparison of overwintering rates of 'Chuanju No. 1' napier grass in different regions. Lowercase letters above bars indicate significant differences among varieties ($P < 0.05$); Numbers above bars indicate altitude (m); numbers inside bars indicate overwintering rate (%); Green area (>95%) represents excellent, yellow area (85%~95%) represents good, orange area (<85%) represents poor; Red dashed line represents overall mean value. Data are mean ± SD

川盆地周边区域,越冬率普遍处于较高水平:崇州为98.33%~100%,新津为97.5%,云阳为90%~98%。在海拔较高的区域,越冬率虽略有下降,但仍维持在较高水平:达州87.92%、内江89.88%、南川86.68%、广元85.0%。在云南普洱低热河谷区,越冬率达100%,表现卓越;而在四川美姑冷凉山区,越冬率仍达75.0%。综合而言,‘CY1’在四川盆地、云贵高原中低海拔(<2000 m)区域均呈现出较强的耐寒性与稳定的越冬能力,适宜于上述区域推广应用。

3 讨论

3.1 ‘CY1’在成都平原及高海拔区域的越冬优势

越冬率是评价狼尾草属牧草在冷凉地区适应性的关键指标,是体现植物抗寒能力的重要依据之一^[10]。本研究表明,在崇州点(海拔530 m),‘CY1’象草越冬率达97.5%,显著高于‘RY4’(85.5%)和‘JMLC’(84.5%)($P<0.05$),展现出卓越的抗寒能力。这一结果优于多数前人研究。田静等^[8]对4个狼尾草属牧草在广州增城地区的饲用价值进行比较,但未涉及越冬性能的系统评价。杨智青等^[9]在江苏沿海滩涂盐碱地对17个杂交狼尾草品种的生产性状进行评价,重点关注了产量和品质指标,而对越冬率的报道较为有限。相比之下,本研究中‘CY1’在成都平原实现安全越冬,表现出更强的区域适应性。

从生理机制来看,‘CY1’的优异越冬性能与其抗寒生理响应密切相关。Bowler等^[11]研究指出,植物在低温胁迫下会产生大量活性氧,细胞膜作为感知胁迫的初始位点,其稳定性直接决定植物的抗寒能力。本研究发现,低温胁迫下‘CY1’的相对电导率和MDA含量变化率在9个品种中均为最低,表明其细胞膜稳定性较强,膜脂过氧化程度较轻。Blum等^[12]认为,细胞膜稳定性可作为衡量作物耐逆性的可靠指标。陈志才等^[13]研究低温冻害对‘桂牧一号’杂交象草越冬率的影响,发现持续低温和寒潮会导致种茎潜伏芽生命力降低、腋芽细胞脱水死亡,最终造成老苑死亡率升高。本研究中‘CY1’在低温胁迫下能够维持较低的膜损伤程度,可能是其高越冬率的重要生理基础。此外,‘CY1’在胁迫7 d时APX活性变化率最高(1.49),显著高于其他品种,表明其抗坏血酸过氧化物酶系统在清除活性

氧、缓解氧化胁迫方面发挥了关键作用。

区域越冬率调查显示,‘CY1’在高海拔地区亦表现稳定:在云南普洱(海拔约1300 m)越冬率达100%,在四川美姑(海拔约2000 m)仍达75.0%。孙宗玖等^[10]对不同耐寒性狗牙根的研究表明,抗寒性强的材料在低温胁迫下能保持较高的抗氧化酶活性和较低的膜透性。Apel等^[14]综述指出,植物通过抗氧化酶系统(SOD, POD, APX等)清除过量活性氧,是抵御低温氧化胁迫的核心机制。本研究结果与此一致,‘CY1’在不同生态区域均展现出较强的耐寒性与稳定的越冬能力。陆皎云等^[15]研究发现杂交狼尾草茎秆和叶片的耐低温能力比分蘖节与根系弱,分蘖节和根系的健康状况是决定越冬成败的关键。本研究中‘CY1’在越冬后返青整齐、生长旺盛,进一步印证了其地下部位(分蘖节、根系)具有较强的低温耐受能力。

综合来看,‘CY1’在四川盆地及云贵高原中高海拔(<2000 m)区域均表现出良好的越冬性能,与‘RY4’等对照品种相比优势显著,适宜在上述区域推广应用。

3.2 不同品种(系)的生产性能差异与利用潜力

产量是衡量牧草生产性能与适应性的重要指标之一,始终是草业生产中关注的核心目标^[16]。本研究中,‘GMY’象草平均年鲜草产量最高为203 121 kg·hm⁻²,‘CY1’的干草产量最高,为53 864 kg·hm⁻²,显著高于JMLC(42 095 kg·hm⁻²)($P<0.05$),体现出优异的高产潜力。不同生态区的品种比较研究结果存在差异。黄水珍等^[17]在闽北红壤山地开展的狼尾草属牧草对比试验表明,‘热研4号’的鲜草产量最高,达330 280 kg·hm⁻²,与本研究中‘RY4’产量相对较低的结果差异较大。这种差异可能与四川地区气温较低、刈割次数偏少及种植密度较小有关。田立双等^[18]研究表明,草产量随种植密度的增加而增加,这解释了不同研究间产量差异的部分原因。此外,本试验田间管理采用常规施肥方案(基肥复合肥50 750 kg·ha⁻¹,每次刈割后追施尿素150 kg·ha⁻¹),未进行强化施肥处理,肥料投入水平相对较低,可能也是导致草产量不及部分前人研究的原因之一。刘伟燕等^[19]在广西扶绥县的品种比较试验中发现,新选育的‘桂草1号’王草在生产性能上显著优于其他品种,表明品种选择和区域适配性对产量表现具有重要影响。

营养品质方面,‘GM1’粗蛋白(6.82%)和粗脂肪(1.03%)含量最高,ADF(38.97%)最低,营养品质综合最优。丁迪云等^[20]在广州地区对7种狼尾草属牧草进行田间试验,同样发现‘桂牧1号’杂交象草具有较高的粗蛋白含量和较低的纤维含量,与本研究结果一致。杨智青等^[9]在江苏沿海滩涂盐碱地对17个杂交狼尾草品种的生产性状进行评价,发现各品种性状间差异较大,其中C11,C12适宜在当地生产推广,这表明不同生态区域需要针对性筛选适宜品种。

‘CN005’可溶性糖含量最高(91.19 mg·g⁻¹),这使其在青贮发酵中具有明显优势。可溶性糖含量是影响青贮质量的关键因素,直接影响乳酸菌的发酵过程和最终的青贮品质^[21]。‘RY4’(1.34)和‘GM1’(1.35)茎叶比最小,叶片比例高,适口性更佳,适合直接刈割饲喂。邱崇洋等^[22]对8种狼尾草属植物的生长性状进行比较分析,发现不同品种在株高、分蘖数、茎叶比等性状上存在显著差异,其中‘MT-1’象草新品系综合生长性状表现最优秀,这与本研究中不同品种各具优势的结论相一致。Wang等^[23]研究表明,暖季型牧草的耐寒性与其生产性能之间存在权衡关系,这解释了为何高产品种‘GMY’的越冬率(88.33%)略低于抗寒品种‘CY1’(100%)。

综合来看,不同品种在生产性能与营养品质上存在显著差异,应根据利用目标选择适宜品种。‘GMY’适合作为高产型推广,‘CN005’适合作为青贮专用型品种,‘GM1’适合优质青贮,‘RY4’和‘GM1’适口性好,适合直接饲喂。这一结果与杨智青等^[9]提出的“因地制宜选择品种”的观点相吻合,为成都平原及类似生态区的狼尾草品种选择提供了科学依据。

4 结论

本研究通过对9个象草与杂交狼尾草品种(系)在成都平原崇州点开展连续三年的品种比较试验,并结合四川、云南、贵州等多地越冬率调查,系统评价了各品种(系)的农艺性状、产草量、营养品质及越冬性能。结果表明,‘GMY’象草平均年鲜草产量最高(203 121 kg·hm⁻²),显著高于其他材料($P<0.05$),可作为高产型品种进行推广;‘GM1’杂交象草营养品质最优,粗蛋白含量(6.82%)和粗脂

肪(1.03%)最高,酸性洗涤纤维(38.97%)最低,适合用于优质青贮;‘RY4’叶长叶宽最大,茎叶比最小,适口性良好。在越冬性能方面,‘CY1’表现尤为突出,在崇州点越冬率达100%,且在四川达州(87.92%)、内江(89.88%)、新津(97.5%)、云阳(90%~98%)、南川(86.68%)、普洱(100%)以及海拔约2000 m的‘美姑’(75.0%)等区域均呈现出稳定的高越冬率。在美姑与‘RY4’等对照品种相比,越冬率增加了15%,其在高海拔地区的越冬优势显著,适宜于在四川盆地及云贵高原冷凉山区进行推广。模糊隶属函数与灰色关联度综合评价结果表明,‘CN005’‘GM1’‘GMY’‘CY1’的综合表现最为优异,是成都平原及类似生态区的优选种源。其中,‘CY1’凭借其卓越的越冬性能和刈割后的再生能力,能够有效解决冷凉地区象草越冬困难这一生产问题,降低种植风险,保障草地的持续生产,具备重要的推广应用价值。

参考文献

- [1] 刘国道,白昌军,王东劲,等. 热研4号王草选育[J]. 草地学报,2002,10(2):92-96
LIU G D, BAI C J, WANG D J, et al. The selection and utilization of reyan No. 4 king grass[J]. Acta Agrestia Sinica, 2002, 10(2):92-96
- [2] 梁英彩. 桂牧1号杂交象草选育研究[J]. 中国草地,1999(1):19-22
LIANG Y C. Studies on selection and cultivation of Guimu-1 hybrid *Pennisetum urpureum*[J]. Grassland of China, 1999(1):19-22
- [3] 陈钟佃,黄章明,吴飞龙,等. 闽牧6号杂交狼尾草产量特征及其资源化利用研究[J]. 草原与草坪,2023,43(3):126-131
CHEN Z D, HUANG Z M, WU F L, et al. Characteristics of hybrid *Pennisetum Minmu* No. 6 and its resource utilization[J]. Grassland and Turf, 2023, 43(3):126-131
- [4] 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 Herbivores, 2011, 31(3):43-44
- [5] 林洁荣,刘建昌,苏水金. 福建南亚热带狼尾草属牧草品种试验[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2003,32(1):110-112
LIN J R, LIU J C, SU S J. Test of forage varieties of *Pennisetum* Rich. in the south subtropics in Fujian[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2003, 32(1):110-112
- [6] 钟声,周自玮,文际坤,等. 王草和象草在云南省亚热带地区的适应性研究[J]. 草业科学,2002,19(5):23-25

- ZHONG S, ZHOU Z W, WEN J K, et al. A study on Adaptability of Elephant grass and king grass in the sub-tropical region of Yunnan Province, China [J]. Pratacultural Science, 2002, 19(5):23-25
- [7] 丁琼, 解关琦, 张欢, 等. 成都平原地区4个高丹草品种的生产性能比较[J]. 草业科学, 2021, 38(12):2421-2428
- DING Q, XIE G Q, ZHANG H, et al. Comparative experiment on the production performance of four *Sorghum bicolor* × *S. sudanense* cultivars in the Chengdu Plain [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(12):2421-2428
- [8] 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
- [9] 杨智青, 丁海荣, 钟小仙, 等. 17种杂交狼尾草滩涂盐碱地生产性状评价[J]. 家畜生态学报, 2013, 34(9):61-64
- YANG Z Q, DING H R, ZHONG X X, et al. The evaluation of 17 hybrid penisetums production traits planted in beach saline-alkali [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2013, 34(9):61-64
- [10] 孙宗玖, 李培英, 景艳杰, 等. 不同耐寒性狗牙根对冻害胁迫的生理响应[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(1):1-5
- SUN Z J, LI P Y, JING Y J, et al. Physiological response of bermudagrass with different cold-resistance to freezing stress [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2011, 34(1):1-5
- [11] BOWLER C, MONTAGU M V, INZE D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43:83-116
- [12] BLUM A, EBERCON A. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat [J]. Crop Science, 1981, 21(1):43-47
- [13] 陈志才, 宋琼莉, 蒋红萍. 低温冻害对桂牧一号杂交象草成活的影响分析[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2005(6):27
- CHEN Z C, SONG Q L, JIANG H P. Effect of low temperature and freezing injury on the survival of Guimu No. 1 hybrid elephant grass [J]. Jiangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2005(6):27
- [14] APEL K, HIRT H. REACTIVE OXYGEN SPECIES: metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55:373-399
- [15] 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):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 Prataculturæ Sinica, 2024, 33(8):98-111
- [16] 王运涛, 杨志敏, 刘建成, 等. 冀西北地区21个燕麦品种生产性能与营养品质综合评价[J]. 草地学报, 2020, 28(5):1311-1318
- WANG Y T, YANG Z M, LIU J C, et al. Comprehensive evaluation of production performance and nutritional quality of 21 oat varieties in northwest of Hebei Province [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5):1311-1318
- [17] 黄水珍, 谢善松. 闽北红壤山地狼尾草属牧草对比试验[J]. 江西农业学报, 2012, 24(10):30-31, 35
- HUANG S Z, XIE S S. Contrast test of *Pennisetum* on hilly red soil in north Fujian [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(10):30-31, 35
- [18] 田立双, 李凤山, 杨恒山, 等. 密度对杂交狼尾草产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2006, 23(4):50-52
- TIAN L S, LI F S, YANG H S, et al. Effects of plant density on yield and quality of *Pennisetum glaucum* [J]. Pratacultural Science, 2006, 23(4):50-52
- [19] 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
- [20] 丁迪云, 陈卫东, 陈杰雄, 等. 狼尾草属牧草品种比较试验[J]. 广东农业科学, 2019, 46(8):8-13
- DING Y D, CHEN W D, CHEN J X, et al. Comparative test on forage grass cultivars of penisetum [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(8):8-13
- [21] 韦立台. 杂交狼尾草新品系株型特征、再生特性研究及产草量和粗蛋白预测[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2020:17-19
- WEI L T. The study on plant type characteristics, regeneration characteristics, yield and crude protein content prediction of new hybrid *Pennisetum* [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2020:17-19
- [22] 邱崇洋, 杨炯超, 郭和蓉, 等. 8种狼尾草属植物的生长性状比较分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6):97-101
- QIU C Y, YANG J C, GUO H R, et al. The comparative analysis on growth characteristics of eight kinds of *Pennisetum alopecuroides* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(6):97-101
- [23] LIU B, WANG X Y, CAO Y, et al. Factors affecting freezing tolerance: a comparative transcriptomics study between field and artificial cold acclimations in overwintering evergreens [J]. The Plant Journal, 2020, 103(6):2279-2300

(责任编辑 刘婷婷)