

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.016

引用格式:刘红铄,王伟伟,范希峰,等.80份狼尾草种质农艺性状评价及优异种质筛选[J].草地学报,2026,34(9):3320—3330

LIU Hong-shuo, WANG Wei-wei, FAN Xi-feng, et al. Evaluation of Agronomic Traits of 80 *Pennisetum* Accessions and Screening of Excellent Germplasm[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3320—3330

80份狼尾草种质农艺性状评价及优异种质筛选

刘红铄^{1,2}, 王伟伟^{1,2}, 范希峰¹, 孙鑫博², 岳跃森¹, 滕珂^{1*}, 刘凌云^{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. 河北农业大学, 河北 保定 071000)

摘要:象草(*Pennisetum purpureum*)及杂交狼尾草是狼尾草属的优质高产饲草,但其在我国北方的田间适应性评价尚不充分。本研究旨在系统评价80份收集及选育的狼尾草属种质资源在北京地区的农艺性状表现,筛选适宜北方种植的优异种质。试验测定80份供试材料的株高、叶长、叶宽、分蘖数、茎粗、鲜重及干重7个重要农艺性状,采用变异系数分析、相关性分析、主成分分析及隶属函数法对种质资源进行综合评价。结果表明:80份种质资源具有丰富的遗传多样性,7个农艺性状的变异系数介于10.97%~78.77%,其中干重(78.77%)和鲜重(69.85%)的变异幅度最大,说明不同种质间生物量相关性状差异较大。相关性分析显示,叶长与叶宽、鲜重与干重均呈极显著正相关($P < 0.01$)。主成分分析发现前4个主成分累计贡献率达89.70%,主要反映了植株的生物量因子、株型因子和分蘖因子。通过隶属函数综合评价,筛选出综合性状排名前10的优异种质,分别为‘苏牧4号’杂交狼尾草、‘川育1号’象草、‘紫色’象草、‘华南’象草、‘杂狼11号’杂交狼尾草、象草31号、‘桂闽引’象草、‘CHP31’杂交狼尾草、象草10号和‘德宏’象草。本研究为北方地区饲草栽培和育种提供了高产优质的狼尾草种质。

关键词:象草;杂交狼尾草;农艺性状;综合评价;种质筛选

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3320-11

Evaluation of Agronomic Traits of 80 *Pennisetum* Accessions and Screening of Excellent Germplasm

LIU Hong-shuo^{1,2}, WANG Wei-wei^{1,2}, FAN Xi-feng¹, SUN Xin-bo², YUE Yue-sen¹,
TENG Ke^{1*}, LIU Ling-yun^{1*}

(1. Institute of Grassland, Flowers, and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

2. Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei Province 071000, China)

Abstract: Elephant grass (*Pennisetum purpureum*) and hybrid *Pennisetum* are high-quality forage grasses with remarkable biomass potential. However, evaluation of their adaptability and agronomic performance in Northern China remains insufficient. This study aims to systematically evaluate the agronomic traits of 80 *Pennisetum* accessions in Beijing and screen the excellent germplasm suitable for northern cultivation. Seven key agronomic traits, including plant height, leaf length, leaf width, tiller number, stem diameter, fresh weight, and dry weight were measured for the 80 accessions. Then coefficient of variation (CV) analysis, correlation analysis, principal component analysis (PCA), and subordinate function analysis were employed for comprehensive evaluation. The results showed that the 80 accessions exhibited rich genetic diversity. The CVs of the seven traits ranged from 10.97% to 78.77%, with dry weight (78.77%) and fresh weight (69.85%) exhibiting the highest variation, this indicates that there are significant differences in biomass-related traits among different genotypes. By correlation analysis, individual that leaf length and leaf width, as well as fresh weight and dry weight, were both highly significantly positively correlated ($P < 0.01$). Principal component analysis (PCA) revealed that four principal components accounted for a cumulative contribution rate of 89.70%, primarily repre-

收稿日期:2026-03-02;修回日期:2026-04-10

作者简介:刘红铄(2002-),女,汉族,河北唐山人,硕士研究生,主要从事狼尾草育种研究,E-mail:1911430053@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: tengke.123@163.com; liulingyun01@163.com

senting biomass factors, plant architecture factors, and tillering factors. Based on the membership function values, the top 10 accessions with superior comprehensive performance were identified. *P. americanum* × *P. purpureum* ‘Sumu No. 4’, *P. purpureum* ‘Chuanyu No. 1’, *P. purpureum* ‘Zise’, *P. purpureum* ‘Huanan’, *P. americanum* × *P. purpureum* ‘No. 11’, *P. purpureum* ‘No. 31’, *P. purpureum* ‘Guiminyin’, *P. americanum* × *P. purpureum* ‘CHP31’, *P. purpureum* ‘No. 10’ and *P. purpureum* ‘Dehong’. This study provides high-yielding *Pennisetum* germplasm for forage cultivation and breeding in Northern China.

Key words: Elephant grass; Hybrid *Pennisetum*; Agronomic traits; Comprehensive evaluation; Germplasm screening

象草(*Pennisetum purpureum*)及其与美洲狼尾草(*P. glaucum* (L.) R. Br.)的种间杂交种(统称为杂交狼尾草),是禾本科狼尾草属多年生高秆丛生型饲草。该类牧草原产于热带非洲,具有光合效率高的特点,是典型的C₄植物,同时具备生物量巨大、适口性好、抗逆性强等优良特性^[1-2]。随着我国“粮改饲”政策的深入实施及草牧业的快速发展,象草及杂交狼尾草已成为我国南方地区草食家畜养殖的重要青饲料来源,广泛应用于青贮、青饲及生态修复等领域^[3]。

目前,关于象草及杂交狼尾草种质资源的评价研究多集中在华南、西南等热带亚热带区域^[4-8],在我国北方地区,尽管夏季光热资源丰富,适宜C₄植物生长,但针对该区域的系统性引种筛选及适应性评价报道相对较少。现有研究多局限于少数主推品种的比较,缺乏对大量遗传背景多样化种质资源的全面评价。此外,由于狼尾草属植物存在无性繁殖导致的遗传变异积累及引种过程中的命名混乱现象,“同名异物”或“同物异名”问题严重,亟需通过系统的表型性状鉴定进行精准评价^[9]。因此,在北方气候条件下对象草及杂交狼尾草种质资源进行系统全面的农艺性状评价,对于丰富北方适宜栽培的饲草类型具有重要意义。

植物性状受自身遗传物质和外部环境因子共同影响,是种质资源筛选最直接的依据^[10]。开展狼尾草属种质资源表型性状的系统研究,对于丰富狼尾草属种质资源数据库、筛选优异材料、完善种质资源综合评价体系具有重要的理论与实践意义。目前已有研究表明,王丽宏等^[11]及张鹤山等^[12]分别对不同来源的狼尾草种质进行了性状分析,发现株高、花序特征等是区分不同种源的关键因子;姚娜等^[13]和胡远彬等^[14]分别从综合利用价值和抗寒生理角度进行了品种比较,为我国西南和北方地区狼尾草的筛选提供依据。然而,现有研究多集中于特定区域的少量种质或单一品种,针对北方地区系统开展狼尾草属种质资源的农艺性状评价仍较为匮乏。

因此,本研究在北京市昌平区国家精准农业研

究示范基地,对80份狼尾草属种质资源的株高、叶长、叶宽、分蘖数、茎粗、鲜重及干重7个重要农艺性状进行系统测定,利用变异系数(Coefficient of variation, CV)分析、相关性分析、主成分分析及隶属函数法,揭示其在北京地区的农艺性状变异特征,并依据综合评价结果筛选出高产优异的狼尾草种质,为北方地区饲草栽培和育种提供宝贵的材料。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究的狼尾草属种质资源圃位于北京市昌平区国家精准农业研究示范基地。该地属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温10~12℃;月平均最高温度在7—8月,最低温度在12—1月;年均降水量640 mm,年均日照时数>2000 h,无霜期约190 d。

1.2 试验材料

80份供试材料包括56份象草、21份杂交狼尾草和其他狼尾草属种质3份,由北京市农林科学院收集及选育,其整株形态见图1,具体来源信息见表1。



图1 部分狼尾草属种质资源植株照

Fig. 1 Photographs of plants representing *Pennisetum* species

表 1 80 份供试材料的来源信息

Table 1 Information on the origin of the 80 test samples

种质编号 Germplasm code	种质名称 Germplasm name	种名 Species name	来源地 Origin
1	象草 1	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
2	象草 2	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
3	象草 3	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
4	象草 4	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
5	象草 5	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
6	象草 6	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
7	象草 7	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
8	象草 8	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
9	象草 9	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
10	象草 10	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
11	象草 11	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
12	象草 12	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
13	象草 13	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
14	象草 14	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
15	象草 15	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
16	象草 16	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
17	象草 17	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
18	象草 18	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
19	象草 19	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
20	象草 20	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
21	象草 21	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
22	象草 22	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
23	象草 23	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
24	象草 24	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
25	象草 25	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
26	象草 26	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
27	象草 27	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
28	象草 28	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
29	象草 29	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
30	象草 30	象草 <i>P. purpureum</i>	广东 Guangdong Province
31	象草 31	象草 <i>P. purpureum</i>	陕西 Shaanxi Province
32	杂交狼尾草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	江苏 Jiangsu Province
33	象草 32	象草 <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
34	闽牧 42	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘Minmu 42’	福建 Fujian Province
35	热研 4 号王草	杂交狼尾草 <i>P. purpureum</i> × <i>P. typhoideum</i> ‘Reyan No.4’	四川 Sichuan Province
36	京育 43 象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Jingyu 43’	北京 Beijing City
37	象草 33	象草 <i>P. purpureum</i>	四川 Sichuan Province
38	南牧 1 号杂交象草	杂交象草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘Nanmu No.1’	福建 Fujian Province
39	细茎狼尾草	细茎狼尾草 <i>P. alopecuroides</i>	河北 Hebei Province
40	台农 1 号	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	广西 Guangxi Province
41	台湾甜象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Guiminyin’	广西 Guangxi Province
42	金牧粮草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	广西 Guangxi Province
43	中华粮草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	广西 Guangxi Province
44	CHP31 杂交狼尾草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘CHP31’	江苏 Jiangsu Province
45	桂牧 1 号杂交象草	杂交象草 (<i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>) × <i>P. purpureum</i> ‘Guimu.No.1’	海南 Hainan Province
46	杂交象草	杂交象草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
47	杂交狼尾草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	广西 Guangxi Province
48	HZTCK	象草 <i>P. purpureum</i>	四川 Sichuan Province
49	多叶象草	象草 <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
50	象草 35	象草 <i>P. purpureum</i>	广西 Guangxi Province

续表 1

种质编号 Germplasm code	种质名称 Germplasm name	种名 Species name	来源地 Origin
51	象草 36	象草 <i>P. purpureum</i>	广西 Guangxi Province
52	甜象草	象草 <i>P. purpureum</i>	四川 Sichuan Province
53	象草 JJ	象草 <i>P. purpureum</i>	福建 Fujian Province
54	巨菌草	象草 <i>P. giganteum</i>	福建 Fujian Province
55	象草 34	象草 <i>P. purpureum</i>	四川 Sichuan Province
56	云牧 1 号象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Yunmu No.1’	云南 Yunnan Province
57	摩特矮象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Mott’	江苏 Jiangsu Province
58	川畜 4 号象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Chuanxu No.4’	四川 Sichuan Province
59	川育 1 号象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Chuanyu No.1’	四川 Sichuan Province
60	紫色象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Zise’	广西 Guangxi Province
61	苏牧 2 号象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Sumu No.2’	江苏 Jiangsu Province
62	桂闽引象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Guiminyin’	江苏 Jiangsu Province
63	德宏象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Dehong’	云南 Yunnan Province
64	华南象草	象草 <i>P. purpureum</i> ‘Huanan’	江苏 Jiangsu Province
65	ZL1	象草 <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
66	ZL2	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
67	ZL3	象草 <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
68	ZL5	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
69	ZL6	象草 <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
70	ZL7	象草 <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
71	ZL8	象草 <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
72	ZL12	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
73	ZL13	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	河北 Hebei Province
74	ZL9	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
75	ZL10	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
76	苏牧 4 号杂交狼尾草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘Sumu No.4’	江苏 Jiangsu Province
77	闽牧 6 号杂交狼尾草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘Minmu No.6’	四川 Sichuan Province
78	邦得 1 号杂交狼尾草	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i> ‘Bangde No.1’	广西 Guangxi Province
79	杂狼 11 号	杂交狼尾草 <i>P. americanum</i> × <i>P. purpureum</i>	海南 Hainan Province
80	热研 4 号王草	杂交狼尾草 <i>P. purpureum</i> × <i>P. typhoideum</i> ‘Reyan No.4’	海南 Hainan Province

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 试验供试的 80 份种质采用盆栽扦插法定植,每份种质 30 株,茎段扦插于灭菌的营养基质中常规养护,5 月中旬移栽至大田,小区规格 4.0 m×3.2 m,株行距 60 cm×80 cm。本研究中的产量数据为刈割 1 次的效果,象草及杂交狼尾草的拔节盛期为 7 月上旬至 8 月中下旬,收获期为 9 月下旬。试验期间采用常规田间管理措施。基肥施用复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15)750 kg·hm⁻²,在分蘖盛期至拔节初期追施尿素 225 kg·hm⁻²,以促进植株营养生长及地上部生物量形成。试验区灌溉以自然降雨为主,在降雨不足条件下进行补充灌溉,生长旺盛期保持土壤相对含水量在 60%~70%之间,以满足植株正常生长需求。

1.3.2 测定指标及方法 本研究共测定 7 个农艺性状相关指标,测定指标和方法具体如下:

株高:每小区选 4 株生长一致的标准株,在拔节

盛期用卷尺测量植株基部至自然生长最高点的垂直高度,求其平均值(cm);

叶长:每小区选 4 株生长一致的标准株,在拔节盛期选取每株上部 3 片完全展开叶,测量叶尖至叶鞘基部的长度,求其平均值(cm);

叶宽:每小区选 4 株生长一致的标准株,在拔节盛期选取每株上部 3 片完全展开叶,测量叶片最宽处的宽度,求其平均值(cm);

分蘖数:每小区选 4 株生长一致的标准株,在拔节盛期记录 4 株所有的分蘖,求其平均值(个);

茎粗:每小区选 4 株生长一致的标准株,在拔节盛期用游标卡尺测量植株基部第 2 节间中部的直径,求其平均值(mm);

鲜重:每小区选 4 株生长一致的标准株,在收获期整株刈割后立即称重,记录单株鲜重,求其平均值(kg);

干重:每小区选 4 株生长一致的标准株,在收获

期将样品 105℃杀青 30 min,然后 70℃烘干至恒重,求其平均值(kg)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理,使用 SPSS 26.0 和 Origin 2024 软件进行遗传变异分析、主成分分析并绘图。综合评价分析中,利用公式 $U_{ij}=(X_{ij}-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin})$ 对数据进行标准化,其中, U_{ij} 表示隶属函数值, X_{ij} 表示品种 i 在指标 j 的测定值, X_{jmax} 和 X_{jmin} 表示试验材料 j 指标的最大值和最小值。对标准化后的 7 个性状进行主成分分析,通过标准化后数据与主成分因子得分系数的乘积计算各主成分得分(F_n),并结合主成分因子权重(V_n)计算每

份种质的综合得分(F 值),公式为 $F=V_1F_1+V_2F_2+V_3F_3+V_4F_4$ 。

2 结果与分析

2.1 狼尾草种质农艺性状的遗传变异分析

本研究对供试狼尾草的 7 个性状相关指标进行遗传变异分析,结果表明各个性状均大致呈现正态分布(图 2)。7 个性状的 CV 范围在 10.97%~78.77%,平均 CV 为 31.05%(表 2),表明材料间遗传多样性丰富。7 个性状的 CV 排序为:叶长(10.97%)<茎粗(11.20%)<株高(13.53%)<叶宽(15.33%)<分蘖数(17.68%)<鲜重(69.85%)<干重(78.77%)。

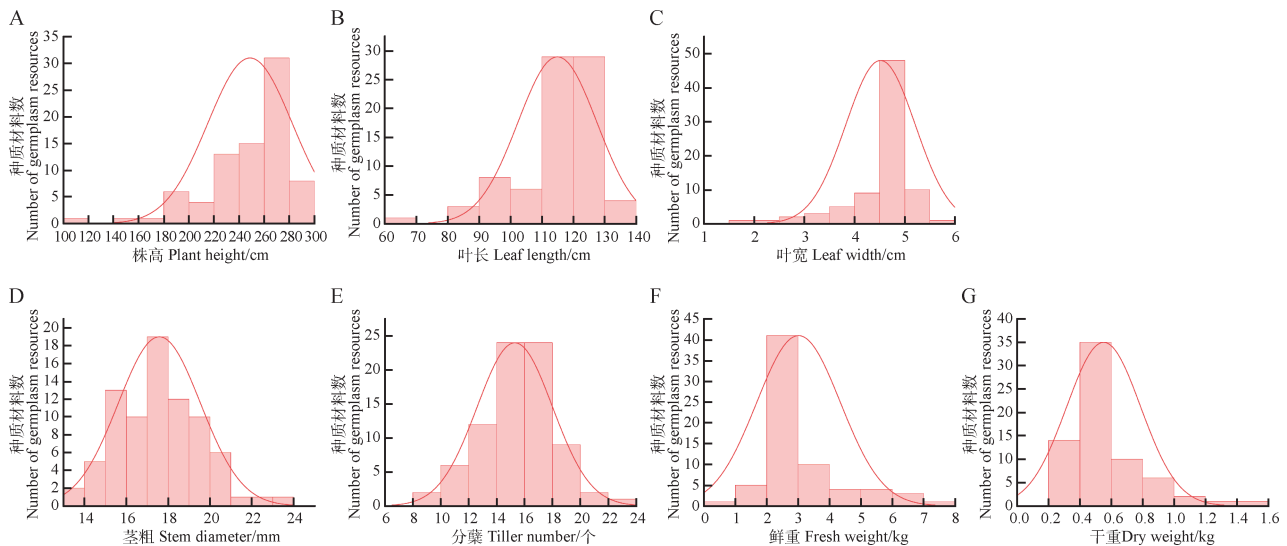


图 2 狼尾草种质农艺性状的正态性检验

Fig. 2 Normality test for agronomic traits of *Pennisetum* germplasms

注:柱状图表示某一范围内数据出现的频率,曲线表示数据的正态分布

Note: The bar chart shows the frequency of data occurrence in a certain range, and the curve shows the normal distribution of data

表 2 狼尾草种质农艺性状的遗传变异分析

Table 2 Variability of agronomic traits in *Pennisetum* germplasms

性状 Trait	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	极差 Range	标准差 SD	变异系数 CV/%
株高 Plant height /cm	289.25	114.00	248.65	175.25	33.64	13.53
叶长 Leaf length/cm	134.00	69.50	114.93	64.50	12.61	10.97
叶宽 Leaf width/cm	5.73	1.50	4.51	4.23	0.69	15.33
分蘖数 Tiller number/个	23.50	8.00	15.31	15.50	2.71	17.68
茎粗 Stem diameter/mm	23.97	13.85	17.58	10.12	1.97	11.20
鲜重 Fresh weight/kg	15.10	0.61	3.90	14.49	2.72	69.85
干重 Dry weight/kg	3.25	0.20	0.76	3.05	0.60	78.77

2.2 狼尾草种质农艺性状的相关性分析

相关性分析表明(图 3),叶长与叶宽相关系数为 0.71,鲜重与干重相关系数为 0.66,均呈极显著正相关($P<0.01$)。其中,鲜重与干重相关性较强,

表明二者变化趋势具有较高一致性,在实际筛选中,鲜重可作为干物质积累能力的辅助参考指标,但由于鲜重同时受植株含水量影响,仍需结合干重进行综合评价。株高与叶长相关系数为 0.58。株

高与叶宽相关系数为0.57,呈极显著正相关。鲜重与叶长、叶宽仅表现为弱正相关,干重与株高、茎粗之间相关系数也比较低,且均未达显著水平,说明在本研究材料中,单一营养性状对产量形成的线性解释能力有限,生物量积累可能受多性状共同调控。总体看来,狼尾草农艺性状之间存在协同及独立的变异,其中株型方面的性状相关性较强,而分蘖数与多数性状相关性较弱,生物量指标中鲜重与干重一致性较高,可共同反映材料的产量表现。

2.3 狼尾草种质农艺性状的主成分分析

主成分分析结果显示,前两个主成分对总体性状变异的解释能力较强,其中PC1解释率为37.99%,PC2解释率为23.27%(图4、表3)。从各性状在主成分空间中的分布情况来看,PC1主要负载了株高、叶长、叶宽、茎粗以及生物量指标,反映植株营养生长与生物量积累相关的综合变化,而PC2在鲜重和干重上具有较高正载荷,而株高、叶长和叶宽载荷为负,反映了生物量指标与部分株型性状之间的另一变异维度。

为便于可视化展示,主要分析前两个主成分在二维空间中的分布特征;而在综合评价中,则结合

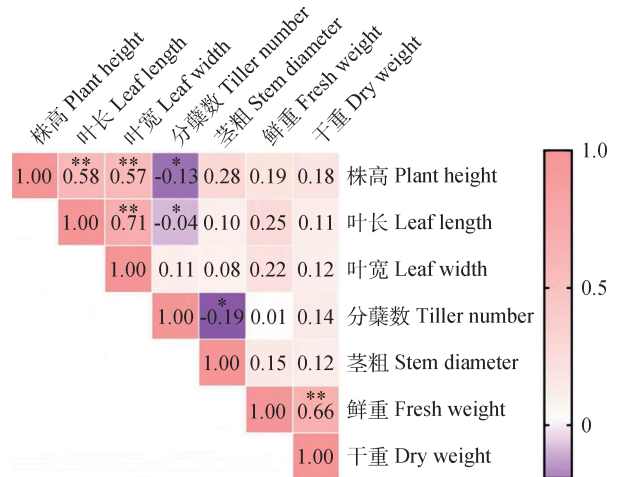


图3 狼尾草种质农艺性状的相关性分析

Fig. 3 Correlation coefficient of agronomic traits in *Pennisetum* germplasm

注:*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$)

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$)

特征值和累计贡献率保留前4个主成分进行计算。提取了4个特征值大于0.7的主成分(表3),其中PC3主要由分蘖数和茎粗共同决定,其中分蘖数为正载荷、茎粗为负载荷,说明该主成分可能反映分蘖能力与茎秆粗壮程度有一定权衡关系。

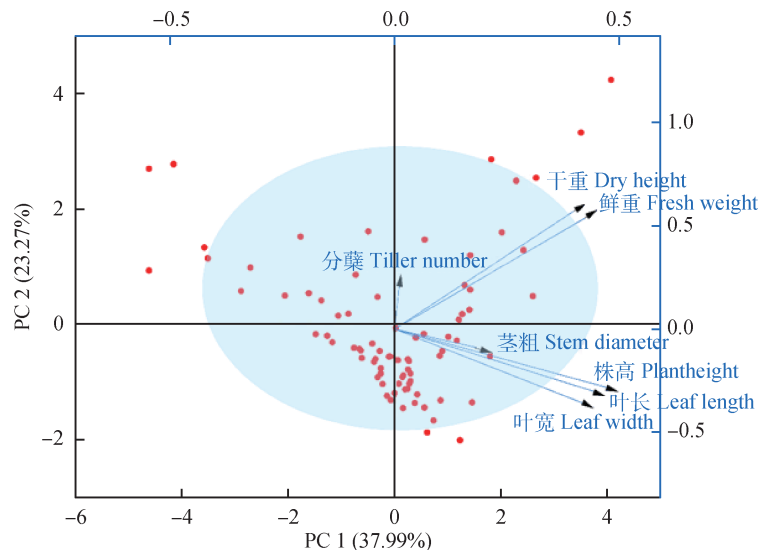


图4 狼尾草种质农艺性状的主成分得分与载荷分布

Fig. 4 Principal component scores and loadings for agronomic traits of *Pennisetum* germplasm

2.4 狼尾草种质的综合评价

将80份种质标准化后的数据代入4个主成分中,可得到如下公式: $F_1=0.455X_1+0.482X_2+0.433X_3+0.012X_4$, $F_2=-0.311X_1-0.290X_2-0.372X_3+0.239X_4$, $F_3=-0.098X_1+0.165X_2+0.312X_3+0.674X_4$, $F_4=$

$0.026X_1-0.179X_2+0.057X_3+0.661X_4$ 。根据以上公式得到 F_n 数值以及4个主成分的贡献率权重 V_n (0.424, 0.259, 0.194, 0.124),最终计算得到种质资源的综合得分。排名前10的种质资源是76, 59, 60, 64, 79, 31, 62, 44, 10, 63号种质(表4),分别为

表 3 狼尾草种质农艺性状的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of agronomic traits of *Pennisetum* germplasm

指标 Index	主成分 Principal component			
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
株高 Plant height/cm	0.455	−0.311	−0.098	0.026
叶长 Leaf length/cm	0.482	−0.290	0.165	−0.179
叶宽 Leaf width/cm	0.433	−0.372	0.312	0.057
分蘖数 Tiller number/个	0.012	0.239	0.674	0.661
茎粗 Stem diameter/mm	0.182	−0.089	−0.632	0.710
鲜重 Fresh weight/kg	0.423	0.537	−0.082	−0.126
干重 Dry weight/kg	0.400	0.572	−0.070	−0.086
特征值 Trait value	2.659	1.629	1.214	0.777
贡献率 Proportion/%	37.99	23.27	17.35	11.10
累计贡献率 Cumulative proportion/%	37.99	61.26	78.60	89.70

‘苏牧4号’杂交狼尾草、‘川育1号’象草、‘紫色’象草、‘桂闽引’象草、‘CHP31’杂交狼尾草、象草10号草、‘华南’象草、‘杂狼11号’杂交狼尾草、象草31和‘德宏’象草。

表 4 80 份狼尾草种质的综合评价

Table 4 Comprehensive analysis of 80 *Pennisetum* germplasm

种质编号 Germplasm code	主成分因子得分 Principal component factor score				综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄		
1	−1.059	0.147	0.460	1.095	−0.186	47
2	−0.224	−1.039	1.307	−0.980	−0.232	53
3	0.382	−1.368	0.559	0.344	−0.041	40
4	−0.494	1.613	0.457	0.670	0.380	21
5	0.616	−1.879	1.234	−0.339	−0.028	39
6	0.734	−1.666	0.442	−0.804	−0.134	43
7	0.850	−0.551	1.248	−0.100	0.447	20
8	1.272	0.176	−0.752	0.384	0.487	19
9	0.168	−0.888	0.703	−1.543	−0.214	51
10	1.797	−0.557	1.285	0.303	0.905	9
11	1.171	−0.283	0.811	−0.739	0.489	18
12	1.319	0.675	−1.348	1.756	0.690	12
13	0.401	−0.234	−0.007	0.026	0.111	26
14	1.014	−0.218	−0.470	−0.411	0.231	23
15	−0.729	0.858	0.998	−0.157	0.087	29
16	0.903	−0.467	−0.526	−1.516	−0.028	38
17	0.152	−0.916	−0.787	1.045	−0.196	48
18	0.159	−1.453	−2.934	1.289	−0.718	71
19	0.864	−1.319	0.869	0.303	0.231	24
20	−0.634	−0.455	0.978	0.212	−0.171	46
21	1.236	−2.013	−1.542	0.012	−0.295	60
22	0.249	−1.118	−2.414	−0.998	−0.776	73
23	−0.316	0.474	0.749	−0.733	0.043	32
24	1.211	0.077	0.319	0.224	0.623	13
25	0.023	−0.065	0.064	0.417	0.057	31
26	−0.140	−1.240	0.009	0.727	−0.289	58
27	1.410	0.250	0.148	0.276	0.726	11
28	0.552	−0.170	1.255	0.735	0.525	17
29	0.251	−0.609	−0.254	0.254	−0.069	41
30	1.428	0.597	−0.712	−0.735	0.531	16
31	2.020	1.592	1.558	−0.815	1.470	6
32	−2.708	0.982	0.961	−1.224	−0.859	74

续表 4

种质编号 Germplasm code	主成分因子得分 Principal component factor score				综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
	F_1	F_2	F_3	F_4		
33	-2.888	0.575	-0.907	-1.303	-1.413	78
34	-4.618	0.932	-2.422	-2.321	-2.474	80
35	-1.768	1.517	-0.780	-0.742	-0.600	67
36	-3.577	1.331	0.628	-0.945	-1.167	76
37	-3.513	1.141	-1.346	-1.449	-1.635	79
38	-2.062	0.494	-2.746	-0.129	-1.295	77
39	-4.155	2.776	0.206	2.008	-0.754	72
40	-1.262	-0.201	-2.785	1.051	-0.997	75
41	-0.070	-1.313	-1.308	0.189	-0.600	68
42	-1.613	0.540	1.160	1.578	-0.123	42
43	-0.419	-0.336	1.571	0.419	0.092	27
44	1.822	2.859	0.065	-1.506	1.339	8
45	-0.759	-0.411	0.923	-0.348	-0.292	59
46	-0.865	0.181	-0.140	0.758	-0.253	57
47	1.441	1.213	-1.675	-0.164	0.580	15
48	-0.103	-0.562	1.469	-0.055	0.089	28
49	-0.084	-0.558	2.057	-0.238	0.189	25
50	0.303	-0.854	0.884	-0.484	0.019	34
51	0.300	-0.985	-0.274	0.136	-0.164	45
52	0.282	-1.025	1.011	-0.605	-0.025	36
53	-1.171	-0.313	2.082	-0.527	-0.239	55
54	-0.659	-0.426	-0.240	-0.972	-0.557	65
55	0.078	-1.034	-0.059	0.156	-0.227	52
56	0.204	-1.132	0.075	0.370	-0.146	44
57	-4.620	2.697	1.280	2.594	-0.690	70
58	-1.375	0.413	1.172	0.067	-0.240	56
59	3.510	3.323	0.201	-0.260	2.356	2
60	5.230	-1.197	-0.349	-0.321	1.800	3
61	0.570	1.465	-0.378	0.483	0.608	14
62	2.428	1.286	-0.372	0.918	1.404	7
63	2.602	0.488	-2.070	-0.130	0.812	10
64	2.674	2.543	-0.611	0.965	1.794	4
65	0.258	-0.786	-0.048	1.107	0.034	33
66	0.429	-1.218	-0.846	0.490	-0.237	54
67	-0.382	-0.651	0.567	-0.925	-0.335	62
68	-0.315	-0.919	-0.879	-0.334	-0.584	66
69	-0.275	-0.467	0.714	0.586	-0.026	37
70	1.463	-1.355	0.066	-0.159	0.262	22
71	-0.259	-0.763	0.445	0.118	-0.206	50
72	0.274	-0.638	-0.325	0.859	-0.006	35
73	0.565	-1.443	-0.499	0.213	-0.205	49
74	-0.613	-0.584	-0.210	-0.068	-0.460	64
75	-1.479	-0.173	0.503	-0.606	-0.649	69
76	4.075	4.240	0.192	-1.013	2.738	1
77	-0.257	-0.857	-0.152	0.287	-0.325	61
78	-0.360	-0.606	-0.109	-0.356	-0.375	63
79	2.294	2.487	-0.351	-0.066	1.541	5
80	0.068	-0.625	-0.060	1.698	0.066	30

3 讨论

种质资源是遗传育种的物质基础,丰富的遗传

变异是筛选优异品种的前提^[15]。精准筛选优异种质不仅能够有效提升育种效率,还能够定向培育出适应特定生态环境、满足生产需求的优良品种,对

推动狼尾草产业规模化和高质量发展具有重要意义^[16-18]。本研究中,7个农艺性状的CV介于10.97%~78.77%,说明不同狼尾草种质在表型上存在较丰富的变异,其中鲜重和干重的变异幅度最大,这显著高于王丽宏等^[19]在河北地区对野生狼尾草的研究结果,表明本研究供试的狼尾草种质蕴含着极其丰富的遗传多样性,具有较高的育种改良潜力^[20-21]。这种农艺性状的高度变异性可能归因于供试材料的广泛地理来源,且包含象草、杂交狼尾草等不同遗传背景的种质,将为筛选适宜北方地区种植的高产狼尾草种质提供巨大的选择空间。

明确农艺性状间的相关性是提高草类植物育种效率的关键。本研究发现,叶长与叶宽、鲜重与干重之间呈极显著正相关,说明叶部形态性状之间具有较强一致性,鲜重与干重也具有较稳定的协同变化关系,这与王铭等^[22]、王艳丽等^[23]、ISMAIL F等^[24]研究认为株高、茎粗与作物产量之间存在正相关关系不同。表明不同狼尾草种质在遗传背景上存在差异,可能形成了高株细茎或矮株粗茎等多样化表型。值得注意的是,相比之下,分蘖数与大多数性状相关性较弱,说明其在本研究材料中表现出相对独立的变异特征,这为今后从不同育种目标出发开展定向筛选提供了依据,这一结果提示我们在进行高产种质筛选或育种时,不宜仅依据单一形态性状进行判断^[25-26]。

单一性状的评价往往具有片面性,结合主成分分析和隶属函数法能更科学地评价种质的综合表现^[27]。这种方法已广泛应用于水稻^[28]、苦荞^[29]、花苜蓿^[30]等多种作物的种质资源综合分析,并成功筛选出优良品种。本研究通过PCA提取4个主成分,累计贡献率为89.70%,较好地概括了7个农艺性状的大部分变异信息,并在一定程度上减少了性状间信息重叠对评价结果的影响。研究发现材料间差异首先来源于株高、叶长、叶宽及生物量指标所代表的营养生长和产量表现,其次才体现为分蘖数和茎粗等结构性状的差异。这说明在当前供试种质中,决定综合农艺表现的核心因素仍是植株体量和生物量积累能力,而分蘖性状更多作为补充评价维度存在。因此,在优异种质筛选中,应根据利用目标进行分类:若以高生物量生产为目标,可优先关注鲜重、干重及相关株型性状;若以再生能力或群体扩展能力为目标,则还需重点考察分蘖能力等指标。

基于综合评价获得的F值,本研究筛选出排名前10的优异种质。进一步分析发现,这些优异种质多数为改良象草品种,而部分杂交狼尾草品种虽然也表现出较好的生产潜力,但综合排名未进入前五。造成这一结果的原因,可能与北京地区生长季较短有关。当地适宜生长时间主要集中在5月至10月,部分晚熟杂交狼尾草在完成充分营养生长之前便受到季节条件限制,因而未能充分发挥其杂种优势。因此,在北方地区开展狼尾草属种质引种、筛选和推广时,应更加重视品种的早期生长速度、对光周期的敏感性以及对当地生长季的适应能力,优先选择营养生长快、熟期适中且适应性较强的品种,以提高其生产利用效果。

4 结论

本研究通过对80份狼尾草种质在北京地区的农艺性状评价,得出以下结论:(1)供试种质在北京地区表现出丰富的遗传多样性,7个主要农艺性状变异系数均在10%以上,其中干重和鲜重的变异最为丰富,具有极高的改良潜力;(2)株高、茎粗和叶宽是决定北京地区狼尾草产量的核心性状,可作为北方地区高产育种的主要选择指标;(3)通过多指标综合评价,筛选出综合性状最优的前10份种质,分别为:‘苏牧4号’杂交狼尾草(76号)、“川育1号”(59号)、“紫色”象草(60号)、“华南”象草(64号)、“杂狼11号”杂交狼尾草(79号)、象草31号(31号)、“桂闽引”象草(62号)、“CHP31”杂交狼尾草(44号)、象草10号(10号)和“德宏”象草(63号);(4)上述优异种质在北方地区表现出高产、植株高大、适应性强等特点,建议作为北京及周边地区“一年生利用”的高产青贮饲草品种推广。

参考文献

- [1] 王文强,周汉林,唐军. 狼尾草属牧草研究及利用进展[J]. 热带农业科学,2018,38(6):49-55,78
WANG W Q, ZHOU H L, TANG J. Research progress on the study and utilization of *Pennisetum* forage[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2018, 38(6): 49-55, 78
- [2] 梁英彩. 桂牧1号杂交象草在生产利用中应当注意的问题[J]. 广西畜牧兽医, 2012, 28(6): 334-335
LIANG Y C. Problems needing attention in production and utilization of Hybrid Napier grass Guimu-1[J]. Guangxi Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2012, 28(6): 334-335

- [3] 焦文静. 紫象草花色苷的提取纯化、结构分析及特性研究[D]. 福建农林大学, 2015: 1-12
JIAO W J. Extraction, purification, structure analysis and characterization of anthocyanins from *Echinacea purpurea* [D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2015: 1-12
- [4] 陈晓, 陈美秀. 象草青贮技术及其在动物应用中的研究进展[J]. 现代畜牧科技, 2024, (5): 71-74
CHEN X, CHEN M X. Research progress on elephant grass silage processing and its application in animal production [J]. Modern Animal Husbandry Science & Technology, 2024, (5): 71-74
- [5] 陈志彤, 黄勤楼, 潘伟彬, 等. 狼尾草属牧草 rDNA 的 ITS 序列分析[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 135-141
CHEN Z T, HUANG Q L, PAN W B, et al. Sequence analysis of the rDNA ITS region of *Pennisetum* species (Poaceae) [J]. Acta Prataculurae Sinica, 2010, 19(4): 135-141
- [6] 郭孝, 潘在鹏, 邓红雨, 等. 河南黄河滩区象草营养动态分析[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(12): 64-67
GUO X, PAN Z P, DENG H Y, et al. Nutritional dynamic analysis of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) in the yellow river flood plain of henan province [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2018, 39(12): 64-67
- [7] 胡培雷, 曾昭霞, 王克林, 等. 喀斯特地区不同年限桂牧 1 号象草草地土壤养分特征[J]. 草业科学, 2016, 33(1): 1-10
HU P L, ZENG Z X, WANG K L, et al. Soil nutrient characteristics of Guimu-1 Napier grass grasslands with different planting years in karst regions [J]. Pratacultural Science, 2016, 33(1): 1-10
- [8] 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, JIE X M, et al. Comprehensive development and utilization of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) resources [J]. Pratacultural Science, 2009, 26(9): 108-112
- [9] LOWE A. J, THORPE W, TEALE A, et al. Characterisation of germplasm accessions of Napier grass (*Pennisetum purpureum* and *P. purpureum* × *P. glaucum* hybrids) and comparison with farm clones using AFLP markers [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2003, (50): 121-132
- [10] LAJOIE G, VELLEND M. Characterizing the contribution of plasticity and genetic differentiation to community-level trait responses to environmental change [J]. Ecology and Evolution, 2018, (8): 3895-3907
- [11] 王丽宏, 李会彬, 孙鑫博, 等. 狼尾草主要表型性状的主成分和聚类分析[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(2): 91-94, 109
WANG L H, LI H B, SUN X B, et al. Principal component and cluster analysis on the phenotypic traits of *Pennisetum alopecuroides* [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(2): 91-94, 109
- [12] 张鹤山, 吴新江, 田宏, 等. 不同种源狼尾草表型性状多样性分析及优异种源筛选[J]. 南方农业学报, 2024, 55(7): 2090-2099
ZHANG H S, WU X J, TIAN H, et al. Diversity analysis of phenotypic traits and screening of excellent germplasm resources on different *Pennisetum alopecuroides* provenances [J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(7): 2090-2099
- [13] 姚娜, 赖志强, 易显凤, 等. 四个象草品种生产性能的比较[J]. 广西畜牧兽医, 2015, 31(2): 59-61
YAO N, LAI Z Q, YI X F, et al. Comparison of production performance of four Napier grass varieties [J]. Guangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2015, 31(2): 59-61
- [14] 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 on cold tolerance of 8 forage varieties (lines) of *Pennisetum* under natural low temperature stress [J]. Grassland Science, 2025, (2): 43-49
- [15] 景婷婷, 旦增塔庆, 任淑婷, 等. 播期和播量对成都平原“英迪米特”燕麦饲草产量及相关性状的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(10): 2594-2600
JING T T, DANZENG T Q, REN S P, et al. Effects of the planting date and planting rate on the yield and related characters of ‘Intimidator’ oats on the Chengdu Plain [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(10): 2594-2600
- [16] 田宏, 党志强, 张鹤山, 等. 31 份狼尾草种质资源的表型性状多样性分析和观赏性综合评价[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(7): 1270-1279
TIAN H, DANG Z Q, ZHANG H S, et al. Analysis of phenotypic trait diversity and comprehensive evaluation of ornament characteristic in 31 *Pennisetum* germplasm resources [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2025, 41(7): 1270-1279
- [17] KAMBLE S Y. Genetic diversity studies in Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) [D]. Rahuri: Mahatma Phule Krishi Vidyapeeth, 2011: 1-13
- [18] NEGAWO A T, TESHOME A, KUMAR A, et al. Opportunities for Napier Grass (*Pennisetum purpureum*) Improvement Using Molecular Genetics [J]. Agronomy, 2017, 7(2): 28
- [19] 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
- [20] 张怀山, 夏曾润, 栗孟飞, 等. 中型狼尾草种质资源遗传多样性的 ISSR 分析[J]. 西北植物学报, 2014, 34(2): 256-264
ZHANG H S, XIA Z R, LI M F, et al. Genetic diversity of *Pennisetum longissimum* var. *intermedium* germplasm revealed by ISSR markers [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(2): 256-264
- [21] GIRMA G, TIRFESEA A, BEJIGA T, et al. Assessing genetic, racial, and geographic diversity among Ethiopian sorghum landraces and implications for heterotic potential for hybrid sorghum breeding [J]. Molecular Breeding, 2024, 44: 46

- [22] 王铭,师尚礼,成曦,等. ‘清水’苜蓿雄性不育系及父本品种生产性能和营养价值评价[J]. 草地学报, 2024, 32(11): 3480-3489
WANG M, SHI S L, CHENG X, et al. Evaluation of Production Performance and Nutritional Value of ‘Qingshui’ Alfalfa Male Sterile Lines and Male Parent Varieties[J]. Acta Agriculturae Sinica, 2024, 32(11): 3480-3489
- [23] 王艳丽,吴鹏年,王西娜,等. 宁夏扬黄灌区有机肥配施氮肥对滴灌春玉米生长和产量的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(1): 151-159
WANG Y L, WU P N, WANG X N, et al. Effects of Combined Application of Organic Manure and Nitrogen Fertilizer on Growth and Yield of Drip-irrigated Spring Maize in Yanghuang Irrigation District of Ningxia[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(1): 151-159
- [24] MOHAMAD ISMAIL F N, ABDUL HAMID H, MOHAMED J, et al. Character association and selection of breeding line based on morphophysiological characteristics and tensile strength in *Hibiscus cannabinus* L. [J]. BioResources, 2020, 15(4): 8883-8908
- [25] SILVA P H F, SALES T B, LEMOS M F, et al. Tall and short-sized elephant grass genotypes: morphophysiological aspects, cut-and-carry, and grazing management[J]. Ciência Rural, 2021, 51(9): e20200848
- [26] 武炳超,张欢,童磊,等. 象草不同辐射剂量诱变系表型及遗传变异研究[J]. 草业学报, 2018, 27(11): 77-86
WU B C, ZHANG H, TONG L, et al. Phenotypic and genetic variation of Napier grass mutants under different radiation doses[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(11): 77-86
- [27] 胡培雷,王克林,曾昭霞,等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧1号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 896-905
HU P L, WANG K L, ZENG Z X, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plants-soil-microbes of *Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1 pastures at different rehabilitation ages in a karst rocky desertification region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 896-905
- [28] 胡标林,万勇,李霞,等. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 829-839
HU B L, WAN Y, LI X, et al. Analysis on genetic diversity of phenotypic traits in rice (*Oryza sativa*) core collection and its comprehensive assessment[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(5): 829-839
- [29] 杨恩泽,谢锐,韩平安,等. 内蒙古162份苦荞资源表型性状的遗传多样性及综合评价[J]. 作物杂志, 2024(2): 15-22
YANG E Z, XIE R, HAN P A, et al. Genetic diversity and comprehensive evaluation of phenotypic traits of 162 tartary buckwheat resources in inner mongolia [J]. Crops, 2024(2): 15-22
- [30] 唐芳,侯瑞虹,高佳荷,等. 不同种源10份野生花苜蓿材料萌发期和幼苗期耐盐性评价[J]. 中国草地学报, 2024, 46(6): 10-21
TANG F, HOU R H, GAO J H, et al. Evaluation of salt tolerance in germination and seedling stage of 10 wild *Medicago ruthenica* L. from different provenances[J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 46(6): 10-21

(责任编辑 付 宸)