

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.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.07.003

31份狼尾草种质资源的表型性状多样性和观赏性综合评价

田宏¹, 党志强², 张鹤山¹, 熊军波¹, 陆皎云¹, 吴新江¹, 刘洋¹

(1.湖北省农业科学院畜牧兽医研究所/湖北省动物胚胎工程及分子育种重点实验室,湖北武汉430064; 2.武汉田牧绿化有限公司,湖北武汉430064)

摘要: 本研究对31份狼尾草种质资源的株高、花序长、花序宽、叶长、叶宽、始花期、花序色泽、花序形态、叶色、叶形、抗旱性等11个性状进行测定,通过变异系数、香农-维纳(Shannon-Wiener)多样性指数、灰色关联度和聚类分析对31份狼尾草种质资源进行评价。结果表明,31份狼尾草种质资源的表型性状变异系数均大于10%,其中始花期变异系数最高(51.51%),其次为花序色泽(23.53%)和叶长(20.46%),株高、花序长、花序宽、叶形和抗旱性变异系数较小(11.87%~10.16%)。31份狼尾草种质资源的株高香农-维纳多样性指数最大,叶形香农-维纳多样性指数最小。数量性状香农-维纳多样性指数总体高于质量性状。灰色关联度分析结果表明,种质资源LW1与理想品种的关联度最高(0.978),其次为LW20(0.957)和LW21(0.935)。LW15、LW4和LW3与理想品种的关联度较低。聚类分析结果显示,31份狼尾草种质资源被分为3类,第1类包括15份种质资源,该类种质资源抽穗开花早、花序形态美观、花序色泽鲜艳;第2类包括13份种质资源,该类种质资源植株高大、叶宽、花序较粗;第3类仅包括3份种质资源,该类种质资源抽穗开花晚、植株矮小。综合而言,LW1、LW20、LW21、LW13、LW25和LW29性状优良,可作为亲本用于观赏性狼尾草新品种的选育。本研究为中国本土狼尾草种质资源在观赏、生态、饲用等方面的开发利用提供了理论依据。

关键词: 狼尾草; 表型性状多样性; 灰色关联度分析; 观赏价值; 综合评价

中图分类号: S543 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)07-1270-10

Phenotypic trait diversity analysis and comprehensive ornamental evaluation of 31 *Pennisetum alopecuroides* germplasms

TIAN Hong¹, DANG Zhiqiang², ZHANG Heshan¹, XIONG Junbo¹, LU Jiaoyun¹, WU Xinjiang¹, LIU Yang¹

(1. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Science, Hubei Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Animal Embryo Engineering and Molecular Breeding of Hubei Province, Wuhan 430064, China; 2. Wuhan Tianmu Landscaping Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

Abstract: This study measured 11 traits of 31 *Pennisetum alopecuroides* germplasms, including plant height, inflorescence length, inflorescence width, leaf length, leaf width, flowering date, inflorescence color, inflorescence shape, leaf color, leaf shape, and drought resistance. The germplasms were evaluated using the coefficient of variation, Shannon-Wiener diversity index, grey relational analysis, and cluster analysis. The results showed that the coefficient of variation for all phenotypic traits of the 31 germplasms was greater than 10%. The highest coefficient of variation was observed for flowering date (51.51%), followed by inflorescence color (23.53%) and leaf length (20.46%). The

收稿日期:2024-09-23

基金项目:财政部和农业农村部国家牧草产业技术体系项目(CARS-34);湖北省农业科技创新中心项目(2021-620-000-001-021)

作者简介:田宏(1978-),女,陕西周至人,硕士,副研究员,主要研究方向为草种质资源评价和新品种选育。(E-mail) thdzq@126.com

通讯作者:刘洋,(E-mail) liuyang430209@163.com

coefficients of variation for plant height, inflorescence length, inflorescence width, leaf shape, and drought resistance were relatively low (11.87%–10.16%). The Shannon-Wiener diversity index for plant height was the highest among the 31 germplasms, while the Shannon-Wiener diversity index for leaf shape was the lowest. The Shannon-Wiener diversity index for quantitative traits was generally higher than that for qualitative traits. The grey relational analysis indicated that LW1 had the highest correlation with the ideal variety (0.978), followed by LW20 (0.957) and LW21 (0.935). LW15, LW4, and LW3 had relatively low correlations with the ideal variety. The results of cluster analysis showed that the 31 germplasms were divided into three categories. The first category included 15 germplasms, which were characterized by early heading and flowering, attractive inflorescence shape, and bright inflorescence color. The second category included 13 germplasms, which were tall, had wide leaves, and relatively thick inflorescences. The third category included only three germplasms, which were late heading and flowering and had short plants. In summary, LW1, LW20, LW21, LW13, LW25, and LW29 exhibited excellent traits and could be used as parents for the breeding of new ornamental *P. alopecuroides* varieties. This study provides a theoretical basis for the development and utilization of native Chinese *P. alopecuroides* germplasms in ornamental, ecological, and forage aspects.

Key words: *Pennisetum alopecuroides*; phenotypic trait diversity; grey relational analysis; ornamental value; comprehensive evaluation

狼尾草 [*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.] 是禾本科狼尾草属 (*Pennisetum* Rich.) 的多年生草本植物, 在中国大多数省份均有分布。狼尾草株型似喷泉、花序婀娜多姿, 且具有抗旱节水等优点在国内外景观设计中被广泛应用^[1]。在 20 世纪 80 年代初, 狼尾草被美国园林设计师用于构造花境^[2]。在中国, 2000 年左右狼尾草开始作为观赏草用于园林造景。2006 年, 狼尾草因其适宜城市绿化, 在北京得到推广^[3]。北方地区冬季寒冷、用水紧张, 乡土狼尾草因其绿期长、耐旱性强而受到造景者的喜爱^[4]。在上海, 狼尾草虽非观赏效果最佳的草种, 但是城市公共绿地中应用频率最高的草种之一^[5]。在广州, 共有 7 种狼尾草属植物被应用于花镜, 数量显著高于其他观景植物^[6]。对花境植物的综合评价结果表明, 紫叶羽绒狼尾草 (*P. setaceum* Rubrum) 和紫穗狼尾草 (*P. alopecuroides* Purple) 属节约型植物, 抗逆能力强, 日常维护成本较低^[7]; 小兔子狼尾草 (*P. alopecuroides* Little bunny) 和紫穗狼尾草属植物具有观赏效果佳、维护成本低的优点^[8]。

随着中国经济的快速发展, 特别是美丽乡村建设、田园综合体以及“山水林田湖草沙”生命共同体等战略的提出, 观赏草的应用逐渐从北京、上海、广州等一线城市向中部及北方各大城市普及。例如, 南京引种的 23 种观赏草中, 狼尾草属植物在夏季生长旺盛, 抽穗开花时既可观花又可观叶, 花序枯黄变白后仍具有较高的观赏价值^[9]。在成都, 狼尾草和细叶芒 (*Miscanthus sinensis* Gracilliums)、麦冬

[*Ophiopogon japonicus* (L. f.) Ker Gawl.]、蒲葦 [*Cortaderia selloana* (Schult. & Schult. f.) Asch. & Graebn.] 为城市绿化中使用频度最高的 4 种观赏草, 其观赏期长, 能够顺利越冬, 多种植于路边^[10-11]。在甘肃金昌, 引种的小兔子狼尾草、紫光狼尾草 (*P. alopecuroides* Ziguang)、紫叶羽绒狼尾草、绒毛狼尾草 (*P. villosum* R.Br.ex Fresen.) 和矮丛狼尾草 (*P. alopecuroides* Aizhu) 表现出较强的抗逆性, 成为园林绿化推广的首选观赏植物^[12]。在山西太原, 东方狼尾草 (*P. orientale* Richard)、紫叶羽绒狼尾草和小兔子狼尾草被广泛用于园林绿化, 这些草种的观赏效果较好^[13]。

目前, 城市绿化中应用的狼尾草属中观赏草主要包括东方狼尾草、羽绒狼尾草、绒毛狼尾草和狼尾草。其中, 东方狼尾草的品种有大布尼和雪绒, 羽绒狼尾草的品种有紫叶、火焰和金红羽, 绒毛狼尾草的品种有白美人。狼尾草的品种相对较多, 有小兔子、紫光、矮株、长穗、紫穗和白穗。在这些品种中, 应用较多的小兔子、紫叶和大布尼等均为国外引进品种, 而由中国自主选育、开发利用的品种较少。中国植物资源丰富, 狼尾草作为乡土草种, 在各地分布广泛。且羽绒狼尾草和绒毛狼尾草原产于地中海地区, 适应温暖气候, 长江以北地区冬季气温较低, 这两种植物往往难以安全越冬^[14], 而本土的狼尾草具有更强的抗寒性, 且养护成本低。本研究拟对 31 份野生狼尾草观赏性状进行测定, 结合灰色关联法和聚类分析进行综合评价, 旨在筛选出观赏价值高的狼尾草种质资源, 为下

一步新品种的选育提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于湖北省武汉市江夏区的农业农村部国家草品种区域试验站(武汉),地理位置为东经 114°19'10",北纬 30°29'15",海拔 29.0 m,属亚热带季风气候。年平均气温为 16.7 ℃,年降水量为 1 277

mm,无霜期为 260~296 d。夏季高温高湿,秋季干旱。土壤类型为丘陵黄壤,土质黏重且保水保肥能力较差。土壤 pH 值 6.10,有机质含量 1.75%,碱解氮含量 106.9 mg/kg,速效磷含量 26.7 mg/kg,速效钾含量 134 mg/kg。

1.2 试验材料

如表 1 所示,试验材料为从各地收集的野生狼尾草种质资源,共 31 份。

表 1 狼尾草种质资源

Table 1 *Pennisetum alopecuroides* germplasm resources

种质资源	采集地	经度(E)	纬度(N)	海拔(m)
LW1	河南省信阳市狮河区马鞍山山脚阳坡	114°04'36"	32°05'24"	117
LW3	湖北省随州市厉山山下	113°10'22"	31°34'08"	820
LW4	湖北省武汉市洪山区南湖瑶苑路路边	114°10'46"	30°18'32"	29
LW5	湖北省武汉市洪山区路边	115°12'05"	30°48'22"	18
LW7	河南省信阳市狮河区龟山阴坡	114°06'25"	32°12'16"	246
LW8	河南省信阳市平桥区甘岸镇淮河边	115°12'05"	30°48'22"	18
LW9	河南省信阳市狮河区龟山山脚河谷	112°22'02"	32°11'46"	120
LW10	湖北省武汉市洪山区弃荒地	115°06'14"	31°28'30"	410
LW11	湖北省襄阳市双沟镇田埂	114°04'36"	32°05'24"	117
LW13	河南省信阳市狮河区马鞍山山脚塘边	114°01'31"	32°16'04"	48
LW14	河南省信阳市平桥区甘岸镇淮河道	114°04'36"	32°05'24"	117
LW15	山西省沁源县郊区路旁	111°34'12"	36°12'34"	1 500
LW18	湖北省宜昌市长阳津洋口镇咬草岩	111°08'07"	30°15'33"	1 020
LW19	湖北省宜昌市三峡大学弃荒地	111°18'10"	30°43'04"	150
LW20	湖北省神农架红坪镇路边	110°25'48"	31°40'06"	1 450
LW21	湖北省神农架松柏镇路旁	110°39'06"	31°44'12"	1 100
LW22	江西省南昌市西湖区路旁	110°39'06"	31°44'12"	1 100
LW23	河南省信阳市狮河区 107 国道路边	114°04'56"	32°06'30"	110
LW24	河南省信阳市平桥区甘岸镇淮河道	114°01'31"	32°16'04"	48
LW25	湖北省神农架松柏镇八角庙村田埂	110°21'23"	31°27'28"	1 080
LW26	河南省信阳市罗山县五一劳动场	114°27'02"	32°13'54"	60
LW27	湖北省神农架林区大九湖路边	109°58'01"	31°28'06"	1 740
LW28	湖南省会同县路边	109°25'06"	26°31'24"	520
LW29	湖南省湘西古丈县古阳镇柑子坪村路边	109°32'12"	28°47'34"	351
LW30	江西省抚州市郊区路边	115°21'36"	26°17'06"	82
LW31	湖北省神农架松柏镇农田	110°36'45"	31°42'18"	1 100
LW32	湖南省长沙市芙蓉区撂荒地	113°08'14"	28°11'26"	2 84
LW33	湖南省长沙市芙蓉区路边	111°16'22"	26°48'06"	410
LW34	湖南省长沙市芙蓉区田边	111°39'41"	26°25'09"	120
LW35	江苏省南京市郊区路边	118°78'18"	32°02'33"	59
LW36	重庆市北碚区西南大学撂荒地	106°22'09"	29°41'57"	380

LW15 由中国农业科学院草原研究所国家种质牧草中期库提供。

1.3 种质资源管理

在春季采用营养钵育苗,待幼苗长至 3~4 叶时进行移栽。小区面积为 3 m×3 m,株距、行距均为 50 cm,每小区移栽 36 株,设 3 次重复。移栽后及时浇水,待植株成活后进行除杂,其余时间不浇水,实行粗放管理。为确保野生狼尾草资源在异地生长过程中有一定缓冲期适应环境,种植当年未进行评价。

1.4 数量性状和质量性状评价方法

数量性状主要包含植株高度、花序长和宽、叶长和宽度;质量性状主要包含花序色泽、花序形态、叶色、叶形和抗旱性。指标测定参考国家标准《草品种审定技术规程》中观赏草观赏性评价方法和分级表^[15]。

本研究旨在筛选观赏性高的狼尾草种质资源,鉴于后期育种目标为花序出现早且花期长,因此在

评价指标中增加了始花期。在盛花期,对各指标进行测定并计算其平均值。具体观测和测定方法如下:始花期,记录 20% 的植株花序柱头露出的日期;株高,随机选取 10 株,测量从地面至植株最高点的绝对高度;花序长、花序宽,随机选取生长一致的 20 株植株的花序,测量从穗状花序基部至顶端的长度和花序最宽处的直径(包括刚毛);叶长和叶宽,随机选取 30 株植株从下往上第 2 片叶子,测量自叶基部至叶尖的长和最宽处的宽度。

在盛花期(80% 的植株开花),根据表 2 的评价标准对花序色泽、花序形态、叶色和叶形进行评分;在武汉夏末秋初的持续伏旱期对狼尾草种质材料抗旱性进行评价。所有定性指标均按照国家草品种区域试验要求,由 3 个人独立评分后取平均值。

表 2 评分标准

Table 2 Scoring criteria

性状	评分				
	1 分	2~3 分	4~5 分	6~7 分	8~9 分
始花期	10 月	9 月	8 月	7 月	6 月
花序色泽	差	较差	一般	较鲜艳	鲜艳
花序形态	少且差	少且较差	中等	多且美	多且很美
叶色	差	较差	一般	较美观	美观
叶形	差	较差	一般	较美观	美观
抗旱性	弱	较弱	中等	较强	强

1.5 观赏性综合评价

采用灰色关联度分析法对 31 份野生狼尾草种质资源的观赏性进行评价。以供试材料各性状的最大值构建理想品种数列 x_0 , 并将被评价材料作为比较数列 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, 31)$, 将 x_0 数列值除以 x_i 数列值, 得到无量纲的新数列。

灰色关联系数 $\varepsilon_i(k)$ 计算公式如下:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中, i 为供试材料 ($i=1, 2, 3, \dots, 31$); k 为性状 ($k=1, 2, 3, \dots, 11$); ρ 为分辨系数, 取 0.5。

用标准差系数赋予权重法计算权重系数 (V_k)^[16], 计算公式如下:

$$V_k = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_k)^2}}{\bar{X}_k} \quad (2)$$

式中, $X_{i,k}$ 为第 k 个性状的第 i 个测定值, \bar{X}_k 为第 k 个性状的平均值, n 为每个性状的测定数。

第 k 个性状指标权重 (ω_k) 计算公式如下:

$$\omega_k = \frac{V_k}{\sum_{k=1}^n V_k} \quad (3)$$

加权灰色关联度 (r_i) 计算公式如下:

$$r_i = \sum_{k=1}^n \omega_k \varepsilon_i(k) \quad (4)$$

关联度越大说明供试种质资源与理想品种越相近, 开发利用价值越高。

1.6 数据处理

用 Microsoft Excel 2013 对数据进行整理, 计算所有指标的平均值 (\bar{X})、标准差 (sd) 和变异系数 (CV), 根据计算结果将每个指标划分 6 个等级^[17]。分级标准: 1 级, $\leq \bar{X} - 2sd$; $\bar{X} - 2sd < 2$ 级 $\leq \bar{X} - 1sd$; $\bar{X} - 1sd < 3$ 级 $\leq \bar{X}$; $\bar{X} < 4$ 级 $\leq \bar{X} + 1sd$; $\bar{X} + 1sd < 5$ 级 $\leq \bar{X} +$

$2sd$; 6 级, $>\bar{X}+2sd$ 。

香农-维纳指数(H') = $-\sum P_i \ln(P_i)$, 式中 P_i 为某性状第 i 级别样本数占总样本数的比例。使用 SPSS26.0 统计软件对种质资源进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 表型性状评价

种植第一年,少数狼尾草种质资源为直立丛生型,但到第二年,株型转为披散型,状如喷泉。如表 3 所示,在盛花期,狼尾草株高差异较大,其中 LW1、LW5、LW19、LW20、LW22、LW27 和 LW28 较高大,株高为 101.0~122.0 cm。LW24、LW31、LW33 和 LW34 较矮,株高为 68.6~77.8 cm。狼尾草的花序为穗状,有紫色或淡绿色刚毛。31 份狼尾草种质资源的花序长平均为 17.1 cm,其中 LW9 花序最长,达到 21.5 cm; LW25、LW1、LW19、LW15、LW13 和 LW26 花序较长,花序长为 19.4~20.0 cm。31 份狼尾草种质资源的花序宽为 4.3~7.2 cm。31 份狼尾草种质资源的叶长差异较大,叶长最长达 95.5 cm,最短仅 37.7 cm。31 份狼尾草种质资源的叶宽平均为 8.5 mm, LW3、LW13、LW14 和 LW18 属大叶型狼

尾草,叶宽为 10.0~11.3 mm。

31 份狼尾草种质资源的开花习性差异较大,其中 LW1 和 LW31 开花最早,6 月上旬便陆续抽出花序,评分为 9 分; LW8、LW24、LW25、LW26、LW27 和 LW29 在 6 月中下旬抽出花序; LW4、LW15 和 LW33 花序出现较迟,直到 10 月份才陆续抽出花序,评分为 1 分。狼尾草花序颜色为绿色和紫色 2 种,在评价时,以色泽美丽鲜艳程度为评分依据,其中 LW15、LW20 和 LW36 花序色泽最为漂亮,得到 9; 其次为 LW1、LW11、LW21、LW29 和 LW32。在盛花期,花序形态方面, LW1、LW20、LW21、LW25 和 LW27 花序数量较多且美观,花序形态评分较高。31 份狼尾草种质资源叶片均为绿色, LW9、LW23 和 LW24 评分较低,其余种质资源叶色评分为 6~8。狼尾草叶片为线形,观赏性较高,31 份狼尾草种质资源的叶形差异较小,评分为 6~8。狼尾草的适应性强,在武汉高温(39~40 °C)且持续干旱的恶劣气候条件下,只有 LW14、LW15、LW23、LW24、LW25、LW26 和 LW31 这 7 份狼尾草种质资源的叶片稍有内卷,其余 24 份狼尾草种质资源的叶面平展,生长态势良好。

表 3 狼尾草种质资源表型性状评价

Table 3 Phenotypic trait evaluation of *Pennisetum alopecuroides* germplasm resources

种质资源	株高 (cm)	花序长 (cm)	花序宽 (mm)	叶长 (cm)	叶宽 (mm)	始花期 (分)	花序色泽 (分)	花序形态 (分)	叶色 (分)	叶形 (分)	抗旱性 (分)
LW1	122.0	19.9	4.3	80.7	8.7	9	8	9	8	8	8
LW3	95.2	17.1	5.5	74.8	11.3	3	6	6	7	6	7
LW4	81.9	14.6	6.0	58.7	8.5	1	5	6	5	6	7
LW5	106.0	18.7	5.9	80.0	9.0	3	5	7	6	6	8
LW7	98.8	17.3	5.5	82.1	8.1	6	6	6	7	6	7
LW8	80.9	15.7	4.8	76.7	9.4	8	5	6	6	6	7
LW9	93.2	21.5	5.3	95.5	8.0	6	6	7	5	6	7
LW10	87.3	18.7	5.9	84.1	8.9	3	7	6	7	7	7
LW11	86.2	16.2	6.1	64.9	8.7	3	8	6	8	6	7
LW13	91.6	19.4	5.6	77.3	10.8	6	7	6	7	8	8
LW14	90.6	17.1	4.5	80.5	10.0	6	6	6	6	7	6
LW15	98.3	19.6	5.1	84.3	6.7	1	9	6	6	6	6
LW18	93.4	16.2	6.1	78.8	10.0	4	6	5	8	8	8
LW19	101.4	19.9	7.2	76.0	9.0	4	6	6	6	7	7
LW20	102.9	15.2	5.2	69.8	8.3	7	9	9	8	8	8
LW21	92.6	16.9	5.2	60.7	7.5	6	8	8	8	8	8

续表3 Continued3

种质资源	株高 (cm)	花序长 (cm)	花序宽 (mm)	叶长 (cm)	叶宽 (mm)	始花期 (分)	花序色泽 (分)	花序形态 (分)	叶色 (分)	叶形 (分)	抗旱性 (分)
LW22	106.0	16.2	5.0	60.1	6.3	4	7	7	8	8	8
LW23	92.7	15.4	5.5	66.9	8.7	4	5	3	5	6	6
LW24	77.5	16.1	4.8	66.6	9.1	8	5	6	5	6	6
LW25	91.0	20.0	5.4	60.2	7.1	8	6	8	6	6	6
LW26	92.9	19.4	4.6	79.6	7.9	8	4	7	6	6	6
LW27	101.0	18.1	4.5	67.4	7.7	8	3	9	6	6	7
LW28	103.1	16.9	5.7	62.4	8.2	2	6	6	6	7	7
LW29	94.4	16.1	5.5	48.8	7.0	8	8	7	6	6	7
LW30	99.4	15.8	5.7	80.1	8.3	2	6	5	7	7	7
LW31	77.6	14.7	4.5	66.7	9.7	9	5	6	6	6	6
LW32	87.4	14.9	5.5	53.8	7.6	6	8	6	8	7	8
LW33	68.6	15.2	5.3	37.7	7.2	1	5	6	7	7	7
LW34	77.8	16.6	5.7	39.8	7.1	3	6	7	8	7	8
LW35	81.5	14.7	5.7	42.2	7.1	3	7	7	7	7	8
LW36	80.4	15.9	4.8	64.3	9.0	3	9	6	7	7	8

LW1、LW3、LW4、LW5、LW7、LW8、LW9、LW10、LW11、LW13、LW14、LW15、LW18、LW19、LW20、LW21、LW22、LW23、LW24、LW25、LW26、LW27、LW28、LW29、LW30、LW31、LW32、LW33、LW34、LW35和LW36见表1。始花期、花序色泽、花序形态、叶色、叶形、抗旱性评分标准见表2。

2.2 表型性状多样性分析

如表4所示,31份狼尾草种质资源表型性状具有较大的差异。数量性状中,叶长的变异系数最大(20.46%)。质量性状中,始花期的变异系数最大(51.51%),其次为花序色泽(23.53%)。株高、花序长、花序宽、叶形和抗旱性的变异系数为10.16%~11.87%,表明这5个性状的变异较小。

根据平均值±标准差,将11个性状分为6个等级。如表5所示,31份狼尾草种质资源株高和花序形态的分化程度最高,在6个级别均有分布,多样性指数(H')分别为1.46和1.37。31份狼尾草种质资源叶形和抗旱性的分化程度最小,仅分布于3个级别,多样性指数(H')分别为1.03和1.07。11个性状的多样性指数均大于1.00,表明31份狼尾草种质资源丰富的多样性。数量性状的平均多样性指数高于质量性状。

31份狼尾草种质资源的株高、花序长、花序宽、叶长、叶宽、花序形态在6个等级中的分布呈正态分布。6个等级中,株高、花序宽、叶宽处于第4等级的狼尾草种质资源占比最大。即株高为92.1~103.0 cm、花序宽为5.4~6.0 cm的狼尾草种质资源

均占41.94%,叶宽为8.4~9.6 mm的狼尾草种质资源占35.48%。6个等级中,花序长、叶长、始花期、花序色泽、花序形态、叶色、叶形和抗旱性处于第3等级的狼尾草种质资源占比最大。

表4 狼尾草种质资源表型性状的变异系数

Table 4 Coefficients of variation of phenotypic traits in *Pennisetum alopecuroides* germplasm resources

性状	最小值	最大值	平均值	性状	变异系数 (%)
株高(cm)	68.6	122.0	92.1±10.9	株高	11.87
花序长(cm)	14.6	21.5	17.1±1.9	花序长	11.14
花序宽(cm)	4.3	7.2	5.4±0.6	花序宽	11.32
叶长(cm)	37.7	95.5	68.4±14.0	叶长	20.46
叶宽(mm)	6.3	11.3	8.5±1.2	叶宽	14.04
始花期(分)	1.0	9.0	4.9±2.5	始花期	51.51
花序色泽(分)	3.0	9.0	6.4±1.5	花序色泽	23.53
花序形态(分)	3.0	9.0	6.5±1.2	花序形态	19.04
叶色(分)	5.0	8.0	6.5±1.2	叶色	15.32
叶形(分)	6.0	8.0	6.7±0.8	叶形	11.67
抗旱性(分)	6.0	8.0	7.1±0.7	抗旱性	10.16

始花期、花序色泽、花序形态、叶色、叶形、抗旱性评分标准见表2。

表 5 狼尾草种质资源表型性状的分级和香农-维纳多样性指数

Table 5 Grading and Shannon-Wiener diversity index of phenotypic traits in *Pennisetum alopecuroides* germplasm resources

性状	占比 (%)						H'
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	
株高	3.23	16.13	25.81	41.94	9.68	3.23	1.46
花序长	0	16.13	41.94	19.35	19.35	3.23	1.41
花序宽	0	16.13	29.03	41.94	9.68	3.23	1.35
叶长	6.45	9.68	38.71	35.48	9.68	0	1.36
叶宽	0	19.35	29.03	35.48	9.68	6.45	1.45
始花期	0	16.13	35.48	22.58	25.81	0	1.35
花序色泽	3.23	3.23	54.84	12.90	25.81	0	1.16
花序形态	3.23	6.45	51.61	22.58	6.45	9.68	1.37
叶色	0	12.90	35.48	25.81	25.81	0	1.33
叶形	0	0	48.39	32.26	19.35	0	1.03
抗旱性	0	22.58	41.94	0	35.48	0	1.07

H' : 香农-维纳多样性指数。

2.3 观赏性综合评价

种质资源与理想品种的关联度越大,观赏价值越高。如表 6 所示,31 份狼尾草种质资源中,LW1 与理想品种的关联度最高(0.978),该种质资源植株高大、抽穗早以及花序细长、数量多且颜色鲜艳,同时叶色、叶形观赏性较好,抗旱性较强;其次为 LW20(0.957),该种质资源株高 102.9 cm,于 7 月上旬陆续抽出花序,花序呈翠绿色且数量较多;LW21、LW13、LW25 和 LW29 与理想品种的关联度中等,LW21 花序粗短、花序色泽鲜艳且数量较多,LW13 和 LW25 花序细长,LW29 开花早、花序色泽鲜艳;LW4、LW15 和 LW33 与理想品种的关联度较低(<0.800),这 3 份种质资源的始花期较晚,直至 10 月份才开花,观赏价值低。

对 31 份狼尾草种质资源进行聚类分析,可将其分为 3 类。如图 1 所示,第 1 类包括 LW1、LW20、LW21、LW13、LW25、LW29、LW31、LW8、LW9、LW26、LW7、LW32、LW14、LW24、LW27 共 15 份狼尾草种质资源,该类种质资源与理想品种的关联度均大于 0.900 以上,其中 LW1、LW20、LW21、LW13、LW25、LW29 的观赏性较好,可用于品种选育。第 2 类包括 13 份狼尾草种质资源,该类种质资源与理想品种的关联度平均为 0.859。第三类包括 LW15、LW4 和 LW33,这 3 份狼尾草种质资源与理想品种

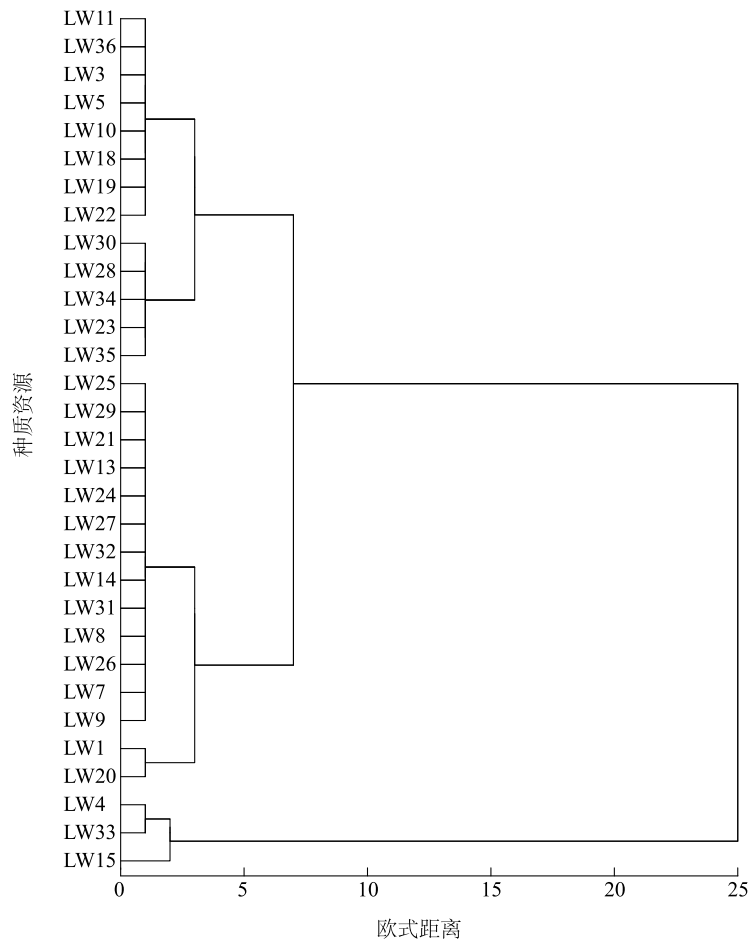
的关联度较小,花期较短。

表 6 狼尾草种质资源观赏性综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of ornamental value of *Pennisetum alopecuroides* germplasm resources

种质资源	关联度	排序	种质资源	关联度	排序
LW1	0.978	1	LW19	0.891	17
LW20	0.957	2	LW22	0.888	18
LW21	0.935	3	LW10	0.871	19
LW13	0.934	4	LW11	0.866	20
LW25	0.930	5	LW36	0.866	21
LW29	0.929	6	LW3	0.864	22
LW31	0.923	7	LW5	0.862	23
LW8	0.923	8	LW35	0.845	24
LW9	0.920	9	LW34	0.842	25
LW26	0.919	10	LW23	0.841	26
LW7	0.918	11	LW30	0.822	27
LW32	0.916	12	LW28	0.819	28
LW14	0.914	13	LW15	0.780	29
LW24	0.912	14	LW4	0.748	30
LW27	0.911	15	LW33	0.736	31
LW18	0.892	16			

LW1、LW3、LW4、LW5、LW7、LW8、LW9、LW10、LW11、LW13、LW14、LW15、LW18、LW19、LW20、LW21、LW22、LW23、LW24、LW25、LW26、LW27、LW28、LW29、LW30、LW31、LW32、LW33、LW34、LW35 和 LW36 见表 1。



LW1、LW3、LW4、LW5、LW7、LW8、LW9、LW10、LW11、LW13、LW14、LW15、LW18、LW19、LW20、LW21、LW22、LW23、LW24、LW25、LW26、LW27、LW28、LW29、LW30、LW31、LW32、LW33、LW34、LW35 和 LW36;31 份狼尾草种质资源编号见表 1。

图 1 狼尾草种质资源聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of *Pennisetum alopecuroides* germplasm resources

3 讨论与结论

狼尾草在中国分布广泛,能够在中低山、丘陵和平原等多种生境中生长,生境类型的多样性造就其形态学性状的多样性。本研究结果表明,31 份野生狼尾草种质资源的质量性状中,始花期变异系数最大(51.51%),其次为花色(23.53%)。数量性状中,叶长变异系数最大(20.46%),株高、花序长和宽度、叶宽的变异系数较小。王丽宏等^[18]对华北地区 65 份狼尾草野生种质资源进行评价,结果表明花序数的变异系数最大,其次为冠幅、叶长、抽穗后株高、花序长、抽穗前株高和叶宽,所有性状的变异系数均大于 10%。变异系数的大小可直观反映性状的分化程度,变异系数大于 10% 的性状变异程度较高^[19-21]。本研究中,狼尾草各性状变异系数为

10.16%~51.51%,表明采集到的狼尾草种质资源具有丰富的性状变异。

香农-维纳多样性指数(Shannon-Wiener)是种质资源多样性分析中常用的指标,被广泛应用于植物表型性状多样性评价^[22-23]。多样性指数大于 1 表示多样性程度较高^[21,24-25]。本研究中,31 份狼尾草种质资源的 11 个性状多样性指数为 1.03~1.46,均大于 1。数量性状中,株高的多样性指数最高(1.46),其次为叶宽(1.45)和花序长(1.41)。质量性状中,花序形态的多样性指数最高(1.37),其次是始花期(1.35),其余质量性状的多样性指数均小于数量性状的多样性指数。王丽宏等^[17]发现,华北地区野生狼尾草抽穗前株高、抽穗后株高、叶长、叶宽、花序长、花序数、冠幅这 7 个数量性状的多样性指数为 1.32~1.44,而株型、花序色泽、芒色和抗倒

伏性这 4 个质量性状多样性指数较低 (0.50~1.30), 与本研究结果一致。在观赏桃 (*Prunus persica* (L.) Batsch)^[20]、观赏芍药 (*Paeonia lactiflora* Pall.)^[21]、甜瓜 (*Cucumis melo* L.)^[26] 中, 也存在数量性状的多样性指数普遍高于质量性状的现象。数量性状的变异可能与资源采集地环境、种植当年气候、田间管理水平、基因型等多种因素有关。而质量性状不易受外界环境影响, 遗传较为稳定。本研究中, 变异系数排名前 3 的性状为始花期、花序色泽和叶长, 其多样性指数分别排名第 6、第 8 和第 5。变异系数反映了变异的离散程度, 而多样性指数反映了变异分布的均匀度。在石榴 (*Punica granatum* L.)^[27]、酢浆草 (*Oxalis* L.)^[28]、结缕草 (*Zoysia Willd.*)^[29]、睡莲 (*Nymphaea* L.)^[25,30]、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.)^[31] 和石斛 (*Dendrobium* Sw.)^[32] 中, 性状的变异系数与多样性指数并非呈正相关, 部分性状的变异系数越大, 多样性指数越低。

邓聚龙^[33] 创立的灰色关联度分析法主要用于分析供试种质资源与理想品种的相近程度, 该方法在饲草^[34-35]、观赏植物资源^[36-37] 评价中被广泛应用。与理想品种的关联度越大, 表明种质资源观赏价值越高。本研究中, 与理想品种的关联度大于 0.900 以上的种质资源有 15 个, 其中 LW1 与理想品种的关联度最高, 为 0.978。其次为 LW20, 与理想品种的关联度为 0.957; LW15、LW4 和 LW33 与理想品种的关联度小于 0.800, 观赏价值较差。聚类分析对综合评价和合理利用种质资源等有着重要参考价值^[38-42]。本研究发现, 31 份狼尾草种质资源在欧氏距离 1.2 处可分为 3 类, 第 1 类种质资源的特点为抽穗开花早、花序细长或粗壮、花序数量多、花序形态美观且花序色泽鲜艳; 第 2 类种质资源的特点为植株高大、叶片宽且长、花序较长且粗; 第 3 类种质资源的特点为抽穗开花晚、植株低矮、叶片短小。针对不同种质资源的特点, 可根据育种目标进行亲本选择。例如, LW1、LW20 和 LW21 抽穗早、花序色泽鲜艳, 可作为培育观赏性狼尾草的亲本; LW3、LW13、LW14、LW18 叶片宽且长、植株高大, 可作为培育饲用狼尾草的亲本。LW15 与理想品种的关联度较低, 该种质资源抽穗晚, 但花序细长飘逸, 可在植物造景中与花期较早的狼尾草品种相互配置, 丰富景观层次。综合而言, LW1、LW20、LW21、LW13、LW25 和 LW29 性状优良, 可作为亲本用于观

赏性狼尾草新品种的选育。

截至目前, 中国已审定通过 24 个狼尾草属品种, 其中 17 个狼尾草属品种选育自国外狼尾草种质资源, 仅 7 个狼尾草属品种选育自中国本土狼尾草种质资源, 分别为农业农村部审定的陵山狼尾草, 国家林业和草原局审定的紫光和丽秋, 北京市园林绿化局审定的长穗、矮株、雪绒和丽人^[43-44]。中国本土狼尾草种质资源表型性状丰富, 分布广泛且适应能力强。本研究为中国本土狼尾草种质资源在观赏、生态、饲用等方面的开发利用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 刘宗华, 罗 弦, 张安才, 等. 观赏草的研究与应用[J]. 安徽农业科学, 2008(2): 9958-9960.
- [2] WOLFE J, ZAJICEK J M. Are ornamental grasses acceptable alternatives for low maintenance landscapes? [J]. Journal of Environmental Horticulture, 1998, 16(1): 8-11.
- [3] 武菊英, 滕文军, 王庆海. 狼尾草的生物学特性及在园林中的应用[J]. 中国园林, 2005(12): 57-59.
- [4] 闫辉群. 北京常见观赏草及其在园林中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [5] 杨云峰, 孙中腾, 王良桂. 观赏草在上海城市绿地中的应用调查研究[J]. 中国园林, 2019, 35(9): 115-119.
- [6] 汤慧敏, 李金泽, 郭陈钦, 等. 广州城市公园绿地中观赏草应用调查研究[J]. 南方农业, 2020, 14(34): 37-41.
- [7] 朱桥明, 沈荔荔, 蒲婧婷. 广州市花境节约型植物应用调查与评价研究[J]. 广东园林, 2019(4): 61-64.
- [8] 刘万辉, 杨和平, 熊 琦. 华南低维护花境植物初步调研及建议[J]. 热带农业科技, 2020, 43(1): 40-43.
- [9] 李晓芹, 银 征, 杨金财, 等. 23 种观赏草在南京地区的适应性分析[J]. 江西农业学报, 2022, 34(4): 192-198.
- [10] 鄧亚微, 韩 玮. 成都市绿地中观赏草资源调查及综合评价[J]. 南方农业, 2020, 14(12): 44-47.
- [11] 李达旭, 吴 龢, 鄧家俊, 等. 19 种多年生观赏草在成都地区的引种适应性研究[J]. 草学, 2019(1): 23-32.
- [12] 张晓燕, 左小平, 赵世霞, 等. 20 种观赏草在甘肃金昌地区的适应性[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(5): 72-77.
- [13] 李芝玉. 观赏草研究概况及其在太原市滨河两路的应用[J]. 山西林业, 2021(2): 42-43.
- [14] 吴菊英, 滕文军, 袁小环, 等. 几种狼尾草属观赏植物在北京地区的生长特性[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(6): 661-666.
- [15] 全国畜牧总站. GB/T 30395-2013 草品种审定技术规程[M]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [16] 田 宏, 张鹤山, 熊军波, 等. 34 份狼尾草萌芽期抗旱性综合评价[J]. 中国草地学报, 2024, 46(4): 11-24.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 陆彭城,郑 燕,周小琴,等. 45个莲瓣兰品种的表型多样性研究[J]. 热带作物学报,2021,42(9):2518-2525.
- [20] 张斌斌,蔡志翔,沈志军,等. 观赏桃种质资源表型性状多样性评价[J]. 中国农业科学,2021,54(11):2406-2418.
- [21] 万映伶,朱梦婷,刘爱青,等. 中国观赏芍药表型多样性解析与资源评价[J]. 中国农业科学,2022,55(18):3629-3639.
- [22] UPADHYAYA H D, REDDY K N, GOWDA C L L, et al. Phenotypic diversity in the pigeonpea (*Cajanus cajan*) core collection [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*,2007,54(6):1167-1184.
- [23] PETRUCCCELLI R, GANINO T, CIACCHERI L, et al. Phenotypic diversity of traditional cherry accessions present in the Tuscan region[J]. *Scientia Horticulturae*,2013,150(2):334-347.
- [24] 董胜君,王若溪,张皓凯,等. 不同种源东北杏果实表型性状多样性分析[J]. 植物资源与环境学报,2020,29(6):42-50.
- [25] 苏 群,杨亚涵,田 敏,等. 49份睡莲资源表型多样性分析及综合评价[J]. 西南农业学报,2019,32(11):2670-2681.
- [26] SZAMOSI C, SOLMAZ I, SARI N, et al. Morphological evaluation and comparison of Hungarian and Turkish melon (*Cucumis melo* L.) germplasm[J]. *Scientia Horticulturae*,2010,124(2):170-182.
- [27] 火 艳,招雪晴,黄厚毅,等. 观赏石榴表型遗传多样性分析[J]. 浙江农林大学学报,2020,37(5):939-949.
- [28] 董 钠,李成儒,凌 瑞,等. 基于表型性状的酢浆草属种质遗传多样性分析[J]. 分子植物育种,2022,20(16):5506-5509.
- [29] 郑荣佳,孔维一,冯嘉欣,等. 结缕草属植物表型多样性分析及优异种质筛选[J]. 草地学报,2022,30(9):2325-2335.
- [30] 张海平. 部分睡莲属植物的形态多样性及同工酶分析[D]. 南京:南京农业大学,2008.
- [31] 范义昌,柴珊珊,张曼曼,等. 宁夏沙枣种质资源表型多样性分析[J]. 北方园艺,2018,23(12):37-43.
- [32] 贺漫媚,代色平,陈秀萍,等. 17种石斛属植物表型性状多样性分析[J]. 植物资源与环境学报,2024,33(2):71-79.
- [33] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. 世界科学,1983(7):1-5.
- [34] 李鸿雁,李悦焯,李 俊,等. 内蒙古143份冰草属种质资源表型多样性分析与综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2024,25(8):1254-1267.
- [35] 周 瑜,李泽碧,黄 娟,等. 高粱种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2021,22(3):654-664.
- [36] 刘胜男. 观赏海棠表型多样性分析与评价[D]. 郑州:河南农业大学,2022.
- [37] 李祖婵,庄长伟,玄 锦,等. 广东省自然保护区野生观赏草开发应用评价[J]. 草业科学,2023,40(1):258-270.
- [38] 谢雪果,彭晓云,李云驹,等. 115份设施番茄表型性状遗传多样性分析[J]. 江苏农业学报,2024,40(8):1361-1370.
- [39] 李清超,陈小翠,刘朝峰,等. 辣椒种质资源表型性状多样性分析及综合评价[J]. 江苏农业科学,2024,52(14):141-148.
- [40] 陈芷涵,尚 鑫,谢 滢,等. 铁杉属花粉形态及其聚类分析研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(4):37-45.
- [41] 王琳琳,钟洋敏,缪叶旻子,等. 基于主成分和聚类分析的鲜食蚕豆农艺与品质性状综合评价[J]. 江苏农业学报,2023,39(3):788-797.
- [42] 王雪洁,周 鹏,侯思璇,等. 冬青种质资源叶表型多样性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(5):90-96.
- [43] 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.
- [44] 农业农村部畜牧兽医局,全国畜牧总站. 中国审定登记草品种集(1987-2020)[M]. 北京:中国农业出版社,2022.

(责任编辑:成纾寒)