

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.024

引用格式:麻涛,李伶俐,侯向阳.基于多元分析的野生赖草种质资源评价[J].草地学报,2026,34(1):254–265

MA Tao, LI Ling-ling, HOU Xiang-yang. Multivariate Analysis-Based Evaluation of Wild *Leymus secalinus* Germplasm Resources[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):254–265

基于多元分析的野生赖草种质资源评价

麻涛^{1,2,3}, 李伶俐^{1,2,3}, 侯向阳^{1,2,3*}

(1. 山西农业大学草业学院, 山西 太谷 030801; 2. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 山西 太谷 030801; 3. 山西右玉黄土高原草地生态系统国家定位观测研究站, 山西 右玉 037200)

摘要:赖草(*Leymus secalinus*)在改善我国北方草原生态环境、高产草地建设、草地改良和草原畜牧业高质量发展等方面扮演着重要角色。本研究以70份野生赖草种质资源为试验材料,基于19个考察性状,采用主成分分析法、灰色关联度法和基于距离的逼近理想解排序法(Distance-based technique for order preference by similarity to ideal solution, DTOPSIS)进行了赖草种质资源遗传多样性的综合评价。结果表明:70份赖草种质资源19个考察性状指标的变异系数介于0.71%~97.20%之间,茎部性状的变异程度高于叶部,表型性状的变异程度高于品质性状;各性状指标间存在显著相关性,8个表型性状与纤维含量显著相关,株高、牧草产量与其相对饲喂价值极显著相关($P<0.01$);LS46和LS69在3种不同的综合评价方法中均表现较为优异。本研究可为培育丰产、优质的牧草提供种质材料基础。

关键词:赖草;主成分;灰色关联度;DTOPSIS

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0254-12

Multivariate Analysis-Based Evaluation of Wild *Leymus secalinus* Germplasm Resources

MA Tao^{1,2,3}, LI Ling-ling^{1,2,3}, HOU Xiang-yang^{1,2,3*}

(1. College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi Province 030801, China; 2. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Taigu, Shanxi Province 030801, China; 3. Youyu Loess Plateau Grassland Ecosystem National Research Station, Youyu, Shanxi Province 037200, China)

Abstract: *Leymus secalinus* plays an important role in improving the ecological environment of the grassland in northern China, the construction of high-yield grassland, the improvement of grassland and the high-quality development of grassland animal husbandry. In this study, 70 wild *L. secalinus* germplasm resources were used as experimental materials. Based on 19 traits, the principal component analysis (PCA) method, the grey correlation analysis (GCA) method and the distance-based technique for order preference by similarity to ideal solution (DTOPSIS) method were used to comprehensively evaluate the genetic diversity of the germplasm resources of *L. secalinus*. The results showed that the coefficient of variation of 19 trait indexes of 70 *L. secalinus* germplasm resources ranged from 0.71% to 97.20%, and the variation degree of stem traits was higher than that of leaves, and the variation degree of phenotypic traits was higher than that of quality traits. There was a significant correlation between the indexes of each trait, and eight phenotypic traits were significantly correlated with fiber content, and plant height and forage yield were significantly correlated with RFV ($P<0.01$). LS46 and LS69 performed well in all three different comprehensive evaluation methods. They can provide germplasm material basis for cultivating high-yield and high-quality forage.

Key words: *Leymus secalinus*; Principal component analysis; Grey correlation analysis; DTOPSIS

收稿日期:2024-12-15;修回日期:2025-03-05

基金项目:山西省重点研发计划“山西省乡土草抗逆资源基因挖掘及育种”(202102140601006)资助

作者简介:麻涛(1999-),男,汉族,山西大同人,硕士,主要从事草地生态管理研究, E-mail: MT_16634253408@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: Houxy16@vip.126.com

中国是世界上草地资源最丰富的国家之一,草地面积位居全球第二位^[1]。然而近年来,在过度放牧、富营养化、土地利用方式改变(转为林业和农业用地)、土地撂荒,以及极端气候事件频发和火灾制度变化等多重自然和人为因素的综合影响下,我国草地生态系统出现了严重退化现象^[2]。这种退化在区域尺度上主要表现为:植被覆盖度显著降低、优质牧草比例下降、草地生产力持续衰退^[3]。更为严峻的是,草地退化导致的饲草供给不足与畜牧业发展需求之间的矛盾日益突出,现有饲草资源无论在数量还是质量上都难以满足现代草食畜牧业的发展需求,这一问题已成为我国草畜牧业可持续发展的关键瓶颈^[4]。在此背景下,加强草原生态修复与科学管理显得尤为迫切。当前,制约草地生态修复成效的核心问题在于缺乏兼具生态适应性和生产性能的优质牧草品种,这严重限制了退化草地的大规模生态修复进程。

赖草(*Leymus secalinus*)属禾本科(Poaceae)小麦族(Triticeae)赖草属(*Leymus* Hochst.),是一种根茎型旱中生禾草^[5]。在我国的新疆、甘肃、青海、陕西、四川、内蒙古、河北、山西、吉林、辽宁、黑龙江等省区,以及俄罗斯、朝鲜、日本都有分布^[6]。在山西赖草主要分布于晋北地区,凭借其强壮的根茎迅速繁衍,已成为当地的优势种群。赖草生境类型丰富多样,在盐碱滩地、沙土草原以及荒漠化草原下都能正常生长,表现出较强的生态适应性和抗逆能力^[7]。此外,赖草中粗蛋白、粗纤维、矿物质含量丰富,是一种饲用价值较高的优质牧草。赖草是小麦和大麦的近缘种植物,异花授粉并具有JX染色体组的特性,可以作为育种的原始材料或提取优异基因培育新品种,近些年来深受作物和牧草育种科学家们的重视。经过系统驯化与选育,赖草已在生态修复工程及盐碱地改良领域展现出显著的应用价值。目前,关于赖草的研究从形态组织结构^[8-10]、生理特性^[11-12]、抗旱性^[13-15]、种子耐盐性^[16-17]、分子^[18-19]等方面都有系列报道。樊鹏鹏^[20]对山西省8个不同居群野生赖草资源的生产性能和营养成分做了研究,评价和筛选出的2个居群综合表现良好。然而他只针对赖草种子繁殖性能及营养成分做了分析,选取了单一的模型。关于赖草资源挖掘利用,综合评价方面的研究报道目前较少,阻碍了赖草种质资源的有效保护和高效利用。

优良牧草评价方法和指标不尽相同,且表型、生理等性状大部分由多基因控制,受外部环境的影响较

大^[21]。因此,种质筛选的关键就在于全面有效地对种质资源进行评价。目前常用的综合评价方法包括主成分分析法、灰色关联度分析法和基于距离的逼近理想解排序法(Distance-based technique for order preference by similarity to ideal solution, DTOPSIS)。主成分分析法通过降维的思想,将多个复杂的、彼此间有相互联系的性状指标转化为几个相对独立的综合指标,科学评价综合性状。灰色关联法和DTOPSIS法均是通过计算参评种质资源与理想种质资源的接近度进行评价。目前,以上方法在苜蓿(*Medicago sativa* L.)^[22]、燕麦(*Avena sativa*)^[23]、黑麦草(*Lolium perenne*)^[24]、冰草(*Agropyron cristatum*)^[25]等作物种质资源的综合性能评价都有所应用。然而,以往在进行综合评价时,研究者常常选取单一的评价模型,导致评价的结果存在很大争议^[26]。利用多种综合评价方法的联合应用分析,能进一步提高资源综合评价的准确性^[27]。为此,本研究采用主成分分析法、灰色关联度法和DTOPSIS法3种分析方法,针对70份野生赖草种质的19个性状,综合分析表型性状及营养价值,对赖草进行更为真实、科学的评价,筛选优良的赖草种质资源,以期今后赖草的深入挖掘及优良种质的选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于山西右玉黄土高原草地生态系统国家定位观测研究站(39°58′48″N, 112°19′12″E, 海拔1334.4 m)。年平均气温4.6℃,年平均降水量425 mm,年平均蒸发量1000~1500 mm,属于温带大陆性季风气候。该区域土壤质地为砂质土,土壤类型主要为栗钙土,土壤有机碳、总氮和总磷含量分别为5.43, 0.80, 0.39 mg·g⁻¹,土壤pH值介于9~10之间,盐分含量为1.44~3.99 mg·g⁻¹,属于中度盐渍化草地^[28]。

1.2 试验材料

本试验所用的70份赖草种质资源为近几年在我国山西境内的不同地区采集,统一保存在山西右玉黄土高原草地生态系统国家定位观测研究站羊草、赖草根茎植物试验平台种质资源圃中,编号LS1-LS73(其中LS19, LS57, LS60未存活,因此本研究仅提供了来自70个种质样本的数据),资源信息见表1。

表 1 供试赖草材料的原始生境坐标点
Table 1 The site of the original habitat of *Leymus secalinus*

编号 Number	来源地 Origin	地理坐标 Geographic coordinates	编号 Number	来源地 Origin	地理坐标 Geographic coordinates
LS1	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	111°38'E, 38°9'N	LS37	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°28'E, 39°28'N
LS2	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°57'E, 38°36'N	LS38	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	112°43'E, 37°35'N
LS3	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	113°22'E, 37°4'N	LS39	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	111°33'E, 36°51'N
LS4	山西临汾 Linfen, Shanxi, China	110°36'E, 36°11'N	LS40	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	113°14'E, 38°40'N
LS5	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	113°40'E, 37°22'N	LS41	山西大同 Datong, Shanxi, China	113°27'E, 39°35'N
LS6	山西临汾 Linfen, Shanxi, China	110°42'E, 36°0'N	LS42	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	113°27'E, 38°44'N
LS7	山西临汾 Linfen, Shanxi, China	110°46'E, 36°53'N	LS43	山西临汾 Linfen, Shanxi, China	110°42'E, 36°50'N
LS8	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	110°36'E, 38°9'N	LS44	山西朔州 Shuozhou, Shanxi, China	111°57'E, 39°32'N
LS9	山西临汾 Linfen, Shanxi, China	110°55'E, 36°40'N	LS45	山西大同 Datong, Shanxi, China	113°53'E, 39°27'N
LS10	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	110°56'E, 37°12'N	LS46	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	110°58'E, 37°50'N
LS11	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	110°53'E, 38°16'N	LS47	山西运城 Yuncheng, Shanxi, China	110°53'E, 35°00'N
LS12	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°27'E, 38°40'N	LS48	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	113°8'E, 37°54'N
LS13	山西太原 Taiyuan, Shanxi, China	111°52'E, 38°7'N	LS49	山西临汾 Linfen, Shanxi, China	113°8'E, 36°17'N
LS14	山西临汾 Linfen, Shanxi, China	110°56'E, 35°57'N	LS50	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°57'E, 38°36'N
LS15	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	111°29'E, 37°48'N	LS51	山西太原 Taiyuan, Shanxi, China	112°39'E, 38°4'N
LS16	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	112°21'E, 39°2'N	LS52	山西朔州 Shuozhou, Shanxi, China	112°50'E, 39°30'N
LS17	山西长治 Changzhi, Shanxi, China	113°15'E, 36°54'N	LS53	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°31'E, 38°41'N
LS18	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	111°11'E, 37°8'N	LS54	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	112°21'E, 37°20'N
LS20	山西朔州 Shuozhou, Shanxi, China	112°19'E, 39°59'N	LS55	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	112°5'E, 39°4'N
LS21	山西长治 Changzhi, Shanxi, China	112°53'E, 36°49'N	LS56	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	112°21'E, 39°2'N
LS22	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	112°54'E, 39°4'N	LS58	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	113°34'E, 39°16'N
LS23	山西阳泉 Yangquan, Shanxi, China	113°33'E, 38°7'N	LS59	山西太原 Taiyuan, Shanxi, China	112°29'E, 38°1'N
LS24	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	112°47'E, 37°15'N	LS61	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°29'E, 39°4'N
LS25	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	110°59'E, 38°20'N	LS62	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	113°12'E, 39°9'N
LS26	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	113°13'E, 39°8'N	LS63	内蒙古 Inner Mongolia, China	113°29'E, 40°39'N
LS27	山西大同 Datong, Shanxi, China	113°47'E, 40°24'N	LS64	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°37'E, 39°7'N
LS28	山西朔州 Shuozhou, Shanxi, China	112°19'E, 39°31'N	LS65	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	111°28'E, 39°28'N
LS29	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	111°2'E, 38°28'N	LS66	山西朔州 Shuozhou, Shanxi, China	112°19'E, 39°32'N
LS30	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	112°57'E, 38°30'N	LS67	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	111°46'E, 37°11'N
LS31	山西大同 Datong, Shanxi, China	114°8'E, 40°25'N	LS68	山西大同 Datong, Shanxi, China	114°13'E, 39°11'N
LS32	山西阳泉 Yangquan, Shanxi, China	113°33'E, 38°6'N	LS69	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	110°38'E, 38°8'N
LS33	山西大同 Datong, Shanxi, China	114°15'E, 39°24'N	LS70	山西太原 Taiyuan, Shanxi, China	112°4'E, 37°49'N
LS34	山西大同 Datong, Shanxi, China	113°37'E, 39°56'N	LS71	山西太原 Taiyuan, Shanxi, China	112°24'E, 37°35'N
LS35	山西晋中 Jinzhong, Shanxi, China	111°56'E, 37°0'N	LS72	山西吕梁 Lvliang, Shanxi, China	110°49'E, 38°10'N
LS36	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	112°13'E, 39°5'N	LS73	山西忻州 Xinzhou, Shanxi, China	112°5'E, 39°4'N

1.3 试验方法

将采集回的赖草种质资源移栽于根茎植物试验平台资源圃的试验小区内,定植株行距 1 m×1 m。为避免赖草地下根茎相互串联影响种质纯度,各小区之间用高为 60 cm 的水泥预制板进行地下根茎隔离。初期采用人工除草方式,滴溉,无施肥。2023 年 7 月待材料开花期后,采取随机取样的方法,样本选择具有本种群特征大小适中、无病虫危害、未折断或无折痕的完整植株 20 株。试验数据采集质量要求参考《羊草种质资源描述规范和数据标准》^[29],记录了包括单株叶片数、叶长、叶宽、叶重、茎长、茎粗、茎重、茎节数、叶绿素含量(Soil and plant analyzer development, SPAD)、株高、鲜草产量、干草产

量、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗蛋白、粗灰分、干物质、粗脂肪、相对饲喂价值合计共 19 项性状数据。

1.4 性状测验方法

1.4.1 牧草农艺性状分析 叶片数(Leaf number, LN):整株的叶片数量,单位为“片”。

叶长(Leaf length, LL):取自茎基端起第三片叶测量叶长,单位为 cm。

叶宽(Leaf width, LW):取测量叶长的叶片,测量其最宽处的宽度,单位为 cm。

叶重(Leaf mass, LM):整株所有叶片的重量,单位为 g。

茎长(Stem length, SL):取测量叶片数的植株,测量茎基端到茎尖的高度,单位为 cm。

茎粗(Stem diameter, SD):茎秆基端处的直径,单位为 mm。

茎重(Stem weight, SW):整株茎秆的重量,单位为 g。

节间数(Stem number, SN):整株的节间数量,单位为“节”。

叶绿素含量:采用手持式 SPAD-502 叶绿素含量测定仪,测量测定叶长叶片的叶绿素含量。

株高(Plant height, PH):测量茎基端到植株叶片竖直后顶端的绝对高度,单位为 cm。

鲜草产量(Green weight, GW):随机选取 1 m² 样方全部刈割,留茬高度 10~15 cm,采集样方内的新鲜草样,立即称重,单位为 g·m⁻²。

干草产量(Dry weight, DW):取称量鲜草产量的鲜草,置于 65℃ 烘箱烘干,直至恒重后称量,单位为 g·m⁻²。

1.4.2 牧草营养品质分析 牧草营养品质分析的具体方法参考杨胜《饲料分析和质量检测技术》^[30]。

粗蛋白(Crude protein, CP)含量采用凯氏定氮法测定。

粗脂肪(Ether extract, EE)含量采用索氏抽提法测定。

酸性洗涤纤维(Acid detergent fibre, ADF)和中性洗涤纤维(Neutral detergent fibre, NDF)含量采用范氏洗涤法测定。

粗灰分(Ash)含量采用灰化法测定。

干物质(Dry matter, DM)含量采用烘干法测定。

相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)的计算公式^[31]: $RFV = DMI(\%DM) \times DDM(\%DM) / 1.29$ 。

其中, $DMI(\%DM) = 120 / NDF(\%DM)$; $DDM(\%DM) = 88.9 - 0.779 \times ADF(\%DM)$ 。

1.5 综合评价方法

1.5.1 主成分分析法 使用 SPSS 22.0 软件对数据进行主成分分析,得到样品中各主成分分值 F_i ,以相应主成分贡献率为权重计算综合得分 F 值:

$$F = \sum_{j=1}^n F_i \lambda_i$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$, λ_i 为第 i 个主成分的方差贡献率占总提取方差贡献率的比重,即权重, F 值越大牧草的综合性能越好。

1.5.2 灰色关联度法 将 70 份赖草种质材料作为一个灰色系统,每份种质材料作为系统中的 1 个因素。将各性状的上限指标确定为参考数列(X_0),以各种质材料的性状指标为比较数列(X_i),利用以下公式分别计算出比较数列与参考数列的关联系数、权重系数、加权关联度,根据关联度大小评价赖草种质材料的优劣。

$$X_i'(k) = X_i(k) / X_0(k)$$

$$\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i'(k)|$$

关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\min \min_i \Delta_i(k) + \rho \max \max_i \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max \max_i \Delta_i(k)}$$

$$\text{等权关联度: } R_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

$$\text{权重系数: } \omega_i(k) = R_i / \sum R_i$$

$$\text{加权关联度: } \gamma_i' = \sum_{k=1}^n \omega_i(k) \xi_i(k)$$

式中: i 表示参评种质数, k 表示参评性状指标个数。 $\min_i \min_k \Delta_i(k)$ 为二级最小差; $\max_i \max_k \Delta_i(k)$ 为二级最大差; ρ 为分辨率系数,一般取 0.5。

1.5.3 DTOPSIS 法 DTOPSIS 综合评判法将各参试种质的多个性状指标通过计算归纳为一个具有可比性的量化综合指标,从而对种质做出综合评价^[32]。步骤如下:

(1) 构建评价矩阵。将性状指标进行无量纲化处理,得到标准化矩阵 Z_{ij} ; 正向指标: $Z_{ij} = Y_{ij} / Y_{j\max}$ 负向指标: $Z_{ij} = Y_{j\min} / Y_{ij}$ 。

式中: $Y_{j\max}$ 为第 j 个性状最大值; $Y_{j\min}$ 为第 j 个性状最小值。

(2) 用各性状的权重值 ω_i 乘以标准化矩阵 Z_{ij} 得到决策矩阵 R_{ij} ; 计算各性状指标的正、负理想解。

$$\text{正理想解 } X_j^+ = \{\max R_{ij}\} = \{X_1^+, X_2^+, X_n^+\}$$

$$\text{负理想解 } X_j^- = \{\min R_{ij}\} = \{X_1^-, X_2^-, X_n^-\}$$

(3) 相对近似度计算 根据欧几里得范数,计算各种质性状与正、负理想解的距离,得到不同种质的相对近似值 C_i 。根据 C_i 值排序, C_i 值越大综合性状表现越优异。

$$\text{正理想距离 } S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (R_{ij} - X_j^+)^2}$$

$$\text{负理想距离 } S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (R_{ij} - X_j^-)^2}$$

$$\text{相对近似值 } C_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)$$

1.6 数据处理及统计分析

使用 Microsoft Excel 2022 软件整理数据,计算相关性状指标。利用 SPSS 22.0 软件对 19 个性状指标数据进行描述统计,统计最小值、最大值、极值、平均值、标准偏差(Standard deviation, SD)。计算各性状的变异系数(Coefficient of variation, CV),计算公式为 $CV=SD/\text{平均值}$ 。

利用 SPSS 22.0 软件进行相关性分析和主成分分析;利用 Excel 2022 软件进行灰色关联度和 DTOPSIS 分析;运用 Origin 22.0 软件进行相关图表绘制。

2 结果与分析

2.1 主要性状分析

表 2 为 70 份赖草种质资源 19 个考察性状指标

的最小值、最大值、极值、平均值、标准差和变异系数。19 个考察性状指标的变异程度互不相同,变异范围为 0.71%~97.20%,平均为 25.19%,表明参数材料具有丰富的遗传变异,能够为优良品种选育提供遗传基础。19 个考察性状指标的变异系数从大到小依次为:茎节数>茎长>粗灰分>茎重>牧草产量>叶重>SPAD>叶片数>叶长>茎粗>叶宽>株高>粗脂肪>粗蛋白>酸性洗涤纤维>中性洗涤纤维>相对饲喂价值>干物质含量。其中,表型性状中,茎节数的变异系数较高,为 97.20%,株高的变异系数较小,为 11.24%,茎部性状的变异程度高于叶部。品质性状中,粗灰分的变异系数最高,为 42.25%,干物质含量的变异系数最小,为 0.71%。总体上看,赖草形态指标的变异程度高于营养特征的变异程度。

表 2 70 份赖草种质的主要性状差异分析

Table 2 Differences in the main traits of 70 germplasm materials of *Leymus secalinus*

性状 Trait	单位 Unit	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
叶片数 LN	—	4.05	9.95	5.90	6.22	1.62	26.11%
叶长 LL	cm	31.02	75.36	44.34	53.34	13.64	25.58%
叶宽 LW	cm	0.71	1.27	0.56	1.01	0.12	11.40%
叶重 LM	g	1.91	8.46	6.55	4.37	1.31	29.97%
茎长 SL	cm	22.95	105.85	82.90	56.81	24.20	42.59%
茎粗 SD	mm	2.35	4.90	2.55	3.44	0.64	18.47%
茎重 SW	g	1.26	10.76	9.50	4.17	1.71	41.06%
茎节数 SN	—	0.00	7.20	7.20	2.58	2.51	97.20%
SPAD	—	9.79	31.25	21.46	18.71	5.45	29.15%
株高 PH	cm	89.04	148.68	59.64	115.94	13.03	11.24%
鲜草产量 GW	$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	1953.20	9663.20	7710.00	4949.25	1559.84	31.52%
干草产量 DW	$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	847.30	4056.50	3209.20	1893.19	620.88	32.80%
中性洗涤纤维 NDF	%	65.98	86.70	20.72	75.38	4.61	6.12%
酸性洗涤纤维 ADF	%	42.73	57.22	14.49	51.25	3.20	6.25%
粗蛋白 CP	%	16.65	29.72	13.07	20.56	2.14	10.41%
粗灰分 Ash	%	4.88	22.92	18.04	10.31	4.35	42.25%
干物质 DM	%	92.84	96.13	3.29	94.57	0.67	0.71%
粗脂肪 EE	%	6.15	10.60	4.45	8.00	0.86	10.72%
相对饲喂价值 RFV	—	53.07	69.38	16.31	60.55	3.03	5.01%

2.2 相关性分析

将 19 个考察性状指标进行相关性分析。结果(图 1)表明,多组性状之间存在显著相关性。在表型性状间,叶片数与叶长、叶重、茎粗、SPAD 极显著负相关($P<0.01$),与茎长、茎重、茎节数极显著正相关($P<0.01$);叶长与茎长、茎重、茎节数极显著负相关($P<0.01$),与叶重、茎粗、SPAD 极显著正相关($P<0.01$);叶宽与叶重、茎粗、茎重、SPAD 均极显著正相关($P<0.01$);叶重与茎长、茎节数极显著负相关($P<0.01$),与茎粗和 SPAD 极显著正相

关($P<0.01$);茎长与茎粗、SPAD 极显著负相关($P<0.01$),与茎重、茎节数、株高极显著正相关($P<0.01$);茎粗与茎节数极显著负相关($P<0.01$),与 SPAD 极显著正相关($P<0.01$);茎重与 SPAD 显著负相关($P<0.05$),与茎节数和株高极显著正相关($P<0.01$);茎节数与株高显著正相关($P<0.05$),与 SPAD 极显著负相关($P<0.01$);牧草产量与株高、茎长显著正相关($P<0.05$)。

品质性状中,相对饲喂价值与纤维含量、干物质含量显著负相关($P<0.01$),与粗脂肪含量极显著正

相关($P<0.01$);粗脂肪与粗蛋白含量极显著正相关($P<0.01$),与中性洗涤纤维和干物质含量极显著负相关($P<0.01$)。在表型性状与品质性状的关系中,

8个表型性状与纤维含量表现出显著的相关性;株高、牧草产量与相对饲喂价值显著正相关($P<0.05$),与干物质含量显著负相关($P<0.05$)。

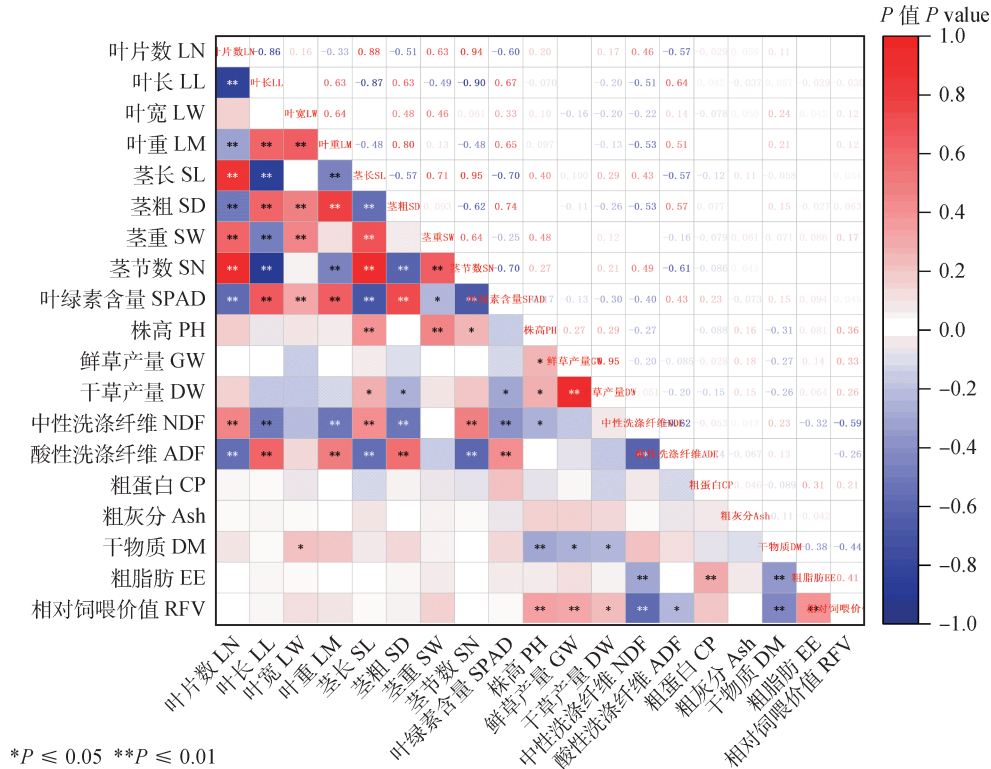


图1 赖草种质资源主要性状的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of the main traits of *Leymus secalinus* germplasm resources

2.3 综合评价

2.3.1 基于主成分分析法的综合评价 对考察性状指标进行主成分提取,可更清楚地显示各性状在多样性构成中的作用。经Bartlett球度检验和KMO检验,研究数据适合做因子分析(KMO=0.660, Bartlett球度检验的 $P<0.001$)。从赖草19个性状指标中提取了特征值大于1的5个主成分,特征值分别为6.383,3.045,2.586,1.687和1.092,分别解释了总方差的33.592%,16.029%,13.610%,8.880%,5.748%,累积方差解释率为77.859%(表3),解释了研究性状的大部分信息。另外,本次分析共提取出5个主成分,它们对应的加权后方差解释率即权重依次为:33.592/77.859=43.14%;16.029/77.859=20.59%;13.610/77.859=17.48%;8.880/77.859=11.40%;5.748/77.859=7.38%。

由载荷矩阵中每个特征的载荷值(表3)可知,PC1包含了大部分性状的特征向量,最大的贡献来自叶片数、叶长、叶重、茎长、茎粗、茎重、茎节数、SPAD、纤维含量;PC2最大的贡献来自茎重、株高、

牧草产量、中性洗涤纤维、干物质、粗脂肪和相对饲喂价值;PC3最大的贡献来自叶宽、叶重、茎粗、茎重、牧草产量、干物质;PC4最大的贡献来自牧草产量和粗蛋白;PC5最大的贡献来自粗蛋白。5个主成分所反映的性状存在差异,这些性状是决定赖草种质特征和差异的重要指标。根据主成分数学模型,主成分特征向量是初始因子载荷矩阵除以特征值的平方根^[33],得出5个主成分与19个性状指标的线性表达关系式:

$$F_1 = 0.341X_1 - 0.364X_2 - 0.076X_3 - 0.271X_4 + 0.368X_5 - 0.308X_6 + 0.181X_7 + 0.371X_8 + 0.322X_9 + 0.086X_{10} + 0.050X_{11} + 0.131X_{12} + 0.235X_{13} - 0.285X_{14} - 0.040X_{15} + 0.035X_{16} - 0.040X_{17} - 0.006X_{18} + 0.005X_{19};$$

$$F_2 = 0.038X_1 + 0.014X_2 + 0.168X_3 + 0.2X_4 + 0.102X_5 + 0.132X_6 + 0.26X_7 + 0.044X_8 + 0.032X_9 + 0.376X_{10} + 0.347X_{11} + 0.306X_{12} - 0.369X_{13} + 0.025X_{14} + 0.043X_{15} + 0.104X_{16} - 0.269X_{17} + 0.262X_{18} + 0.430X_{19};$$

$$F_3 = 0.239X_1 - 0.084X_2 + 0.49X_3 + 0.305X_4 + 0.149X_5 + 0.258X_6 + 0.416X_7 + 0.175X_8 + 0.110X_9 +$$

表 3 赖草种质主要性状的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of the main traits of *Leymus secalinus* germplasm resources

性状 Trait	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
叶片数 LN	0.860	0.067	0.384	-0.055	0.115
叶长 LL	- 0.919	0.024	-0.136	0.133	-0.033
叶宽 LW	-0.193	0.294	0.788	-0.022	0.162
叶重 LM	- 0.685	0.349	0.491	0.138	0.182
茎长 SL	0.929	0.177	0.240	0.026	-0.078
茎粗 SD	- 0.777	0.230	0.416	0.042	0.095
茎重 SW	0.457	0.455	0.668	0.022	-0.065
茎节数 SN	0.938	0.077	0.282	-0.058	-0.025
SPAD	- 0.813	0.056	0.177	-0.157	0.269
株高 PH	0.218	0.657	0.120	0.166	-0.354
鲜草产量 GW	0.127	0.605	- 0.466	0.446	0.369
干草产量 DW	0.330	0.534	- 0.430	0.500	0.296
中性洗涤纤维 NDF	0.594	- 0.644	0.023	0.075	0.284
酸性洗涤纤维 ADF	- 0.721	0.043	0.125	0.259	-0.365
粗蛋白 CP	-0.100	0.076	-0.119	- 0.664	0.459
粗灰分 Ash	0.088	0.182	-0.019	0.291	0.250
干物质 DM	-0.102	- 0.470	0.516	0.248	0.300
粗脂肪 EE	-0.015	0.458	-0.174	-0.583	-0.019
相对饲喂价值 RFV	0.012	0.751	-0.162	-0.374	0.012
特征值 Eigenvalue	6.383	3.045	2.586	1.687	1.092
贡献率 Contribution rate/%	33.592	16.029	13.610	8.880	5.748
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	33.592	49.621	63.231	72.111	77.859

注:粗体数字表示此主成分的分值相对较高

Note: A bold number indicates that the score is relatively high in this principal component

$0.075X_{10}-0.290X_{11}-0.268X_{12}+0.014X_{13}+0.078X_{14}-$
 $0.074X_{15}-0.012X_{16}+0.321X_{17}-0.108X_{18}-0.101X_{19};$

$F_4=-0.043X_1+0.102X_2-0.017X_3+0.106X_4+$
 $0.02X_5+0.032X_6+0.017X_7-0.045X_8-0.121X_9+$
 $0.128X_{10}+0.343X_{11}+0.385X_{12}+0.058X_{13}+0.200X_{14}-$
 $0.511X_{15}+0.224X_{16}+0.191X_{17}-0.449X_{18}-0.288X_{19};$

$F_5=0.110X_1-0.031X_2+0.155X_3+0.174X_4-$
 $0.075X_5+0.091X_6-0.062X_7-0.024X_8+0.257X_9-$
 $0.339X_{10}+0.353X_{11}+0.283X_{12}+0.271X_{13}-0.349X_{14}+$
 $0.439X_{15}+0.240X_{16}+0.287X_{17}-0.018X_{18}+0.011X_{19}。$

在公式中, X_1-X_{19} 分别表示标准化的叶片数、叶长、叶宽、叶重、茎长、茎粗、茎重、茎节数、SPAD、株高、鲜草产量、干草产量、中性洗涤纤维含量、酸性洗涤纤维含量、粗蛋白含量、粗灰分含量、干物质含量、粗脂肪含量和相对饲喂价值。根据综合得分是方差解释率与成分得分乘积后累加计算得到, 针对当前数据的计算公式为: $F=(33.592F_1+16.029F_2+13.610F_3+8.880F_4+5.748F_5)/77.859$ 。即 $F=0.431F_1+0.206F_2+$

$0.175F_3+0.114F_4+0.074F_5$ 。以表 4 中综合排名值为标准评价种质综合性状, 得到排序前 5 位的种质分别为 LS69, LS46, LS6, LS25, LS71。

2.3.2 基于灰色关联度法的综合评价 依据灰色关联分析原则, 赖草种质的叶长、叶宽、酸性洗涤纤维含量、干物质含量与理想种质关联程度较大, 所占权重较高(表 5)。因此, 在筛选种质时应优先考虑叶片性状优良的材料。

根据表 6 中关联度值的大小评价种质综合性状, 得到排序前 5 位的种质分别为 LS49, LS72, LS46, LS69, LS5。

2.3.3 基于 DTOPSIS 法的综合评价 计算 19 个考察性状的正理想解和负理想解(表 7), 参考 DTOPSIS 法计算参试种质与理想种质的相对贴近度, 并按照相对贴近度大小进行排序。相对贴近度越大, 说明综合性状越好, 结果见表 8。排序前 5 位的种质分别为 LS46, LS49, LS59, LS69, LS5。

表 4 赖草种质资源综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of germplasm resources of *Leymus secalinus*

序号 Number	得分 Score	排名 Rank	序号 Number	得分 Rank	排名 Score	序号 Number	得分 Score	排名 Rank
LS69	73.26	1	LS29	55.25	25	LS55	40.56	49
LS46	72.52	2	LS54	53.61	26	LS36	40.12	50
LS6	71.96	3	LS72	53.38	27	LS51	40.02	51
LS25	71.83	4	LS33	53.26	28	LS31	39.97	52
LS71	69.21	5	LS10	52.24	29	LS23	39.94	53
LS39	69.16	6	LS5	51.79	30	LS45	39.91	54
LS47	68.50	7	LS24	51.57	31	LS16	39.83	55
LS59	68.41	8	LS62	51.54	32	LS11	39.48	56
LS61	67.44	9	LS30	50.00	33	LS13	39.17	57
LS73	65.08	10	LS50	48.81	34	LS41	39.08	58
LS68	63.24	11	LS64	47.41	35	LS15	38.13	59
LS35	63.14	12	LS4	46.63	36	LS34	37.70	60
LS26	63.07	13	LS8	45.78	37	LS56	37.54	61
LS38	62.65	14	LS28	45.14	38	LS42	37.42	62
LS14	62.38	15	LS2	44.04	39	LS32	36.97	63
LS70	61.64	16	LS37	43.57	40	LS20	36.78	64
LS7	61.05	17	LS17	42.81	41	LS58	36.72	65
LS9	60.43	18	LS65	42.48	42	LS63	35.35	66
LS21	59.62	19	LS44	42.41	43	LS67	35.03	67
LS43	58.94	20	LS3	41.59	44	LS53	34.51	68
LS40	58.10	21	LS1	41.46	45	LS22	33.58	69
LS48	57.82	22	LS12	41.00	46	LS66	30.68	70
LS49	57.59	23	LS52	40.78	47			
LS18	57.21	24	LS27	40.70	48			

表 5 赖草种质资源主要性状的关联度和权重

Table 5 The correlation degree and weight of the main traits of *Leymus secalinus* germplasm resources

性状 Trait	关联度 Correlation degree	权重 Weight
叶片数 LN	0.477	0.051
叶长 LL	0.555	0.059
叶宽 LW	0.546	0.059
叶重 LM	0.463	0.050
茎长 SL	0.500	0.054
茎粗 SD	0.499	0.053
茎重 SW	0.432	0.046
茎节数 SN	0.493	0.053
SPAD	0.496	0.053
株高 PH	0.503	0.054
鲜草产量 GW	0.467	0.050
干草产量 DW	0.440	0.047
中性洗涤纤维 NDF	0.506	0.054
酸性洗涤纤维 ADF	0.580	0.062
粗蛋白 CP	0.427	0.046
粗灰分 Ash	0.442	0.047
干物质 DM	0.536	0.057
粗脂肪 EE	0.478	0.051
相对饲喂价值 RFV	0.498	0.053

3 讨论

遗传多样性是生态多样性和物种多样性的基础,通过遗传多样性研究可掌握物种资源特性,为品种改良和选育提供重要理论支撑^[34]。变异系数是衡量物种遗传多样性大小的一个重要指数,变异系数大则分化程度高、物种多样性显著;变异系数小则相对稳定、一致性较高。本研究表明,70份赖草种质资源之间存在较大的差异且这种差异分布不均衡,19个性状的变异系数在0.71%~97.20%之间,表明种群之间具有较高的遗传基础。茎部形态变异程度高于叶部,形态特征的变异程度高于营养特征,这与毕盛楠等^[35]在研究兴安盟不同来源羊草种质遗传多样性的结果一致。表明种群间的差异主要体现在表型特征上,且以茎节数的变异最为显著。此外,本研究测定的赖草品质含量远远高于樊鹏鹏^[20]测定不同居群赖草的营养价值,这种差异可能由以下因素导致:首先,取样时期不同可能产生重要影响,赖草在开花前期的营养生长阶段迅速积累大量养分,而进入生殖生长期后,植株将储存的养分优先供给花器官和种子发育;其次,不同居群赖草对生长环境的适应性

表 6 基于灰色关联度法的赖草种质资源的综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of *Leymus secalinus* germplasm resources based on grey correlation method

编号 Number	关联度 Correlation degree	排名 Rank	编号 Number	关联度 Correlation degree	排名 Rank	编号 Number	关联度 Correlation degree	排名 Rank
LS49	0.580	1	LS51	0.510	25	LS35	0.469	49
LS72	0.572	2	LS8	0.509	26	LS62	0.469	50
LS46	0.564	3	LS9	0.508	27	LS43	0.469	51
LS69	0.558	4	LS38	0.508	28	LS37	0.466	52
LS5	0.549	5	LS41	0.507	29	LS54	0.465	53
LS2	0.548	6	LS47	0.505	30	LS34	0.464	54
LS55	0.543	7	LS63	0.504	31	LS36	0.463	55
LS6	0.542	8	LS40	0.503	32	LS7	0.462	56
LS65	0.539	9	LS30	0.503	33	LS67	0.461	57
LS73	0.532	10	LS17	0.502	34	LS27	0.461	58
LS59	0.532	11	LS4	0.501	35	LS33	0.460	59
LS39	0.526	12	LS48	0.490	36	LS66	0.460	60
LS70	0.522	13	LS28	0.490	37	LS21	0.457	61
LS29	0.521	14	LS15	0.490	38	LS52	0.457	62
LS56	0.521	15	LS16	0.489	39	LS10	0.455	63
LS71	0.518	16	LS13	0.489	40	LS31	0.451	64
LS68	0.518	17	LS45	0.485	41	LS20	0.450	65
LS64	0.517	18	LS14	0.485	42	LS11	0.447	66
LS42	0.516	19	LS18	0.479	43	LS22	0.438	67
LS3	0.514	20	LS12	0.477	44	LS23	0.436	68
LS25	0.514	21	LS44	0.476	45	LS24	0.434	69
LS1	0.513	22	LS53	0.476	46	LS32	0.431	70
LS50	0.513	23	LS26	0.473	47			
LS61	0.512	24	LS58	0.470	48			

表 7 赖草种质资源主要考察性状的正理想解和负理想解

Table 7 The germplasm resources of *Leymus secalinus* mainly investigated the positive and negative ideal solutions of traits

性状 Trait	正理想解 Positive ideal solution	负理想解 Negative ideal solution
叶片数 LN	0.261	0
叶长 LL	0.203	0
叶宽 LW	0.207	0
叶重 LM	0.280	0
茎长 SL	0.238	0
茎粗 SD	0.241	0
茎重 SW	0.336	0
茎节数 SN	0.239	0
SPAD	0.245	0
株高 PH	0.238	0
鲜草产量 GW	0.273	0
干草产量 DW	0.316	0
中性洗涤纤维 NDF	0.237	0
酸性洗涤纤维 ADF	0.191	0
粗蛋白 CP	0.351	0
粗灰分 Ash	0.311	0
干物质 DM	0.212	0
粗脂肪 EE	0.261	0
相对饲喂价值 RFV	0.242	0

差异也可能是造成营养价值变异的重要原因。

通过综合运用多种指标进行分析,能够克服由单一指标比较造成的优良品种筛选结果出现较大偏差的问题,保证筛选结果更加准确、客观^[36]。目前,利用多元统计学方法对作物的多个性状进行综合评价已经得到广泛应用^[37]。主成分分析通过降维的思想,将多个复杂且相互关联的性状指标转化为几个相对独立的综合指标,从而实现对综合性状的科学评价。本研究中,通过主成分分析,将原有的 19 个性状指标转换为 5 个新的、彼此独立的成分,这些成分的累计贡献率达 77.859%,解释了大部分的遗传信息。灰色关联度分析以赖草优良性状的上限指标作为参考序列,通过归一化处理和权重计算,将多个性状综合为单一评价指标。而 DTOPSIS 法则通过计算各材料与正、负理想解的距离,进一步降低主观因素影响,使评价结果更具客观性。综合三种方法的分析结果,最终筛选出 LS46 和 LS69 两份表现最优的种质材料,它们在 19 个关键性状上均接近理想值,可作为赖草品种改良的优质遗传资源。

表 8 基于 DTOPSIS 法的赖草种质资源的综合评价

Table 8 Comprehensive evaluation of *Leymus secalinus* germplasm resources based on DTOPSIS method

编号 Number	相对接近度 C_i	排名 Rank	编号 Number	相对接近度 C_i	排名 Rank	编号 Number	相对接近度 C_i	排名 Rank
LS46	0.531	1	LS68	0.43	25	LS42	0.379	49
LS49	0.522	2	LS47	0.429	26	LS43	0.378	50
LS59	0.515	3	LS61	0.425	27	LS34	0.376	51
LS69	0.512	4	LS51	0.421	28	LS35	0.376	52
LS5	0.504	5	LS30	0.421	29	LS58	0.374	53
LS72	0.501	6	LS14	0.418	30	LS54	0.373	54
LS6	0.501	7	LS13	0.415	31	LS44	0.37	55
LS29	0.487	8	LS3	0.415	32	LS27	0.365	56
LS25	0.481	9	LS56	0.415	33	LS52	0.358	57
LS40	0.472	10	LS18	0.407	34	LS36	0.347	58
LS50	0.471	11	LS16	0.407	35	LS62	0.346	59
LS71	0.47	12	LS17	0.406	36	LS37	0.345	60
LS2	0.466	13	LS41	0.404	37	LS11	0.344	61
LS73	0.464	14	LS45	0.403	38	LS31	0.343	62
LS39	0.462	15	LS28	0.403	39	LS10	0.34	63
LS65	0.461	16	LS7	0.402	40	LS20	0.34	64
LS8	0.447	17	LS63	0.4	41	LS67	0.336	65
LS55	0.447	18	LS53	0.395	42	LS66	0.325	66
LS4	0.446	19	LS26	0.393	43	LS22	0.317	67
LS9	0.445	20	LS48	0.389	44	LS24	0.309	68
LS38	0.443	21	LS12	0.389	45	LS23	0.303	69
LS70	0.441	22	LS33	0.384	46	LS32	0.289	70
LS64	0.436	23	LS21	0.381	47			
LS1	0.431	24	LS15	0.381	48			

以往的研究者在进行综合评价时,往往仅采用单一方法,导致筛选的结果存在较大争议。因此在实际中需要结合多种方法,综合分析生产性能及营养价值指标,对牧草进行更为真实、科学的综合评价。吴国江等^[38]综合运用主成分分析法、灰色关联度法和 DTOPSIS 法,从 176 份糯高粱(*Sorghum bicolor* L.)种质资源中筛选出 10 份综合性状优良的种质资源。孟杰等^[39]为筛选优质柴胡(*Bupleurum chinense* DC.)品种,提出了一种新的柴胡质量综合评价方法,采用 DTOPSIS 和灰色关联度法对 14 个样品的 12 个性状进行评估,两种方法得出了较为一致的结果。宋慧等^[40]则基于灰色关联度、DTOPSIS 及灰色局势决策法,筛选出适合华北夏谷区的谷子(*Setaria italica* L.)新品种。尽管研究对象不同,但这些研究在综合性状评价方法上具有一致性。

4 结论

本研究采用主成分分析、灰色关联度分析及 DTOPSIS 法对 70 份野生赖草种质资源进行综合评

价,LS46 和 LS69 在 3 种不同的方法中均展现出显著优势,可作为赖草品种改良的优良遗传资源。

参考文献

[1] 李通,崔丽珍,朱佳佩,等. 草地生态系统多功能性与可持续发展目标的实现[J]. 自然杂志,2021,43(2):149-156
LI T, CUI L Z, ZHU J P, et al. Multi-function of grassland ecosystem and realization of sustainable development goals [J]. Chinese Journal of Nature, 2021, 43(2):149-156

[2] BARDGETT R D, BULLOCK J M, LAVOREL S, et al. Combatting global grassland degradation[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(10):720-735

[3] 乌云嘎,乌兰图雅,张卫青,等. 基于 CiteSpace 的中国草地退化评价指标体系演进分析[J]. 中国草地学报, 2023, 45(5): 125-136
WU Y G, WU L T Y, ZHANG W Q, et al. Analysis of the evolution of the grassland degradation evaluation index system in China based on CiteSpace[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(5):125-136

[4] LIU N, GUO F H, LI B, et al. Comprehensive evaluation of ecological functional traits and screening of key indicators of *Leymus chinensis* germplasm resources from northern China and Mongolia[J]. Agronomy, 2023, 13(7):1880

[5] 杜利霞,董宽虎,乔志宏,等. NaCl胁迫对赖草幼苗生理特性

- 的影响[J]. 草原与草坪, 2013, 33(1): 1-4, 10
- DU L X, DONG K H, QIAO Z H, et al. Effect of NaCl stress on physiological characteristics of *Leymus secalinus* seedling [J]. Grassland and Turf, 2013, 33(1): 1-4, 10
- [6] 智丽, 滕中华. 中国赖草属植物的分类、分布的初步研究[J]. 植物研究, 2005, 25(1): 22-25
- ZHI L, TENG Z H. Classification and geographical distribution of *Leymus* in China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2005, 25(1): 22-25
- [7] 樊鹏鹏, 杜利霞, 霍亚迪, 等. 山西不同居群赖草生产性能及营养价值评价[J]. 草业科学, 2015, 32(8): 1303-1309
- FAN P P, DU L X, HUO Y D, et al. Production performance and nutrient contents evaluation of the different *Leymus secalinus* populations from Shanxi[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(8): 1303-1309
- [8] 蔡联炳, 张梅姐. 国产赖草属的叶表皮特征与组群划分[J]. 植物研究, 2005, 25(4): 400-405
- CAI L B, ZHANG M N. Leaf epidermal characteristics and classification of sections of *Leymus* from China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2005, 25(4): 400-405
- [9] 王六英, 赵金花. 赖草属(*Leymus* hochst.) 3种牧草营养器官耐旱结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(S1): 23-27
- WANG L Y, ZHAO J H. Studies on drought resistance characteristics in structures of vegetative organs in three *Leymus* species [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(S1): 23-27
- [10] 杨瑞武, 周永红, 郑有良, 等. 赖草属 11 个物种的形态学特征比较研究[J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(3): 196-200
- YANG R W, ZHOU Y H, ZHENG Y L, et al. Comparative study on morphological characters among 11 species in *Leymus* hochst[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2003, 21(3): 196-200
- [11] 杨瑞武, 魏秀华, 周永红, 等. 赖草属植物醇溶蛋白的遗传多态性[J]. 云南植物研究, 2004, 26(1): 103-110
- YANG R W, WEI X H, ZHOU Y H, et al. Genetic polymorphism of gliadin in *Leymus*[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2004, 26(1): 103-110
- [12] 乌仁其木格, 易津, 门中华, 等. 羊草发育过程中同工酶的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2001(S1): 36-40
- WUREN Q M G, YI J, MEN Z H, et al. Study on isozymes during the development of *Leymus chinensis*[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001(S1): 36-40
- [13] 易津, 谷安琳, 贾光宏, 等. 赖草属牧草幼苗耐旱性生理基础的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(S1): 47-50
- YI J, GU A L, JIA G H, et al. Study on physiological basis of drought tolerance of *Leymus* seedlings[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(S1): 47-50
- [14] 许冬梅, 王堃, 龙澍普. 宁夏中部干旱带沙质草地赖草和中亚白草的抗逆生理特性[J]. 中国草地学报, 2007, 29(2): 31-34
- XU D M, WANG K, LONG S P. Physiological characteristics of drought-resistant for *Leymus secalinus* and *Pennisetum centasiaticum* in sandy grassland of arid region in central Ningxia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(2): 31-34
- [15] 叶煜辉, 江明锋, 陈艳, 等. 赖草属植物的抗逆性研究进展与应用前景[J]. 生物学杂志, 2009, 26(4): 54-57, 26
- YE Y H, JIANG M F, CHEN Y, et al. Research progress of stress resistance mechanisms and application prospect of *Leymus* Hochst[J]. Journal of Biology, 2009, 26(4): 54-57, 26
- [16] 孙菊, 杨允菲. 盐胁迫对赖草种子萌发及其胚生长的影响[J]. 四川草原, 2006(3): 17-20
- SUN J, YANG Y F. Effect of salt stress on germination of seeds and embryo growth of *Leymus secalinus* [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2006(3): 17-20
- [17] 白玉娥, 易津, 谷安琳, 等. 八种根茎类禾草种子耐盐性研究[J]. 中国草地, 2005, 27(2): 55-59, 65
- BAI Y E, YI J, GU A L, et al. Studies on salt tolerance of seeds of 8 rhizomatous grasses [J]. Grassland of China, 2005, 27(2): 55-59, 65
- [18] 叶煜辉, 陈艳, 杨满业, 等. 赖草 Fe-SOD EST 序列的克隆及分析[J]. 四川畜牧兽医, 2009, 36(6): 29-31
- YE Y H, CHEN Y, YANG M Y, et al. Cloning and analysis of Fe-SOD EST sequence of *Leymus chinensis* [J]. Sichuan Animal & Veterinary Sciences, 2009, 36(6): 29-31
- [19] 史仁玖, 郝岗平, 赵茂林, 等. 多枝赖草 Glutathione Reductase 基因克隆及胁迫表达分析[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2008, 31(4): 471-475
- SHI R J, HAO G P, ZHAO M L, et al. Cloning and stress expression analysis of glutathione reductase gene in *Leymus multicaulis* [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2008, 31(4): 471-475
- [20] 樊鹏鹏. 山西不同居群赖草综合性状比较研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2015: 29-33
- FAN P P. Studied on comprehensive characteristics of different populations of *Leymus secalinus* in Shanxi [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2015: 29-33
- [21] 李祥栋, 潘虹, 陆秀娟, 等. 苜蓿种质的主要营养组分特征及综合评价[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 835-850
- LI X D, PAN H, LU X J, et al. Characteristics and comprehensive assessment of principal nutritional components in adlay landraces [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 835-850
- [22] 张晓娟, 陈彩锦, 张久盘, 等. 55 个紫花苜蓿品种农艺性状和产量性状分析及综合评价[J]. 草地学报, 2023, 31(11): 3453-3461
- ZHANG X J, CHEN C J, ZHANG J P, et al. Analysis and comprehensive evaluation of agronomic and yield traits of 55 alfalfa varieties [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11): 3453-3461
- [23] 耿小丽, 张榕, 张少平, 等. 130 份燕麦种质表型性状多样性分析及评价[J]. 草业科学, 2020, 37(10): 2022-2034
- GENG X L, ZHANG R, ZHANG S P, et al. Comprehensive evaluation of the phenotypic diversity of 130 oat germplasms [J]. Pratacultural Science, 2020, 37(10): 2022-2034
- [24] 杨浩. 灰色关联度分析在多花黑麦草品种综合评价中的运用[J]. 中国草食动物科学, 2013, 33(4): 42-44

- YANG H. Application of grey relational analysis in comprehensive evaluation of *Lolium multiflorum* varieties[J]. China Herbivore Science, 2013, 33(4): 42-44
- [25] 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
- LI H Y, LI Y X, LI J, et al. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of 143 *Agropyron* germplasm resources in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(8): 1254-1267
- [26] 彭艳, 马素洁, 孙晶远, 等. 西藏12份野生豆科牧草种质资源综合性状评价[J]. 草业科学, 2021, 38(12): 2429-2439
- PENG Y, MA S J, SUN J Y, et al. Comprehensive character evaluation of 12 wild legume forage germplasms in Tibet [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(12): 2429-2439
- [27] 高山, 闫程铭, 万畅, 等. 基于灰色关联度法和DTOPSIS法对羊草种质资源综合评价[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 599-609
- GAO S, YAN C M, WAN C, et al. Comprehensive evaluation of germplasm resources of *Leymus chinensis* based on grey correlation method and DTOPSIS method [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 599-609
- [28] 张琦, 郭琛文, 姚蒙蒙, 等. 放牧强度对半干旱草地优势植物赖草功能性状的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2108-2117
- ZHANG Q, GUO C W, YAO M M, et al. Effects of grazing intensities on functional traits of the dominant plant *Leymus secalinus* in semi-arid grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 2108-2117
- [29] 杨劼, 王伟, 赵利清. 羊草种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 15-22
- YANG J, WANG W, ZHAO L Q. Descriptions and data standards for Chinese wildrye [*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.] [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 15-22
- [30] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1993: 19-27
- YANG S. Feed analysis and quality test technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993: 19-27
- [31] 王建丽, 庄煦, 张冬梅, 等. 羊草品质性状遗传变异及主成分分析[J]. 饲料研究, 2024, 47(4): 116-120
- WANG J L, ZHUANG X, ZHANG D M, et al. Genetic variation and principal component analysis of forage quality traits in *Leymus chinensis* [J]. Feed Research, 2024, 47(4): 116-120
- [32] 郭天顺, 杨志奇, 何二良, 等. 用DTOPSIS法综合评价马铃薯新品系[J]. 甘肃农业科技, 2009, 40(2): 22-24
- GUO T S, YANG Z Q, HE E L, et al. Comprehensive evaluation of new potato strains by DTOPSIS method [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2009, 40(2): 22-24
- [33] 王淑君, 解慧芳, 邢璐, 等. 基于主成分分析和灰色关联度分析的谷子品种(系)综合评价[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(15): 42-49
- WANG S J, XIE H F, XING L, et al. Comprehensive evaluation of foxtail millet varieties (lines) based on principal component analysis and grey relational degree analysis [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(15): 42-49
- [34] 郑殿升, 杨庆文, 刘旭. 中国作物种质资源多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(4): 497-500, 506
- ZHENG D S, YANG Q W, LIU X. Diversity of crop germplasm resources in China [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(4): 497-500, 506
- [35] 毕盛楠, 王松杰, 侯伟峰, 等. 兴安盟不同来源羊草种质资源综合性状评价[J]. 饲料研究, 2024, 47(8): 138-142
- BI S N, WANG S J, HOU W F, et al. Comprehensive character evaluation of *Leymus chinensis* germplasm resources from different sources in Hinggan League [J]. Feed Research, 2024, 47(8): 138-142
- [36] 刘春阳, 孙全文, 赵月平, 等. 利用灰色关联度和隶属函数法评价5个‘张杂谷’饲草谷子品种的营养价值[J]. 草地学报, 2024, 32(5): 1522-1528
- LIU C Y, SUN Q W, ZHAO Y P, et al. Evaluation of the nutritional value of five millets (*Setaria italica* Beauv.) varieties using grey relational analysis and membership function method [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5): 1522-1528
- [37] 赵银月, 詹和明, 代希茜, 等. 云南间作大豆耐荫性综合评价及鉴定指标筛选[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 81-91
- ZHAO Y Y, ZHAN H M, DAI X X, et al. Comprehensive evaluation and screening identification index of shade tolerance of intercropping soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(1): 81-91
- [38] 吴国江, 周伟, 余忠浩, 等. 基于主成分、灰色关联和DTOPSIS分析的176份糯高粱种质资源综合评价[J]. 河南农业科学, 2023, 52(5): 40-51
- WU G J, ZHOU W, YU Z H, et al. Comprehensive evaluation of 176 waxy sorghum germplasm resources based on principal component, grey correlation and DTOPSIS analyses [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(5): 40-51
- [39] 孟杰, 陈兴福, 杨文钰, 等. 基于灰色关联度分析和DTOPSIS法综合评价四川柴胡资源[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(3): 433-437
- MENG J, CHEN X F, YANG W Y, et al. Evaluation of Bupleuri *Radix* resources in Qingchuan based on DTOPSIS and grey related degree [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(3): 433-437
- [40] 宋慧, 郭岩, 邢璐, 等. 基于灰色关联度、DTOPSIS与灰色局势决策法的谷子品种综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 42-56
- SONG H, GUO Y, XING L, et al. Comprehensive evaluation of foxtail millet varieties based on grey correlation degree, DTOPSIS and situational decision-making method [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(11): 42-56

(责任编辑 闵芝智)