

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.011

引用格式:黄梦琪,李陈建,王玉祥,等.无芒雀麦种质材料萌发期耐旱性综合评价[J].草地学报,2026,34(5):1677–1690
HUANG Meng-qi, LI Chen-jian, WANG Yu-xiang, et al. Comprehensive Evaluation of Drought Tolerance in *Bromus inermis* Germplasm at the Germination Stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1677–1690

无芒雀麦种质材料萌发期耐旱性综合评价

黄梦琪¹, 李陈建^{1*}, 王玉祥^{1*}, 路璐¹, 王清屿¹, 蒋优¹, 童爱香²

(1. 西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆草地资源与生态重点实验室, 新疆农业大学草业学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 北京市科学技术研究院, 北京 100093)

摘要:干旱是影响植物生产的主要胁迫因子之一,萌发期是植物生命周期中最脆弱的时期。在无芒雀麦(*Bromus inermis*)耐旱性育种中,萌发期耐旱评价尤为重要。本研究采取双层滤纸发芽法,通过测定25% PEG-6000胁迫下的100份无芒雀麦种质资源的发芽率、发芽势、发芽指数、根长、芽长等8个指标,利用主成分分析、隶属函数和系统聚类分析法,对其萌发期耐旱性进行综合评价。结果表明:与对照相比,25% PEG胁迫下各观测指标均有下降,变异系数范围为20.853%~97.876%;多数指标之间存在显著性相关($P<0.05$);不同材料的耐旱性存在较大差异,综合耐旱系数在0.612~0.169之间,D值在0.861~0.068之间;聚类分析将100份无芒雀麦种质资源分为4类,其中高度耐旱性14份,中度耐旱性34份,低度耐旱性45份和干旱敏感性7份。本研究筛选出耐旱性强的种质包括W1Z622, W1Z627, W1Z595等,为无芒雀麦耐旱育种提供优质材料和理论依据。

关键词:无芒雀麦;种子萌发;耐旱性;综合评价;聚类分析

中图分类号:S423+.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1677-14

Comprehensive Evaluation of Drought Tolerance in *Bromus inermis* Germplasm at the Germination Stage

HUANG Meng-qi¹, LI Chen-jian^{1*}, WANG Yu-xiang^{1*}, LU Lu¹, WANG Qing-yu¹,
JIANG Yiu¹, TONG Ai-xiang²

(1. Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region Ministry of Education, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Xinjiang, College of Grassland Science Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang Province 830052, China;
2. Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 10093, China)

Abstract: Drought is one of the primary stress factors affecting plant production, and the germination stage is the most vulnerable period in the plant life cycle. In the breeding of drought-resistant *Bromus inermis*, evaluating drought tolerance during the germination stage is particularly important. This study employed the double-layer filter paper germination method, measuring eight indicators-including germination rate, germination potential, germination index, root length, and shoot length-under 25% PEG-6000 stress for 100 *B. inermis* germplasm resources. Principal component analysis, membership functions, and hierarchical clustering analysis were used to comprehensively assess drought tolerance during the germination stage. The results showed that, compared to the control, all observed indicators decreased under 25% PEG stress, with coefficient of variation ranging from 20.853% to 97.876%. There was a significant correlation ($P<0.05$) among most experimental indicators. There were substantial differences in drought tolerance among materials, with the comprehensive drought tolerance coefficient ranging from 0.612 to 0.169 and the D-value ranging from 0.861 to 0.068. Cluster analysis classified the 100 *Bromus inermis* germplasm resources into four groups: highly drought-resistant (14 materials), moderately drought-resistant (34 materials), weakly drought-resistant (45 materials), and drought-sensitive (7 materials).

收稿日期:2025-08-22;修回日期:2025-11-09

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系牧草产业技术体系(CARS-34),新疆维吾尔自治区饲草产业技术体系(XJARS-13-04),第九师草原野生优良牧草选育研究项目(2023JS006)共同资助

作者简介:黄梦琪(2000-),女,汉族,新疆阜康人,硕士研究生,主要从事草种质资源研究与育种相关的研究, E-mail:2822557516@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail:wyx9868@163.com

and drought-sensitive (7 materials). This study identified drought-resistant germplasm such as W1Z622, W1Z627, and W1Z595. The research provides high-quality materials and theoretical support for drought-resistant breeding of *B. inermis*.

Key words: *Bromus inermis*; Seed germination; Drought tolerance; Comprehensive evaluation; Cluster analysis

干旱常被认为是影响植物生产的主要胁迫因子之一,全球40%以上的地区是干旱地区,世界上有1/3的人口居住在干旱地区^[1]。我国干旱和半干旱区域占据国土面积的42%^[2]。新疆大部分地区干旱降水量少,荒漠化土地有 $106.86 \times 10^4 \text{ km}^2$,占新疆面积的64.18%^[3]。干旱阻碍植物的气孔运动、光合作用和呼吸作用,使植物表现出多种形态、生理、生化和分子变化,还会增加植物膜系统的过氧化反应和活性氧的积累^[4-5]。干旱胁迫已成为限制世界干旱和半干旱地区作物生产的最重要的环境因素之一^[6]。

无芒雀麦(*Bromus inermis*)是禾本科雀麦属多年生草本植物^[7],具有耐放牧、产量高、适口性好、营养价值高等优良特性,有“禾草饲料之王”之称^[8-9]。无芒雀麦根部蔓生地下茎,再生力强,具备一定的耐盐碱、耐旱、耐寒能力,是固定沙丘和防止水土流失的先锋植物,其可应用于生态修复、退化草地改良等方面,在国内外已被广泛栽培种植^[10-12]。

目前,关于无芒雀麦耐旱品种和耐旱资源的评价以及耐旱机制的研究相对较少,处于起步阶段。如刘迎春等^[13]对55份无芒雀麦种质进行不同温度不同水分的胁迫实验,筛选出8份种质可以用做培养抗干旱或适应变温品种的亲本材料。孙可蒙等^[14]用15%的PEG模拟干旱胁迫,对12份新疆野生无芒雀麦种质萌发期耐旱性评价,胁迫抑制了无芒雀麦种子发芽率、发芽势、发芽指数等指标。种子萌发期和幼苗生长期是植物生命周期中最脆弱且最易受到外界环境胁迫的时期,是衡量植物抗逆性的关键依据^[15-16]。鉴于此,本研究以100份无芒雀麦种质为材料,采用双层滤纸发芽方法在萌发期进行耐旱性综合评价,通过测定其干旱胁迫下的种子发芽势、发芽率、根长、芽长等8个指标,进行相关性分析、主成分分析、隶属函数分析及聚类分析,筛选出不同耐旱等级的无芒雀麦种质,以期筛选出无芒雀麦耐旱种质材料为无芒雀麦耐旱品种培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料均为新疆各地采集的野生资源,由新

疆农业大学草业学院草种质资源研究与育种团队提供,见表1。

1.2 试验设计

预实验于2024年5月在新疆农业大学草业学院实验室中进行,为了确定无芒雀麦萌发期耐旱性鉴定的所需PEG浓度,选取‘乌苏1号’‘新雀2号’‘昭苏’三个品种和W1Z682、W1Z683、W1Z672三份资源,共6份材料。设置0%,5%,10%,15%,20%,25%,30%,7个水平的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫。通过这6份材料分析,发现当PEG浓度为25%时,相对发芽率为49.76%,接近半致死浓度且该浓度下其他指标较对照均有显著差异,因此确定试验中无芒雀麦种质资源萌发期耐旱筛选的PEG浓度为25%,其他实验方法与下述实验方法相同。采用双层滤纸发芽方法进行试验,选用籽粒饱满、大小均匀一致的无芒雀麦种子,浸泡在75%的酒精中30 s,再用蒸馏水清洗3~5次。将种子放入直径为15 cm的培养皿中,每个培养皿放置30粒种子,每个处理组设置3次重复。利用人工气候培养箱对供试材料进行培养(光照/黑暗时间各16 h/8 h,温度25℃/16℃)。每天称重添加蒸馏水,以维持PEG浓度基本一致,每日统计处理组和对照组的发芽数。14 d后,在每个培养皿中随机挑选5株测定根长、芽长、鲜重、干重等形态指标。本实验对100份无芒雀麦种质材料进行萌发期耐旱性评价,设置对照组(0% PEG)和胁迫组(25% PEG)。

1.3 测定指标及方法

每天记录种子发芽数,第7 d计算发芽势(Germination energy, GE),14 d计算发芽率(Germination rate, GR)^[17]。14 d时选取5株具有代表性的幼苗测量芽长(Shoot length, LS)、根长(Root length, LR)、鲜重(Fresh weight, FW)、干重(Dry weight, DW)。胚根长度超过种子长度1/2视为萌发。统计发芽势、发芽率、发芽指数(Germination index, GI)、活力指数(Vigor index, VI)。

耐旱系数(Drought resistance coefficient, DRC) = 干旱胁迫下指标的均值/对照指标的平均值;

表 1 供试种质信息
Table 1 Trial material information

种质编号 Germplasm number	采集地 Collection location	经纬度 Longitude and latitude	种质编号 Germplasm number	采集地 Collection location	经纬度 Longitude and latitude
W1Z567	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E	W1Z634	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E
W1Z568	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z635	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z569	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z636	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z570	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E	W1Z637	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z572	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z638	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E
W1Z573	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z639	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z574	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z641	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E
W1Z577	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z643	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z578	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z644	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E
W1Z579	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z645	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E
W1Z580	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z646	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E
W1Z582	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z647	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z583	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z657	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z586	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z649	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z588	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z650	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E
W1Z591	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'39"E	W1Z651	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E
W1Z592	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'40"E	W1Z652	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E
W1Z593	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z653	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z594	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E	W1Z654	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z595	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z655	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z596	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E	W1Z656	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E
W1Z597	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z659	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E
W1Z598	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z660	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z599	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E	W1Z661	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z600	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E	W1Z662	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E
W1Z601	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z664	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E
W1Z602	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z665	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'39"E
W1Z604	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z667	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'40"E
W1Z605	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'39"E	W1Z564	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E
W1Z606	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z565	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z607	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'41"E	W1Z566	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E
W1Z608	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z648	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z609	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E	W1Z684	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E
W1Z610	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E	W1Z685	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E
W1Z611	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z686	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'41"E
W1Z612	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z687	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z613	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z690	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z614	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E	W1Z691	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E
W1Z615	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z740	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E
W1Z616	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z741	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z617	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z742	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E
W1Z618	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z743	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'40"E
W1Z619	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z744	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'41"E
W1Z622	昭苏县 Zhaosu County	43°06'42"N 81°02'52"E	W1Z745	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E
W1Z623	吉木萨尔县 Jimusar County	43°46'23"N 89°09'17"E	W1Z746	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z624	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z747	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E
W1Z625	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E	W1Z750	青河县 Qinghe County	46°33'58"N 90°20'12"E
W1Z627	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z751	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E
W1Z630	乌鲁木齐县 Urumqi County	43°27'24"N 87°17'47"E	W1Z752	呼图壁县 Hutubi County	44°08'34"N 84°30'38"E
W1Z631	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E	W1Z754	巴里坤县 Barkol County	43°35'04"N 93°40'13"E

综合耐旱系数(Comprehensive drought resistance coefficient, CDRC) = $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n$ 各指标抗旱系数相对指标(Relative indicators) = 干旱胁迫下指标的均值/对照指标的平均值;

式中, n 表示参与计算的耐旱指标的个数, i 为求和的序号变量指代耐旱指标

发芽势(%) = 第7 d 萌发种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

发芽率(%) = 第14 d 萌发种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

发芽指数 = $\sum$ (发芽数/天数);

活力指数 = 鲜重 $\times$ 种苗生长量

胚根、胚芽长度: 随机选取5株幼苗, 重复3次, 用游标卡尺测定无芒雀麦幼苗的根长和芽长。

1.4 数据处理与耐旱性综合评价

利用 Microsoft Excel 2021 进行平均值计算和处理数据, 运用 Origin 2021 作图, 采用 SPSS 26.0 进行主成分分析以及聚类分析; 计算各供试无芒雀麦种质耐旱性的综合指标值, 用隶属函数分析计算隶属函数值、耐旱性综合评价 D 值, 并根据 D 值进行系统聚类分析。

主成分分析: 数据预处理, 核查并剔除异常值, 对所有指标进行 Z 标准化处理, 消除单位与量级差异, 避免权重失衡; 适用性检验: 通过 KMO 检验与 Bartlett 球形度检验, 确认数据满足 PCA 分析条件 ($KMO \geq 0.5$ 且 Bartlett 检验 $P < 0.05$); 主成分提取与筛选: 以“特征值 ≥ 1 ”(结合碎石图辅助验证) 提取主成分, 确保累计方差贡献度 $\geq 85\%$ (按实际数据调整), 再经最大方差旋转, 依据“载荷绝对值 ≥ 0.5 ”筛选核心指标; 得分计算: 基于成分得分系数矩阵, 计算各植物样本的单主成分得分, 同时以各主成分方差贡献度占累计方差贡献度的比例为权重, 得到样本主成分初步综合得分, 为后续耐旱性综合评价提供量化基础。

$$\text{相对均值下降幅度}(\%) = \left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_0}{\bar{x}_0} \right) \times 100\%$$

式中, $\bar{x}_0$ 为对照指标均值, $\bar{x}_i$ 为胁迫后指标均值

$$F(X_i) = a_{1i}X_{1i} + a_{2i}X_{2i} + \dots + a_{mi}X_{mi}, m=1, 2, 3, \dots, n; i=1, 2, 3, \dots, n$$

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), i=1, 2, 3, \dots, n$$

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times W_i], i=1, 2, 3, \dots, n$$

式中, $F(X_i)$ 为第 i 个综合指标值, a_{mi} 为各单一指标的特征值所对应的特征向量, X_{mi} 为各单一指标的标准化处理值; $\mu(X_i)$ 为某一测定指标的模糊隶属函数值平均值, X_i 为某一测定指标平均值, $X_{\max}$ 为测定指标的最大值, $X_{\min}$ 为测定指标的最小值; D 值表示第 i 个无芒雀麦种质材料在 PEG 胁迫条件下的综合耐旱性评价。

2 结果与分析

2.1 无芒雀麦种质萌发期各指标的变异性分析

从表2可以看出, 对照组各指标的变异系数在 7.751%~28.63% 之间, 25% PEG 处理下各指标的变异系数范围为 20.853%~97.876%, 说明 PEG 胁迫对无芒雀麦种质萌发期的不同指标的抑制程度存在较大差异。与对照组相比 PEG 胁迫组各指标均值均有下降, 均值下降幅度最大的是 VI 胁迫较对照组下降 91.99%, 降幅最小的是 DW 胁迫较对照组下降 1.99%, 干旱胁迫下各无芒雀麦种质材料萌发期活力指数受抑制程度差异最大, 干重受抑制差异程度最小, 均值下降幅度程度从大到小为 VI (91.99%) > LS (75.58%) > LR (74.30%) > GI (71.57%) > GE (66.93%) > FW (58.84%) > GR (48.38%) > DW (1.99%), 无芒雀麦种质资源萌发期不同指标对 PEG 响应存在较大差异。

2.2 无芒雀麦种质萌发期的耐旱系数分析

从表3可以看出, 不同品无芒雀麦种质资源对 PEG 胁迫的耐受程度不同。其中种质编号为 W1Z594, W1Z660, W1Z656, W1Z593 的4份无芒雀麦种质的综合耐旱系数较高, 均高于 0.6, 分别为 0.612, 0.610, 0.604, 0.602, 说明这4份无芒雀麦种质萌发期具有较高的耐旱性。而种质编号为 W1Z754, W1Z664 的2份无芒雀麦种质材料的综合耐旱系数较低均小于 0.2, 分别为 0.179, 0.169, 25% PEG 胁迫对 W1Z754, W1Z664 种质材料萌发的影响较大, 说明这2份无芒雀麦种质萌发期具有较低的耐旱性。

表 2 PEG 胁迫下无芒雀麦种质资源萌发期各性状相对指标变异异性分析

Table 2 Variation analysis of relative indicators of various traits during the germination period of *Bromus inermis* germplasm resources under PEG stress

处理 Treatment	指标 Indicators	最大值 Max	最小值 Min	极差 Range	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
对照 Control	GE/%	100	32.222	67.778	89.644	15.552	17.349
	GR/%	100	65.556	34.444	94.811	7.348	7.751
	FW/g	0.239 60	0.100 47	0.139 13	0.166 24	0.029 23	17.582
	DW/g	0.030 53	0.013 30	0.017 23	0.020 14	0.003 76	18.654
	LR/mm	126.511 33	68.583 33	57.928 00	99.292 33	11.166 90	11.246
	LS/mm	104.097 33	66.884 67	37.212 66	83.619 04	7.941 13	9.497
	GI	67.380 20	14.901 85	52.478 35	42.261 44	10.271 02	24.304
	VI	1 285.740 05	234.723 98	1 051.016 07	780.072 14	223.336 25	28.630
处理 Treatment	GE/%	74.444	0	74.444	29.644	16.539	55.792
	GR/%	84.444	11.111	73.333	48.944	16.287	33.276
	FW/g	0.132 47	0.029 93	0.102 54	0.068 42	0.018 49	27.029
	DW/g	0.029 50	0.009 93	0.019 57	0.019 74	0.004 12	20.853
	LR/mm	65.378 67	7.370 67	58.008 00	25.517 77	13.443 64	52.683
	LS/mm	57.812	3.120 67	54.691 33	20.421 24	13.482 77	66.023
	GI	27.107 6	0.732 93	26.374 67	12.016 09	5.707 23	47.497
	VI	295.876 19	0.905 75	294.970 44	62.508 58	61.181 20	97.876

注:GE,发芽势;GR,发芽率;GI,发芽指数;VI,种子活力指数;LS,芽长;RLR,根长;DW,干重;FW,鲜重。下同

Note: GE, Germination potential; GR, Germination rate; GI, Germination index; VI, Seed vitality index; LS, Bud length; LR, Length; DW, Dry weight; FW, Fresh weight. The same as below

表 3 100 份无芒雀麦种质萌发期耐旱系数及综合耐旱系数

Table 3 Drought tolerance coefficient and comprehensive drought tolerance coefficient during the germination period of 100 *Bromus inermis* resources

种质编号 Germplasm number	耐旱系数与综合耐旱系数 Drought tolerance coefficient and comprehensive drought tolerance coefficient									排序 Order
	DRC ₁	DRC ₂	DRC ₃	DRC ₄	DRC ₅	DRC ₆	DRC ₇	DRC ₈	CDRC	
W1Z594	0.779	0.805	0.496	0.897	0.487	0.570	0.567	0.296	0.612	1
W1Z660	0.646	0.771	0.517	0.993	0.530	0.545	0.571	0.306	0.610	2
W1Z656	0.663	0.700	0.632	1.016	0.548	0.552	0.467	0.257	0.604	3
W1Z593	0.570	0.713	0.512	1.205	0.495	0.572	0.492	0.260	0.602	4
W1Z648	0.513	0.644	0.575	1.207	0.559	0.501	0.503	0.267	0.596	5
W1Z596	0.600	0.622	0.549	0.988	0.625	0.597	0.469	0.287	0.592	6
W1Z665	0.632	0.678	0.591	0.939	0.489	0.613	0.462	0.251	0.582	7
W1Z631	0.607	0.690	0.449	0.948	0.521	0.475	0.537	0.269	0.562	8
W1Z606	0.568	0.841	0.509	1.065	0.366	0.446	0.471	0.191	0.557	9
W1Z653	0.441	0.500	0.595	0.952	0.637	0.630	0.414	0.263	0.554	10
W1Z690	0.481	0.687	0.563	1.014	0.422	0.460	0.444	0.196	0.533	11
W1Z595	0.463	0.642	0.518	1.034	0.427	0.488	0.392	0.178	0.518	12
W1Z627	0.622	0.789	0.387	1.039	0.387	0.272	0.405	0.136	0.505	13
W1Z622	0.483	0.406	0.478	1.097	0.544	0.281	0.451	0.187	0.491	14
W1Z625	0.308	0.440	0.503	1.006	0.540	0.489	0.355	0.183	0.478	15
W1Z586	0.313	0.402	0.487	1.015	0.509	0.582	0.297	0.161	0.471	16
W1Z630	0.489	0.716	0.454	0.868	0.300	0.384	0.381	0.128	0.465	17
W1Z616	0.544	0.756	0.425	1.085	0.214	0.127	0.404	0.071	0.453	18
W1Z566	0.449	0.798	0.380	0.923	0.244	0.328	0.384	0.108	0.452	19
W1Z618	0.427	0.854	0.438	0.936	0.183	0.318	0.361	0.089	0.451	20
W1Z591	0.391	0.552	0.489	1.027	0.255	0.397	0.356	0.113	0.447	21
W1Z744	0.367	0.368	0.462	0.945	0.350	0.636	0.287	0.136	0.444	22
W1Z602	0.386	0.614	0.486	0.896	0.272	0.407	0.301	0.101	0.433	23
W1Z686	0.346	0.547	0.512	1.098	0.283	0.289	0.290	0.083	0.431	24
W1Z685	0.346	0.535	0.512	1.098	0.273	0.300	0.288	0.082	0.429	25
W1Z567	0.438	0.787	0.365	0.953	0.197	0.224	0.354	0.074	0.424	26
W1Z644	0.416	0.764	0.355	0.815	0.315	0.243	0.353	0.100	0.420	27
W1Z613	0.506	0.690	0.380	0.898	0.219	0.189	0.386	0.079	0.418	28
W1Z662	0.422	0.611	0.394	1.098	0.221	0.179	0.348	0.070	0.418	29

续表 3

种质编号 Germplasm number	耐旱系数与综合耐旱系数 Drought tolerance coefficient and comprehensive drought tolerance coefficient									排序 Order
	DRC ₁	DRC ₂	DRC ₃	DRC ₄	DRC ₅	DRC ₆	DRC ₇	DRC ₈	CDRC	
W1Z588	0.511	0.622	0.409	0.990	0.144	0.238	0.350	0.065	0.416	30
W1Z592	0.467	0.600	0.381	1.149	0.182	0.168	0.288	0.050	0.411	31
W1Z577	0.282	0.469	0.460	0.952	0.359	0.336	0.320	0.111	0.411	32
W1Z687	0.263	0.583	0.447	0.965	0.325	0.281	0.302	0.091	0.407	33
W1Z565	0.373	0.551	0.479	0.939	0.260	0.214	0.335	0.080	0.404	34
W1Z604	0.449	0.697	0.341	1.032	0.122	0.224	0.296	0.050	0.401	35
W1Z611	0.444	0.667	0.425	0.818	0.171	0.277	0.324	0.072	0.400	36
W1Z746	0.419	0.563	0.391	0.904	0.217	0.236	0.381	0.086	0.400	37
W1Z741	0.371	0.494	0.419	1.211	0.166	0.221	0.252	0.048	0.398	38
W1Z578	0.388	0.588	0.404	1.057	0.188	0.157	0.345	0.060	0.398	39
W1Z609	0.419	0.556	0.396	1.057	0.191	0.178	0.318	0.059	0.397	40
W1Z605	0.276	0.432	0.497	1.136	0.240	0.220	0.299	0.069	0.396	41
W1Z564	0.364	0.591	0.386	0.942	0.264	0.187	0.331	0.075	0.392	42
W1Z684	0.292	0.481	0.442	0.784	0.371	0.383	0.276	0.104	0.392	43
W1Z641	0.404	0.697	0.327	1.193	0.116	0.056	0.311	0.028	0.391	44
W1Z661	0.344	0.500	0.399	1.142	0.220	0.193	0.263	0.055	0.390	45
W1Z654	0.207	0.517	0.489	0.872	0.312	0.409	0.231	0.083	0.390	46
W1Z599	0.378	0.438	0.431	0.824	0.320	0.269	0.352	0.105	0.389	47
W1Z655	0.440	0.541	0.373	0.998	0.192	0.167	0.334	0.060	0.388	48
W1Z745	0.284	0.556	0.438	0.897	0.274	0.218	0.342	0.085	0.387	49
W1Z691	0.377	0.364	0.496	0.826	0.352	0.314	0.270	0.090	0.386	50
W1Z740	0.409	0.500	0.443	1.003	0.193	0.204	0.277	0.055	0.386	51
W1Z623	0.295	0.404	0.445	0.958	0.265	0.360	0.226	0.069	0.378	52
W1Z647	0.250	0.636	0.387	1.105	0.179	0.161	0.243	0.042	0.375	53
W1Z747	0.302	0.535	0.399	0.862	0.227	0.300	0.258	0.068	0.369	54
W1Z750	0.378	0.578	0.354	0.984	0.137	0.128	0.324	0.043	0.366	55
W1Z614	0.422	0.533	0.363	0.937	0.194	0.110	0.312	0.049	0.365	56
W1Z752	0.384	0.488	0.385	1.005	0.182	0.119	0.271	0.042	0.360	57
W1Z608	0.210	0.472	0.401	0.911	0.246	0.246	0.319	0.078	0.360	58
W1Z634	0.293	0.466	0.415	1.008	0.175	0.155	0.303	0.050	0.358	59
W1Z646	0.278	0.522	0.362	1.052	0.212	0.155	0.209	0.039	0.354	60
W1Z615	0.216	0.551	0.363	1.022	0.193	0.178	0.251	0.047	0.353	61
W1Z568	0.386	0.636	0.342	0.717	0.137	0.223	0.327	0.057	0.353	62
W1Z636	0.276	0.437	0.344	1.197	0.160	0.095	0.239	0.031	0.347	63
W1Z610	0.416	0.640	0.306	0.769	0.134	0.092	0.356	0.040	0.344	64
W1Z569	0.107	0.430	0.435	0.952	0.316	0.301	0.155	0.048	0.343	65
W1Z601	0.322	0.456	0.352	0.984	0.183	0.140	0.250	0.041	0.341	66
W1Z582	0.277	0.471	0.386	0.928	0.183	0.170	0.266	0.047	0.341	67
W1Z612	0.311	0.489	0.388	0.971	0.131	0.143	0.255	0.035	0.340	68
W1Z617	0.318	0.443	0.377	0.965	0.185	0.119	0.262	0.041	0.339	69
W1Z650	0.222	0.548	0.410	0.885	0.207	0.168	0.220	0.042	0.338	70
W1Z645	0.161	0.288	0.376	1.019	0.354	0.253	0.186	0.057	0.337	71
W1Z583	0.299	0.425	0.392	1.148	0.134	0.059	0.217	0.021	0.337	72
W1Z638	0.292	0.449	0.393	1.044	0.154	0.123	0.190	0.026	0.334	73
W1Z743	0.080	0.425	0.414	1.062	0.284	0.234	0.132	0.035	0.333	74
W1Z570	0.367	0.511	0.306	1.028	0.104	0.093	0.223	0.022	0.332	75
W1Z573	0.326	0.512	0.328	0.959	0.160	0.069	0.246	0.029	0.329	76
W1Z659	0.151	0.417	0.470	0.928	0.218	0.184	0.204	0.041	0.326	77
W1Z579	0.193	0.400	0.365	1.087	0.231	0.085	0.169	0.028	0.320	78
W1Z751	0.177	0.353	0.369	1.062	0.165	0.163	0.201	0.033	0.315	79
W1Z657	0.149	0.472	0.342	1.047	0.174	0.102	0.192	0.027	0.313	80
W1Z637	0.159	0.427	0.393	0.996	0.169	0.107	0.196	0.027	0.309	81
W1Z572	0.146	0.371	0.391	1.111	0.138	0.114	0.170	0.022	0.308	82
W1Z624	0.191	0.247	0.369	0.867	0.280	0.201	0.215	0.053	0.303	83
W1Z667	0.178	0.344	0.399	1.101	0.116	0.096	0.156	0.017	0.301	84
W1Z639	0.211	0.378	0.327	1.027	0.127	0.133	0.177	0.023	0.300	85
W1Z651	0.114	0.364	0.376	0.991	0.222	0.147	0.120	0.023	0.295	86
W1Z597	0.116	0.372	0.366	0.946	0.220	0.159	0.128	0.024	0.291	87
W1Z635	0.135	0.348	0.340	1.044	0.165	0.112	0.148	0.021	0.289	88
W1Z649	0.042	0.326	0.384	0.953	0.250	0.200	0.127	0.029	0.289	89

续表 3

种质编号 Germplasm number	耐旱系数与综合耐旱系数 Drought tolerance coefficient and comprehensive drought tolerance coefficient									排序 Order
	DRC ₁	DRC ₂	DRC ₃	DRC ₄	DRC ₅	DRC ₆	DRC ₇	DRC ₈	CDRC	
W1Z619	0.111	0.378	0.333	0.930	0.202	0.159	0.128	0.024	0.283	90
W1Z607	0.045	0.318	0.388	1.097	0.173	0.133	0.084	0.013	0.281	91
W1Z652	0.068	0.313	0.395	0.945	0.233	0.116	0.128	0.023	0.278	92
W1Z600	0.128	0.407	0.335	0.902	0.155	0.095	0.167	0.021	0.276	93
W1Z574	0.091	0.227	0.311	0.889	0.230	0.106	0.089	0.015	0.245	94
W1Z643	0.157	0.315	0.304	0.879	0.078	0.043	0.149	0.009	0.242	95
W1Z580	0.056	0.271	0.331	0.779	0.200	0.129	0.137	0.023	0.241	96
W1Z598	0.027	0.284	0.294	0.880	0.197	0.064	0.103	0.014	0.233	97
W1Z742	0.024	0.151	0.257	0.960	0.111	0.067	0.052	0.005	0.203	98
W1Z754	0.000	0.197	0.278	0.747	0.104	0.061	0.045	0.004	0.179	99
W1Z664	0.000	0.159	0.232	0.758	0.090	0.060	0.048	0.004	0.169	100

注:DRC₁,发芽势耐旱系数;DRC₂,发芽率耐旱系数;DRC₃,鲜重耐旱系数;DRC₄,干重耐旱系数;DRC₅,根长耐旱系数;DRC₆,芽长耐旱系数;DRC₇,发芽指数耐旱系数;DRC₈,种子活力指数耐旱系数,CDRC,综合耐旱系数。CDRC越大,种子萌发期耐旱性越强

Note: DRC₁, germination potential drought resistance coefficient; DRC₂, germination rate drought resistance coefficient; DRC₃, fresh weight drought resistance coefficient; DRC₄, dry weight drought resistance coefficient; DRC₅, root length drought resistance coefficient; DRC₆, shoot length drought resistance coefficient; DRC₇, germination index drought resistance coefficient; DRC₈, seed vigor index drought resistance coefficient; CDRC, comprehensive drought resistance coefficient. A higher CDRC value indicates stronger drought resistance during the seed germination stage

2.3 无芒雀麦种质萌发期各指标的相关性分析

由图 1 可知,本次所测 8 项指标的相对指标 RGE, RGR, RGI, RVI, RLS, RLR, RDW, RFW。

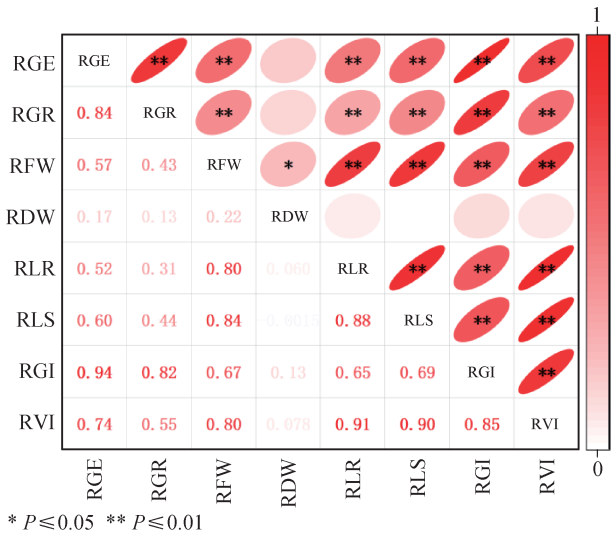


图 1 供试材料各指标间的相关性

Fig. 1 Correlation between various indicators of the tested materials

注:RGE,相对发芽势;RGR,相对发芽率;RGI,相对发芽指数;RVI,相对种子活力指数;RLS,相对芽长;RLR,相对根长;RDW,相对干重;RFW,相对鲜重。*表示显著水平($P < 0.05$),**表示极显著水平($P < 0.01$)。下同

Note: RGE, relative germination potential; RGR, Relative germination rate; RGI, Relative germination index; RVI, Relative seed vitality index; RLS, Relative bud length; RLR, Relative root length; RDW, Relative dry weight; RFW, Relatively fresh weight. *Indicates significant level ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant level ($P < 0.01$). The same as below

RDW 仅和 RFW 存在显著性相关相关系数为 0.22 ($P < 0.05$),与其他指标无显著性相关。除 RDW 外的其他指标均存在一定相关性。其中相关性最强的是 RGI 和 RGE,相关系数达到 0.94 ($P < 0.01$),相关系数在 0.9 及以上的有 RLR 和 RVI 相关系数为 0.91 ($P < 0.01$),RLS 和 RVI 相关系数为 0.90 ($P < 0.01$)。分析中多指标间普遍存在显著相关性,可进一步通过主成分分析等多元分析对无芒雀麦种质萌发期耐旱性进行综合评价。

2.4 无芒雀麦种质萌发期各指标的主成分分析

耐旱性评价非单一指标的评价,而是结合各指标进行的综合性评价,需对不同且有相关性的指标降维,将试验各复杂相关联的指标浓缩为核心指标。根据主成分要求累计贡献率 $>85\%$,特征根 >1 提取主成分的原则,对试验的 100 份无芒雀麦种质材料进行萌发期的 8 个单项指标进行主成分分析(表 4),将原本的 8 个单项指标转换成 3 个新的相互独立的综合指标,其特征值分别为 5.269,1.202,0.981,贡献率分别为 65.866%,15.028% 和 12.268%,累积贡献率达 93.162%,提取出的主成分可体现出原观测指标的绝大部分信息。第一主成分中除相对干重负荷较低外,其他指标负荷较均衡,在 0.135~0.181 之间;第二主成分中相对发芽率、相对根长负荷较高;第三主成分中相对根长负荷较重,结合特征值和贡献率,发芽率和根长更能体现无芒雀麦种质萌发期的耐旱性。

表 4 基于主成分分析的各综合指标的系数及贡献率

Table 4 Coefficients and contribution rates of various comprehensive indicators based on principal component analysis

指标 Indicators	综合指标 Comprehensive indicators		
	CI1	CI2	CI3
RGE	0.163	0.349	-0.161
RGR	0.135	0.489	-0.255
RFW	0.162	-0.209	0.253
RDW	0.030	0.346	0.909
RRL	0.161	-0.371	0.121
RSL	0.168	-0.304	0.006
RGI	0.176	0.228	-0.152
RVI	0.181	-0.158	-0.003
特征值 Eigen values	5.269	1.202	0.981
贡献率 Contributive rate/%	65.866	15.028	12.268
累计贡献率率 Cumulative contributive rate/%	65.866	80.894	93.163
权重 Weight/%	70.7	16.1	13.2

2.5 无芒雀麦种质萌发期耐旱性的综合评价

根据 100 份无芒雀麦种质的各单项指标测定值及其权重,计算各无芒雀麦种质资源的综合指标值 F ,隶属函数值 μ 和 D 值,依据 D 值大小进行排序,比较其在萌发期的耐旱性差异。根据 3 个综合指标的贡献率,计算得出各主成分的权重分别是 70.7, 16.1,13.2(表 4)。计算 100 份无芒雀麦种质资源的 D 值,其范围在 0.068~0.861 之间(表 5),综合评价

中 D 值越高,该无芒雀麦种质萌发期的耐旱性越强, D 值越小,该无芒雀麦种质萌发期的耐旱性越弱。将 D 值排序后可看出 W1Z648 号种质的耐旱性最强, D 值为 0.861,其次除 W1Z648 号外 D 值在 0.8 及以上的有 W1Z593, W1Z660, W1Z656, W1Z594,对应的 D 值分别是 0.858,0.844,0.841, 0.827。耐旱性最弱的是 W1Z664 号资源 D 值是 0.068,其次是 W1Z754 号资源 D 值是 0.087。

表 5 100 份无芒雀麦种质萌发期耐旱性的综合指标值 $F(X_i)$ 、隶属函数值 $\mu(X_i)$ 、 D 值及综合评价

Table 5 Comprehensive index values $F(X_i)$, membership function values $\mu(X_i)$, D values, and comprehensive evaluation of drought tolerance during the germination period of 100 *Bromus inermis* seeds

种质编号 Germplasm number	$F(X_1)$	$F(X_2)$	$F(X_3)$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	D 值 D Value	综合评价及排序 Comprehensive evaluation and order
W1Z648	2.162	-0.246	2.061	0.933	0.427	1	0.861	1
W1Z593	2.107	0.294	1.623	0.921	0.535	0.912	0.858	2
W1Z660	2.430	-0.056	-0.405	0.993	0.465	0.504	0.844	3
W1Z656	2.390	-0.652	0.430	0.984	0.345	0.672	0.841	4
W1Z594	2.461	0.164	-1.509	1	0.509	0.283	0.827	5
W1Z596	2.296	-1.259	0.173	0.963	0.224	0.621	0.800	6
W1Z665	2.202	-0.869	-0.342	0.942	0.302	0.517	0.784	7
W1Z606	1.672	0.970	0.120	0.824	0.671	0.610	0.771	8
W1Z631	1.934	-0.173	-0.809	0.882	0.441	0.423	0.751	9
W1Z690	2.033	-2.374	0.460	0.904	0	0.678	0.730	10
W1Z653	1.611	-0.261	0.291	0.810	0.424	0.644	0.726	11
W1Z595	1.378	-0.384	0.476	0.758	0.399	0.681	0.690	12
W1Z627	1.156	-0.598	1.268	0.708	0.356	0.841	0.669	13
W1Z622	1.014	1.442	-0.374	0.677	0.765	0.511	0.669	14
W1Z616	0.469	2.139	0.109	0.555	0.905	0.608	0.618	15
W1Z625	1.109	-1.800	0.822	0.698	0.115	0.751	0.611	16
W1Z591	0.971	-1.996	0.954	0.667	0.076	0.778	0.587	17
W1Z586	0.639	-0.017	0.422	0.593	0.473	0.671	0.584	18
W1Z686	0.875	0.196	-1.402	0.645	0.515	0.304	0.580	19
W1Z630	0.575	1.273	-1.127	0.579	0.731	0.359	0.574	20
W1Z618	0.403	0.105	1.264	0.54	0.497	0.840	0.572	21

续表 5

种质编号 Germplasm number	$F(X_1)$	$F(X_2)$	$F(X_3)$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	D 值 D Value	综合评价及排序 Comprehensive evaluation and order
W1Z685	0.387	0.073	1.277	0.536	0.491	0.842	0.569	22
W1Z566	0.589	1.071	-1.334	0.582	0.691	0.318	0.565	23
W1Z662	0.14	1.328	0.553	0.481	0.742	0.697	0.551	24
W1Z577	-0.04	1.647	0.961	0.441	0.806	0.779	0.544	25
W1Z578	-0.149	1.085	1.915	0.417	0.694	0.971	0.534	26
W1Z641	0.198	1.277	-0.491	0.494	0.732	0.487	0.531	27
W1Z605	0.706	-1.763	0.146	0.608	0.123	0.615	0.531	28
W1Z588	0.244	1.506	-1.108	0.505	0.778	0.363	0.530	29
W1Z567	0.565	-0.401	-0.710	0.576	0.396	0.443	0.530	30
W1Z602	0.064	0.071	1.738	0.464	0.490	0.935	0.530	31
W1Z744	-0.344	2.613	0.961	0.373	1	0.779	0.527	32
W1Z741	0.293	1.183	-1.456	0.516	0.713	0.293	0.518	33
W1Z613	0.003	1.178	0.281	0.451	0.712	0.642	0.518	34
W1Z609	-0.029	1.063	0.316	0.444	0.689	0.649	0.510	35
W1Z654	0.269	0.059	-0.314	0.510	0.488	0.523	0.508	36
W1Z604	-0.161	0.786	1.313	0.414	0.634	0.850	0.506	37
W1Z565	0.381	-0.914	0.070	0.535	0.293	0.600	0.505	38
W1Z592	-0.092	1.722	-0.373	0.429	0.821	0.511	0.503	39
W1Z687	0.259	-0.305	-0.040	0.508	0.415	0.578	0.502	40
W1Z655	0.373	0.534	-2.145	0.533	0.583	0.155	0.492	41
W1Z644	0.182	0.481	-1.070	0.491	0.573	0.371	0.488	42
W1Z746	-0.070	0.981	-0.279	0.434	0.673	0.530	0.485	43
W1Z740	-0.042	0.433	0.172	0.441	0.563	0.620	0.484	44
W1Z647	0.054	0.477	-0.648	0.462	0.572	0.455	0.479	45
W1Z564	-0.319	1.097	0.814	0.379	0.696	0.749	0.478	46
W1Z611	0.212	0.455	-1.848	0.497	0.567	0.214	0.472	47
W1Z745	0.132	-0.179	-0.727	0.479	0.440	0.440	0.468	48
W1Z636	0.263	-0.824	-1.238	0.509	0.311	0.337	0.455	49
W1Z750	-0.661	1.146	1.738	0.302	0.706	0.935	0.45	50
W1Z599	0.207	-1.384	-0.442	0.496	0.199	0.497	0.449	51
W1Z634	-0.311	1.226	-0.501	0.380	0.722	0.485	0.449	52
W1Z608	0.266	-1.542	-0.742	0.509	0.167	0.437	0.445	53
W1Z661	-0.029	-0.902	0.203	0.444	0.295	0.627	0.444	54
W1Z645	-0.292	0.388	0.236	0.385	0.554	0.633	0.444	55
W1Z623	-0.348	0.725	0.034	0.372	0.621	0.593	0.441	56
W1Z614	-0.253	0.835	-0.771	0.393	0.643	0.431	0.438	57
W1Z691	-0.689	0.988	1.483	0.296	0.674	0.884	0.434	58
W1Z646	0.299	-1.549	-1.376	0.517	0.166	0.309	0.433	59
W1Z568	-0.483	0.552	0.514	0.342	0.587	0.689	0.427	60
W1Z684	-0.440	0.489	0.203	0.352	0.574	0.627	0.423	61
W1Z752	-0.145	-0.454	-0.517	0.418	0.385	0.482	0.421	62
W1Z747	-0.100	-0.368	-1.068	0.428	0.402	0.371	0.416	63
W1Z612	-0.500	0.540	-0.202	0.338	0.584	0.545	0.405	64
W1Z638	-0.636	0.462	0.626	0.308	0.569	0.711	0.403	65
W1Z582	-0.523	0.435	-0.114	0.333	0.563	0.563	0.400	66
W1Z617	-0.492	0.314	-0.181	0.340	0.539	0.549	0.399	67
W1Z570	-0.425	0.072	-0.477	0.355	0.491	0.490	0.394	68
W1Z601	-0.754	1.278	-0.066	0.281	0.732	0.572	0.392	69
W1Z743	-0.597	-0.782	1.295	0.316	0.319	0.846	0.386	70
W1Z579	-0.373	-1.331	0.397	0.367	0.209	0.666	0.381	71
W1Z573	-0.796	0.126	1.171	0.272	0.501	0.821	0.381	72

续表 5

种质编号 Germplasm number	$F(X_1)$	$F(X_2)$	$F(X_3)$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	D 值 D Value	综合评价及排序 Comprehensive evaluation and order
W1Z572	-0.427	-0.153	-0.752	0.355	0.445	0.435	0.380	73
W1Z583	-0.670	0.827	-0.520	0.300	0.642	0.481	0.379	74
W1Z650	-0.487	-1.255	0.942	0.341	0.224	0.775	0.379	75
W1Z569	-0.384	1.084	-2.674	0.364	0.694	0.048	0.376	76
W1Z751	-0.465	-0.831	0.128	0.346	0.310	0.612	0.375	77
W1Z659	-0.210	0.381	-2.915	0.403	0.553	0	0.374	78
W1Z610	-0.902	0.168	1.468	0.248	0.510	0.881	0.373	79
W1Z667	-0.787	-0.058	0.964	0.274	0.464	0.779	0.371	80
W1Z615	-0.857	0.371	0.597	0.259	0.550	0.706	0.364	81
W1Z657	-0.960	0.178	1.421	0.235	0.512	0.871	0.363	82
W1Z637	-0.786	-0.043	0.387	0.274	0.468	0.664	0.356	83
W1Z639	-0.972	0.236	0.447	0.233	0.523	0.676	0.337	84
W1Z635	-1.065	-0.118	0.831	0.212	0.452	0.753	0.321	85
W1Z607	-1.145	-0.535	1.670	0.194	0.369	0.921	0.317	86
W1Z651	-0.937	-0.676	0.586	0.240	0.341	0.703	0.317	87
W1Z624	-0.664	-1.413	-0.445	0.301	0.193	0.496	0.310	88
W1Z597	-0.937	-0.769	0.143	0.241	0.322	0.614	0.303	89
W1Z649	-0.916	-1.274	0.440	0.245	0.221	0.674	0.297	90
W1Z652	-1.007	-1.088	0.384	0.225	0.258	0.663	0.288	91
W1Z619	-1.034	-0.669	-0.126	0.219	0.342	0.561	0.283	92
W1Z600	-1.072	-0.295	-0.518	0.210	0.417	0.482	0.279	93
W1Z643	-1.405	-0.197	-0.745	0.136	0.437	0.436	0.223	94
W1Z574	-1.347	-1.290	-0.206	0.149	0.218	0.544	0.212	95
W1Z598	-1.467	-1.020	-0.421	0.122	0.272	0.501	0.196	96
W1Z580	-1.251	-1.518	-1.203	0.170	0.172	0.344	0.193	97
W1Z742	-1.845	-0.921	0.343	0.038	0.291	0.655	0.159	98
W1Z754	-1.871	-1.555	-1.448	0.032	0.164	0.295	0.087	99
W1Z664	-2.013	-1.463	-1.463	0	0.183	0.292	0.068	100

2.6 无芒雀麦种质萌发期耐旱性的聚类分析

基于对 100 份无芒雀麦种质资源萌发期耐旱综合评价值(D),采用欧氏距离法进行聚类分析(图 2),可分为高度耐旱型、中度耐旱型、低度耐旱型和干旱敏感型 4 类。其中,第 I 类(高度耐旱型)(D 值:0.861~0.669)有 14 份,第 II 类(中度耐旱型)(D 值:0.618~0.468)有 34 份,第 III 类(低度耐旱型)(D 值:0.455~0.279)有 45 份,第 IV 类(干旱敏感型)(D 值:0.223~0.068)有 7 份。高度耐旱的资源编号为 W1Z622, W1Z627, W1Z595, W1Z653, W1Z690, W1Z631, W1Z606, W1Z665, W1Z596, W1Z594, W1Z656, W1Z660, W1Z593, W1Z648, 干旱敏感的资源编号为 W1Z664, W1Z754, W1Z742, W1Z580, W1Z598, W1Z574, W1Z643。

3 讨论

干旱是常见的非生物胁迫之一,其对植物生长

发育有着严重的影响,萌发期是植物生长过程中对逆境胁迫最敏感的时期,是衡量植物抗逆性的核心阶段之一^[18]。种子在萌发期极易受到干旱胁迫的影响,其对水分十分敏感,过度缺水会导致种子胚根发育不良,根毛减少^[19-20]。目前关于无芒雀麦耐旱性研究较少^[14],开展无芒雀麦萌发期耐旱评价,可为无芒雀麦耐旱性育种提供材料选择和数据支持,对无芒雀麦耐旱性育种有着重要意义。

耐旱性受多种因素的影响,目前植物的耐旱机制研究已取得较好的进展^[21]。耐旱性鉴定指标可以体现植物的耐旱性,因此选择合适的鉴定指标对无芒雀麦萌发期耐旱性评价十分重要^[22-23]。单一的指标不能准确反映耐旱性强弱^[5]。通过测定多项指标,进行综合评价可提高评价的准确性。袁艺等^[24]对饲用型燕麦萌发期进行耐旱性评价时,评价指标有发芽势、发芽率、根长、芽长、植株鲜重、发芽指数、活力指数、萌发耐旱指数。袁嘉苗等^[11]对 19 份无芒雀麦材料进行萌发期的耐盐性评价,所选取的

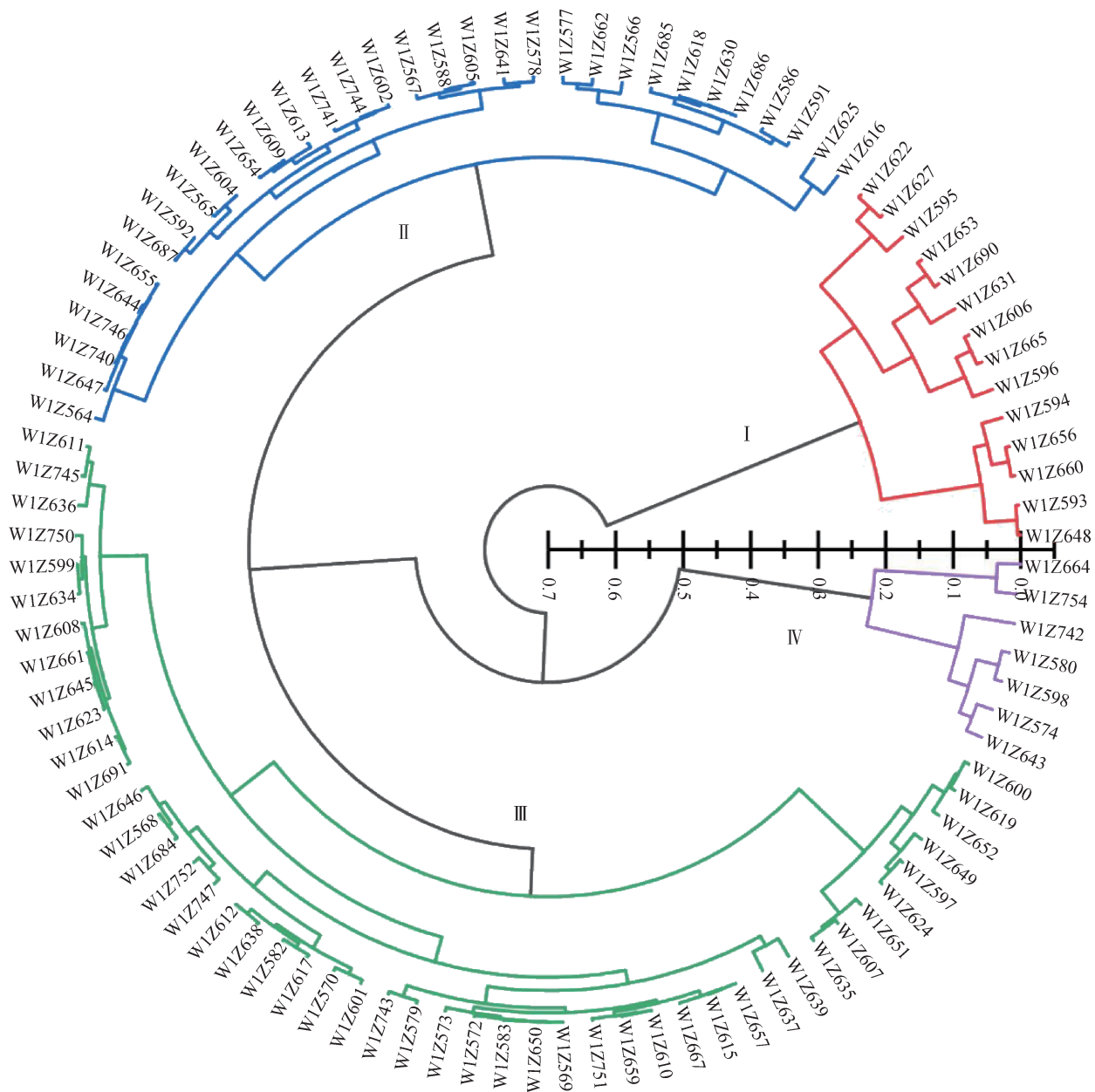


图 2 基于 100 份无芒雀麦种质萌发耐旱性综合评价值 (D 值) 的系统聚类分析

Fig. 2 Systematic clustering analysis based on the comprehensive evaluation value (D value) of drought tolerance during germination of 100 *Bromus inermis* resources

试验指标有发芽势、发芽指数、根长、芽长以及活力指数与盐溶液的电导率。萌发期观测指标评价性萌发期实验中常用的指标有发芽率、发芽势、发芽指数、根长、芽长、鲜重等。干旱胁迫对这些指标存在影响,且不同植物和同种植物不同指标受干旱胁迫的影响程度不同。李小莉等^[25]研究发现不同浓度的 PEG-6000 模拟干旱胁迫对巴天酸模种子的发芽率、发芽势和发芽指数均有影响,巴天酸模种子的发芽率随 PEG-6000 浓度的增大而降低。发芽势呈先升高后降低的趋势,发芽指数呈现先降低后升

高再降低的变化趋势。于国红等^[26]用 20%PEG-6000,模拟干旱胁迫,对 60 份小麦种质资源进行耐旱性鉴定,测定发芽率、发芽势等指标。发现干旱胁迫下,不同种质资源的发芽势和发芽率显著降低,平均降幅分别为 42.59% 和 35.84%,且不同品种间存在显著差异。孙可萌等^[14]通过 15% 的 PEG-6000 模拟干旱胁迫对 12 份来自新疆的野生无芒雀麦种质进行评价,选取指标发芽率、发芽势和发芽指数,胚芽长、胚根长,研究发现 15%PEG 胁迫对这些指标均有抑制作用。本研究采用 25% 浓度的

PEG-6000对100份无芒雀麦种质萌发期进行胁迫,根据所测生长发育指标发芽势和发芽率等,形态指标根长、芽长、鲜重、干重,以及单项指标经分析后得到的综合指标,综合耐旱系数隶属函数 D 值等,对100份无芒雀麦种质材料进行耐旱性评价。研究发现不同指标受干旱胁迫影响程度不同,在(表2)中VI对于干旱胁迫最为敏感,其胁迫组较对照度均值下降幅度有91.99%,DW对于干旱胁迫最不敏感仅下降1.99%。试验所用PEG浓度为预实验中相对半致死浓度,试验各指标胁迫组较对照组均有较大程度的下降,与上述研究中在高浓度PEG胁迫下的情况基本一致,李小莉^[25]在研究中发芽势、发芽指数胁迫组较对照组上升的PEG浓度均低于10%。

在评价试验中评价方法也很关键,杨学清等^[27]对14份紫花苜蓿萌发进行耐旱性评价,通过单因素方差分析比较PEG胁迫下的各指标,并用相关性分析和隶属函数分析进行综合性分析,对14个紫花苜蓿品种耐旱性的强弱进行评价排序。孟林等^[28]利用方差分析与数学聚类,将17个紫花苜蓿品种划分为耐旱性较强、中、较弱3类。孙可萌等^[14]采用隶属函数法对供试无芒雀麦种质的耐旱性进行综合评价,筛选出萌发期耐旱性强的种质为B10,B11,耐旱性弱的为B03。目前在植物耐旱性综合评价上应用较多的数量分析方法有主成分分析、聚类分析、耐旱性指数、耐旱性的分级评价法、等级评分法、耐旱性隶属函数法、灰色关联度分析法等^[22]。本研究中,数据处理方法包括将各指标转换成耐旱系数,采用综合耐旱系数、变异性分析、主成分分析、隶属函数分析、耐旱性综合评价 D 值和系统聚类分析,综合性的系统评价了100份无芒雀麦种质材料萌发期的耐旱性差异,研究发现不同无芒雀麦种质受干旱胁迫影响存在较大差异,在表3中可见各材料对应指标的耐旱系数和综合耐旱系数,在(表5)中可见各指标的 D 值,表首耐旱材料和表尾对于干旱敏感的材料差距大,综合耐旱系数相差0.445, D 值相差0.793。通过聚类筛选高度耐旱的材料有14份,中度耐旱材料34份,低度耐旱材料45份,干旱敏感材料有7份。

植物在不同生长发育期通常表现出不同的综合耐旱性等级,侯宪斌等^[29]研究发现45%的材料在萌发期和苗期的综合耐旱性等级存在差异。本研究中存在不足有仅对无芒雀麦种质萌发期耐旱性进行了评价,筛选出材料是否在其他生育期依旧表现出强耐旱性有待进一步验证。在试验前有关此

次试验浓度筛选的预试验中材料选择中有品种乌苏1号、新雀2号、昭苏,在此实验中并未加入品种进行评价,加入品种后评价将更具有对比性。在后续研究中可选取部分材料进行田间全生育期观测,观测是可加入品种对比,或将本研究中筛选出的耐旱材料与现有品种再次进行耐旱性评价。选取一定量不同耐旱等级的材料,再次进行生理性评价,进一步系统全面的验证其耐旱性将为无芒雀麦耐旱育种提供理论指导,也为耐旱性相关的候选基因挖掘、遗传改良提供基础材料和理论依据。

4 结论

在25%PEG胁迫条件下,所有供试的无芒雀麦种质的发芽势、发芽率、发芽指数、种子活力指数、根长、芽长、干重、鲜重等种子萌发相关指标均受到不同程度的抑制。对100份无芒雀麦种质材料基于 D 值进行系统聚类分析,依据萌发期耐旱性分为四类,筛选出高度耐旱的资源编号为W1Z622, W1Z627, W1Z595, W1Z653, W1Z690, W1Z631, W1Z606, W1Z665, W1Z596, W1Z594, W1Z656, W1Z660, W1Z593, W1Z648, 干旱敏感的资源编号为W1Z664, W1Z754, W1Z742, W1Z580, W1Z598, W1Z574, W1Z643。

参考文献

- [1] 李秀花,吴纯渊. 中国西北五省区水资源利用的协调性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 9-16
LI X H, WU C Y. Coordination of water resources utilization in the five provinces of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 9-16
- [2] 符淙斌,马柱国. 全球干旱/半干旱区年代尺度干湿变化研究的进展及思考[J]. 大气科学学报, 2023, 46(4): 481-490
FU C B, MA Z G. Progress and reflection on the study of inter-decadal changes in dry and wet conditions in global arid and semiarid regions[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(4): 481-490
- [3] 陈亚宁. 我国西北地区沙化土地治理的成功经验及启示——以新疆为例[J]. 国家治理, 2023(24): 48-55
CHEN Y N. Successful experience and enlightenment of desertification land control in northwest China—Taking Xinjiang as an example[J]. Governance, 2023(24): 48-55
- [4] HAYATU M, MUHAMMAD S Y, ABDU H U. Effect of water stress on the leaf relative water content and yield of some cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) genotype[J]. International Journal of Scientific & Technology Research, 2014, 3(7): 36-39

- [5] 陈静,何玮,徐远东,等. 36份马棘种质资源抗旱性评价[J]. 西南农业学报,2024,37(3):542-551
CHEN J, HE W, XU Y D, et al. Evaluation of drought resistance of 36 *Indigofera pseudotinctoria* germplasm resources[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(3): 542-551
- [6] 侯瑞虹,杜柯,黄伟业,等. 10份不同种源野生花苜蓿材料种子萌发期抗旱性评价[J]. 草地学报,2024,32(2):489-494
HOU R H, DU K, HUANG W Y, et al. Evaluation on drought resistance of 10 wild *Medicago ruthenica* L. materials from different provenances at germination period [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 489-494
- [7] 刘毅. 外源GA3对无芒雀麦种子产量形成和种子质量的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2021:2
LIU Y. Effects of Exogenous GA3 on Seed Yield Formation and Seed Quality of *Bromus inermis* Abstract [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021: 2
- [8] 李瑞强,王玉祥,孙玉兰,等. 盐胁迫对无芒雀麦幼苗叶片形态及解剖结构的影响[J]. 草地学报,2022,30(6):1450-1459
LI R Q, WANG Y X, SUN Y L, et al. Effects of salt stress on leaf morphology and anatomical structure of *Bromus inermis* seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(6): 1450-1459
- [9] 于爱萍,韩喆,隋晓青,等. 不同引发处理对盐胁迫下无芒雀麦种子萌发的影响[J]. 耕作与栽培,2024,44(1):7-12
YU A P, HAN Z, SUI X Q, et al. Effects of different priming treatments on seed germination of *Bromus inermis* under salt stress[J]. Tillage and Cultivation, 2024, 44(1): 7-12
- [10] 当周吉. 高寒牧区无芒雀麦优质高产栽培技术[J]. 青海草业,2010,19(2):45-47
DANG Z J. High-quality and high-yield cultivation techniques of *Bromus inermis* in alpine pastoral areas[J]. Qinghai Prataculture, 2010, 19(2): 45-47
- [11] 袁嘉苗,李陈建,曾怡,等. 19份无芒雀麦种质萌发期的耐盐性评价[J]. 2025(2):524-534
YUAN J M, LI C J, ZENG Y, et al. Evaluation of salt tolerance of 19 *Bromus inermis* germplasm at germination stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025(2): 524-534
- [12] ABTAHI M, MAJIDI M M, SAEIDNIA F, et al. Genetic and physiological aspects of drought tolerance in smooth brome grass[J]. Crop Science, 2019, 59(6): 2601-2607
- [13] 刘迎春,刘文辉. 不同水分和温度胁迫下55份无芒雀麦种质萌发性能的评价[J]. 草原与草坪,2015,35(2):85-90
LIU Y C, LIU W H. Evaluation of seed germination of 55 smooth brome grass accessions under moisture and temperature stress[J]. Grassland and Turf, 2015, 35(2): 85-90
- [14] 孙可蒙,隋晓青,王玉祥,等. PEG模拟干旱胁迫下12份新疆野生无芒雀麦种质萌发期抗旱性评价[J]. 草原与草坪,2020, 40(6):102-107,117
SUN K M, SUI X Q, WANG Y X, et al. Evaluation of drought resistance for 12 *Bromus inermis* germplasms in Xinjiang under PEG stress at germination stage[J]. Grassland and Turf, 2020, 40(6): 102-107, 117
- [15] 桑子阳,马履一,陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2011,31(1):109-115
SANG Z Y, MA L, CHEN F J. Growth and physiological characteristics of *Magnolia wufengensis* seedlings under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(1): 109-115
- [16] 曲涛,南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. 草业学报,2008,17(2):126-135
QU T, NAN Z B. Research progress on responses and mechanisms of crop and grass under drought stress[J]. Acta Prataculture Sinica, 2008, 17(2): 126-135
- [17] 中国国家标准化管理委员会. GN/T2930.4-2017草种子检验规程第4部分:发芽试验[S]. 北京:中国标准出版社,2017:5
Standardization Administration of the People's Republic of China. GN/T2930.4-2017 Rules for Forage Seed Testing—Part 4: Germination Test[S]. Beijing: China Standards Press, 2017: 5
- [18] 考妍,靳亚楠,李建波,等. 干旱胁迫对大麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2025,40(3):15-22
KAO Y, JIN Y N, LI J B, et al. Effects of drought stress on seed germination and seedling growth of barley[J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Science Edition), 2025, 40(3): 15-22
- [19] 作建芬,林益超,刘维维,等. 聚乙二醇-6000模拟干旱胁迫对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态学报,2025,45(13):6414-6426
ZUO J F, LIN Y C, LIU W W, et al. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on seed germination and seedling growth of three forages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): 6414-6426
- [20] 胡玉璐,冯慧,任江陵,等. PEG模拟干旱胁迫对不同糜子品种萌发的影响[J]. 北方农业学报,2023,51(6):18-27
HU Y L, FENG H, REN J L, et al. Effects of PEG-simulated drought stress on germination of different *Panicum miliaceum* varieties[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2023, 51(6): 18-27
- [21] PEPE M, CRESCENTE M F, VARONE L. Effect of water stress on physiological and morphological leaf traits: a comparison among the three widely-spread invasive alien species *Ailanthus altissima*, *Phytolacca americana*, and *Robinia pseudoacacia* [J]. Plants, 2022, 11(7): 899
- [22] 张凤霞. 无芒雀麦抗旱性及遗传多样性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2011:3
ZHANG F X. Study on drought resistance and genetic diversity of *Bromus inermis* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2011: 3
- [23] 孙彩霞,沈秀瑛. 作物抗旱性鉴定指标及数量分析方法的研究进展[J]. 中国农学通报,2002,18(1):49-51
SUN C X, SHEN X Y. Advances in studies on identification indexes and methods of quantitative analyses for crop drought resistance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002, 18

- (1):49-51
- [24] 袁艺,陈冬明,呼延美静,等. 饲用型燕麦萌发期和苗期抗旱性评价[J]. 草业科学,2025,42(4):958-968
YUAN Y, CHEN D M, HUYAN M J, et al. Drought resistance evaluation during the germination and seedling stages of forage oats[J]. Pratacultural Science, 2025, 42(4):958-968
- [25] 李小莉,苏旭,刘玉萍,等. 干旱和盐胁迫对巴天酸模种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业科学,2025,42(12):3098-3107
LI X L, SU X, LIU Y P, et al. Effects of drought and salt stress on seed germination and seedlings physiological index of *Rumex Patientia* (Polygonaceae) [J]. Pratacultural Science, 2025, 42(12):3098-3107
- [26] 于国红,张莹莹,周淑梅,等. 60份小麦品种(系)萌发期抗旱性鉴定与综合评价[J]. 山西农业科学,2025,53(2):124-131
YU G H, ZHANG Y Y, ZHOU S M, et al. Identification and comprehensive evaluation of drought resistance of 60 wheat varieties(lines) at germination stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(2):124-131
- [27] 杨学清,任卫波,白卓安,等. 14份紫花苜蓿种子萌发期抗旱性评价[J]. 草原与草坪,2025,45(1):205-211
YANG X Q, REN W B, BAI Z A, et al. Drought resistance evaluation of 14 alfalfa varieties during seed germination [J]. Grassland and Turf, 2025, 45(1):205-211
- [28] 孟林,毛培春,张国芳,等. 17个苜蓿品种苗期抗旱性鉴定[J]. 草业科学,2008,25(1):21-25
MENG L, MAO P C, ZHANG G F, et al. Identification and assessment of drought resistance for 17 Alfalfa Varieties at the Seedling Period[J]. Pratacultural Science, 2008, 25(1):21-25
- [29] 侯宪斌,易强,滕峥,等. 不同玉米种质萌发期和苗期对干旱胁迫的响应[J]. 种子,2024,43(6):36-43,72
HOU X B, YI Q, TENG Z, et al. Response of different maize germplasms to drought stress at germination stage and seedling stage[J]. Seed, 2024, 43(6):36-43,72

(责任编辑 彭露茜)