

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.005

引用格式:王清屿,李陈建,黄梦琪,等.101份无芒雀麦苗期耐旱性评价[J].草地学报,2026,34(5):1610—1621

WANG Qing-yu, LI Chen-Jian, HUANG Meng-qi, et al. Evaluation of Drought Tolerance of 101 Accessions of *Bromus inermis* at the Seedling Stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1610—1621

101份无芒雀麦苗期耐旱性评价

王清屿,李陈建,黄梦琪,路璐,蒋优,王玉祥*,童爱香,张英,靳瑰丽

(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)

摘要:为确定无芒雀麦(*Bromus inermis*)苗期耐旱能力,筛选苗期耐旱性较强的无芒雀麦种质材料,本研究通过测定101份无芒雀麦苗期对于干旱胁迫的适应性反应,分析其植株和根系的形态及生理变化,测定了与耐旱性相关的17个生长指标,利用综合评价、相关性分析、主成分分析、隶属函数和系统聚类分析等方法对其苗期耐旱性进行评价筛选。结果表明:株高、根平均直径、地上鲜重、总根体积、根系表面积、根系投影面积、地下鲜重、总根长、干重根冠比、最大根长、鲜重根冠比和地上干重可以作为无芒雀麦苗期耐旱性鉴定的重要指标;聚类分析将101份无芒雀麦材料划分为4个不同耐旱等级:第Ⅰ类有10份种质材料, D 值范围2.00~2.55,属于高度耐旱材料;第Ⅱ类有38份种质材料, D 值范围1.27~1.81,属于中度耐旱材料;第Ⅲ类有42份种质材料, D 值范围0.77~1.25,属于低度耐旱材料;第Ⅳ类有11份种质材料, D 值范围0.37~0.73,属于旱敏感型材料。综合筛选出耐旱种质有W1Z755, W1Z770和W1Z696旱敏感型材料有W1Z626, W1Z587和W1Z763。本研究能够为无芒雀麦苗期耐旱性评价及新品种选育提供理论依据和材料基础。

关键词:无芒雀麦;苗期;干旱胁迫;耐旱指标

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1610-12

Evaluation of Drought Tolerance of 101 Accessions of *Bromus inermis* at the Seedling Stage

WANG Qing-yu, LI Chen-Jian, HUANG Meng-qi, LU Lu, JIANG You, WANG Yu-xiang*,

TONG Ai-xiang, ZHANG Ying, JIN Gui-li

(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 830052, China)

Abstract: To determine the drought-tolerant capacity of *bromus* and to screen early drought-tolerant *bromus* seedlings, this study measured the adaptive response of 101 accessions of *B. inermis* at the seedling stage to drought stress. The morphological and physiological changes of the plants including roots were analyzed, and 17 growth indexes related to drought tolerance were determined. The drought tolerance of the seedlings was evaluated and screened by comprehensive evaluation, correlation analysis, principle component analysis, membership function and cluster analysis. The results showed that plant height, average root diameter, fresh weight above ground, total root volume, root surface area, root projected area, fresh weight below ground, total primary root length, dry-weight root aboveground ratio, maximum primary root long, fresh-weight root aboveground ratio and aboveground dry weight can be important indicators for the identification of drought tolerance in the seedlings of *bromus*. 101 *bromus* materials were divided into 4 different drought-tolerant grades by cluster analysis. There were 10 germplasm materials in class I with D value ranging from 2.00 to 2.55, which were

收稿日期:2025-07-24;修回日期:2025-09-09

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);新疆维吾尔自治区优质饲草产业技术体系(XJARS-13-04);第九师草原野生优良牧草选育研究项目(2023JS006)资助

作者简介:王清屿(1998-),女,汉族,甘肃陇南人,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:877323204@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:wyx9868@163.com

highly drought-tolerant materials. There were 38 germplasm materials in Class II with D value ranging from 1.27 to 1.81, belonging to moderate drought tolerance. There were 42 germplasm materials in Class III with D value ranging from 0.77 to 1.25, belonging to low drought tolerance. There were 11 germplasm materials in Class IV, the D value ranged from 0.37 to 0.73, belonging to drought sensitive materials. The drought-resistant germplasm W1Z755, W1Z770 and W1Z696 were selected. The drought-sensitive materials were W1Z626, W1Z587 and W1Z763. This study can provide a theoretical basis and a material basis for the drought resistance evaluation of *bromus* seedlings and the selection of new varieties.

Key words: *Bromus inermis*; Seedling stage; Drought stress; Drought tolerance index

无芒雀麦(*Bromus inermis*)为禾本科雀麦属多年生草本植物^[1],原产欧洲,其野生类型广布于亚洲和北美洲等地区^[2]。该草种在我国西北地区有60多年的栽培和育种历史,内蒙古及东北等地区亦存在野生种质资源。无芒雀麦有着丰富的营养价值,适口性好,为各类家畜喜食^[3],可以用做青贮饲料,被称为“禾草饲料之王”,是农牧民喜欢种植的牧草品种之一^[4]。无芒雀麦也可改良天然草地,是水土保持、改土培肥、治理荒山、荒坡、建植混播草地的理想草种^[5]。然而,水资源短缺引发的干旱已成为限制我国作物及牧草生产的主要非生物胁迫之一^[6]。干旱不仅会抑制作物及牧草生长发育,还会影响产量及品质^[7],耐旱性强的品种可以有效缓解干旱带来的不利影响^[8]。

选育耐旱品种是人们应对干旱胁迫带来不利影响的重要手段之一,而耐旱种质资源的评价与筛选则是耐旱品种选育的基础^[9]。植物耐旱评价主要集中在种子萌发期^[10]、苗期^[11]和全生育期^[12]3个时期,而苗期鉴定因易操作、可重复、周期短、受环境影响小等特点,已被广泛应用于抗旱性鉴定工作中。前人研究发现,干旱会抑制幼苗生长,严重时会导致植物生长异常或死亡^[13]。目前对无芒雀麦的研究主要集中在品质^[14]与豆禾混播等方面,对于苗期耐旱性综合评价的报道较少。在苗期耐旱方面,仅毛培春等^[2]用反复干旱法对20份无芒雀麦种质材料苗期进行综合评价,将20份无芒雀麦苗期耐旱性划分成3个级别,为筛选耐旱的无芒雀麦种质提供基础依据。

作物的耐旱性是干旱胁迫下多种生理代谢作用的结果,难以用某种单一的指标来评价^[15-16]。目前,植物苗期多指标综合分析评价的方法较多,有相关性分析、聚类分析、主成分分析、隶属函数分析等统计学分析方法,针对不同牧草种质资源综合评价需根据具体情况运用不同的评价方法进行资源评价及筛选^[17]。利用主成分分析、隶属函数法等多种方法和多指标相结合的鉴定和评价植物的耐旱

性已经在玉米(*Zea mays* L.)^[18]、小麦(*Triticum aestivum* L.)^[19]等多种作物上成功运用,该方法能够综合且全面地考虑各项指标,将多指标优化为具有代表耐旱性的综合指标,也可根据指标贡献率进行加权,因此将主成分分析和隶属函数等相结合应用于无芒雀麦耐旱性综合评价是较为科学的分析方法。

鉴于此,本研究拟选取101份无芒雀麦材料,采用室内PEG模拟干旱法,待干旱处理14 d后测定各材料地上及地下17个相关指标,运用相关性分析、主成分分析和模糊隶属函数法相结合的方法,对其苗期耐旱性进行综合评价,旨在筛选出耐旱性较强的无芒雀麦种质资源以及鉴定评价耐旱性的关键指标,为今后无芒雀麦耐旱研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验参选的101份无芒雀麦材料(表1),均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,其中100份为野生材料,1份是品种,即‘乌苏1号’。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验采用聚乙二醇-6000(PEG-6000)模拟干旱胁迫在新疆农业大学陆港校区进行。将选取籽粒饱满的101份无芒雀麦种子,用70%酒精消毒30 s,蒸馏水冲洗2~3次,于人工智能培养箱中的培养皿里催芽。培养条件设置为昼夜温度5℃/18℃,光周期14 h/10 h,相对湿度60%~70%。待芽长生长至2~3 cm,选取长势一致的幼苗,转植于培养盒(100 cm×90 cm×15 cm),使用1/2 Hoagland 营养液培养。每盒种植18株,3次重复,每2 d更换一次营养液。待幼苗正常生长至两叶一心时,进行干旱胁迫处理。为防止干旱冲击,在高标准浓度开始处理的前24 h中,先加以低质量浓度(10%, 15%, 20%)的PEG-6000作为干旱缓

表 1 无芒雀麦种质材料信息
Table 1 Information on germplasm materials of *Bromus*

编号 Code	来源地区 Region of origin	海拔 Altitude/m	经纬度 Longitude and latitude	年降水量 Annual precipitation/mm	年平均气温 Average annual temperature/°C
W1Z688, W1Z698, W1Z732, W1Z733, W1Z734, W1Z753, W1Z756	拜城县 Baicheng County	2200	41.80°N, 81.69°E	104.1	7.6
W1Z590, W1Z621, W1Z633, W1Z672, W1Z680, W1Z696, W1Z757	巴楚县 Bachu County	1000	39.78°N, 78.47°E	150.0	11.8
W1Z574, W1Z582, W1Z595, W1Z627, W1Z637, W1Z655, W1Z661, W1Z690	乌鲁木齐县 Urumqi County	1965	43.45°N, 87.28°E	208.4	7.0
W1Z584, W1Z632, W1Z640, W1Z670, W1Z673, W1Z675, W1Z703	伊宁县 Yining County	1775	43.84°N, 81.28°E	340.0	9.0
W1Z589, W1Z620, W1Z671, W1Z674, W1Z700, W1Z706, W1Z749, W1Z758	额敏县 Emin County	2321	46.68°N, 83.88°E	441.2	8.6
W1Z563, W1Z587, W1Z603, W1Z638, W1Z645, W1Z683, W1Z740, W1Z747	青河县 Qinghe County	1659	46.75°N, 90.15°E	165.0	1.8
W1Z571, W1Z581, W1Z626, W1Z676, W1Z679, W1Z762, W1Z763	和静县 Hejing County	1500	42.47°N, 86.37°E	73.1	9.3
W1Z564, W1Z599, W1Z642, W1Z659, W1Z666, W1Z682, W1Z707, W1Z760, W1Z761	昭苏县 Zhaosu County	1918	42.95°N, 81.13°E	511.8	7.8
W1Z585, W1Z628, W1Z735, W1Z737, W1Z738, W1Z739, W1Z759, W1Z765, W1Z767	霍城县 Huocheng County	2283	44.02°N, 80.85°E	163.0	8.4
W1Z629, W1Z695, W1Z697, W1Z699, W1Z704, W1Z736, W1Z768	新源县 Xinyuan County	2261	43.47°N, 84.97°E	273.0	8.5
W1Z678, W1Z701, W1Z748, W1Z755, W1Z770	民丰县 Minfeng County	3300	37.07°N, 83.21°E	30.5	11.1
W1Z663, W1Z677, W1Z692, W1Z694, W1Z772	库车县 Kuche County	2550	41.72°N, 83.11°E	10.9	10.8
W1Z576, W1Z658, W1Z669, W1Z693, W1Z705, W1Z764	疏勒县 Shule County	1290	39.47°N, 76.03°E	64.0	11.8
W1Z668, W1Z689, W1Z702, W1Z708, W1Z766, W1Z769, W1Z771	伽师县 Jiashi County	1208	39.52°N, 76.77°E	47.7	11.6
乌苏 1 号	乌苏县 Wusui County	556	44.40°N, 84.60°E	350.0	6.5

冲,第 25 h 增至高浓度处理。处理组每 2 d 更换一次含 25% PEG-6000 浓度的营养液,对照组则更换 Hoagland 营养液。干旱胁迫 14 d 后测定其相关指标。

1.2.2 指标测量

1.2.2.1 抗旱性指标筛选 枯叶率(Withered leaf rate, WLR)和叶片相对含水量(Relative water content, RWC)采用刘小慧等^[20]方法测算;叶绿素含量(Soil and plant analyzer development, SPAD)选取每植株中上部健康充分展开的功能叶,上午用 SPAD-502 叶绿素仪测定叶绿素相对含量;叶片电导率(Electrical conductivity, EC)采用浸泡法测定^[21];株高(Plant height, PH)和最大根长(Maximum root length, MRL)是在每重复选取 3 株采用卷尺拉直测量;地上鲜重(Shoot fresh weight, SFW)、地下鲜重(Root fresh weight, RFW)、地上干重(Shoot dry weight, SDW)和地下干重(Root dry weight,

RDW)、鲜重根冠比(Root-shoot fresh weight ratio, RSFW)和干重根冠比(Root-shoot dry weight ratio, RSDW)均采用白旭瑞的方法^[18];总根长(Total root length, RL)、总根体积(Total root volume, RV)、根系表面积(Root surface area, RA)、根系投影面积(Root projection area, RPA)根平均直径(Root mean diameter, RD)采用中晶(Scanmaker) i800plus 扫描仪进行根系图像采集,用 WinRHIZO (Version 2012b, Regent Instruments, Montreal, Canada)软件进行图像分析。

$$I_{DC} = I_T / I_{CK}$$

式中 I_{DC} 表示耐旱系数, I_T 表示 25% PEG-6000 下各指标的平均值, I_{CK} 表示对照各指标的平均值。

1.2.3 耐旱性综合评价 参考李贺洋等^[22]的方法采用模糊隶属函数法对无芒雀麦耐旱性进行综合评价。计算公式如下:

$$\mu(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (1)$$

$$\mu(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (2)$$

$$V_j = \frac{1}{\bar{X}_j} \sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij} - \bar{X}_j} \quad (3)$$

$$w_j = \frac{p_j}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (4)$$

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \times w_j] \quad (5)$$

式中, i 为材料, j 为指标, X_{ij} 为第*i*个材料的第*j*个指标的耐旱系数值(前面已计算出无芒雀麦各个指标的耐旱系数), $\mu(X_{ij})$ 为*i*材料*j*指标的隶属函数值, w_j 为权重系数。综合评价耐旱值为*D*,*D*值越大表示该无芒雀麦种质资源的耐旱性越强。

1.2.4 数据分析

利用Excel 2016对试验数据进行整理、分析与作图,采用隶属函数法、主成分分析和相关性分析及系统聚类分析法对无芒雀麦材料进行耐旱性综合评价。

2 结果与分析

2.1 干旱(PEG-6000)胁迫对无芒雀麦苗期不同性状的影响

2.1.1 无芒雀麦苗期干旱相关性状表型分析 从表2可知,干旱胁迫下无芒雀麦的17个性状指标表现出不同程度的差异,各指标均值的耐旱系数范围在0.49~38.99,耐旱系数的变异系数(Coefficient of variation, CV)的变化范围是17.57%~51.92%。相对电导率、枯叶率、鲜重根冠比、干重根冠比和根平均直径在PEG干旱胁迫下的均值较对照均有所增加,呈正相关关系。株高、最大根长、叶绿素含量、叶片相对含水量、总根长、根系投影面积、根系表面积、根体积、地上鲜重、地下鲜重、地上干重和地下干重在干旱胁迫下均值较对照都呈现下降趋势,地上鲜重下降0.31 g。叶绿素含量耐旱系数的CV最大,其耐旱系数为51.92%,表明该指标在不同植株间的相对离散程度最高、稳定性最差,不建议作为核心鉴定指标;株高耐旱系数的CV最小,为17.57%,表明该指标在不同材料的耐旱系数差异性最小、数值较集中、波动小,可作为筛选耐旱性评价的核心指标。

2.1.2 PEG处理下无芒雀麦苗期各指标的相关性分析 从图1可以看出,PEG模拟干旱胁迫下,苗期17个指标的抗旱性系数和隶属函数值(*D*值)之

间存在不同程度的相关性。隶属函数值(*D*值)与叶片相对含水量、鲜重根冠比、地上干重、地下干重、株高、最大根长、总根长和根平均直径、地上鲜重、总根体积、根系表面积和根系投影面积呈极显著正相关($P < 0.001$),相关系数分别为0.33, 0.33, 0.53, 0.55, 0.57, 0.57, 0.66, 0.69, 0.72, 0.76, 0.78, 0.81和0.82,这些指标的耐旱能力越强(抗旱系数越高),植物整体耐旱性*D*值越高,表明*D*值与试验所选的多数耐旱指标存在强统计关联;与干重根冠比呈显著正相关($P < 0.01$)。可将根平均直径、地上鲜重、总根体积、根系表面积和根系投影面积这5个指标作为评价无芒雀麦苗期耐旱性的鉴定指标($r > 0.7, P < 0.001$)。

2.2 不同无芒雀麦材料耐旱性综合评价及指标鉴定筛选

2.2.1 无芒雀麦苗期17个指标的主成分分析 对苗期17个指标抗旱性系数进行主成分分析(表3),基于降维与信息保留原则,通过运用主成分分析可以消除各指标间的相关影响,排除次要指标的干扰作用,提高分析的准确性。结果显示,总共提取7个主成分,其方差贡献率依次为36.51%, 11.87%, 9.20%, 7.58%, 7.48%, 5.11%和4.85%;累计贡献率值达到82.60%。第一主成分特征值为6.21,地下鲜重、总根体积、地上鲜重、根系表面积、根平均直径、根系投影面积在此成分中载荷值较高;第二主成分特征值为2.02,其中总根长、根系投影面积载荷值较高;第三成分特征值为1.56,干重根冠比载荷值较高;第四主成分特征值为1.29,最大根长载荷值高;第五主成分特征值为1.27,鲜重根冠比在此成分中载荷值较高;第六主成分特征值为0.87,叶绿素含量的载荷值较高;第七主成分特征值为0.83,其中地上干重在此主成分中载荷值最高。

2.2.2 无芒雀麦苗期耐旱性综合评价 计算出101份无芒雀麦的各指标的隶属函数值,求出*D*值,基于*D*值可相对准确地对无芒雀麦材料苗期的耐旱性强弱进行综合评价,*D*值越大表明其材料的耐旱性越强。从表4可以看出,耐旱的材料有W1Z755, W1Z770和W1Z696, *D*值分别为2.55, 2.54和2.48,早敏感型的材料有W1Z626, W1Z587和W1Z763, *D*值分别为0.37, 0.43和0.45。

表 2 PEG 胁迫下无芒雀麦苗期耐旱指标的变化

Table 2 Changes in drought tolerance indicators of *bromus* at the seedling stage under PEG stress

指标 Index	处理 Treatment	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
株高	CK	21.64	48.87	33.49	5.02	14.99
Plant height/cm	25% PEG	14.80	36.99	23.42	4.97	21.22
	DC	0.44	0.99	0.74	0.13	17.57
最大根长	CK	7.44	26.82	16.16	4.79	29.64
Maximum root length/cm	25% PEG	7.57	22.03	12.85	3.09	24.05
	DC	0.42	1.58	0.87	0.22	25.29
叶片相对电导率	CK	20.12	63.98	38.20	13.19	34.53
Relative electrical conductivity/%	25% PEG	12.22	115.44	65.11	23.13	35.53
	DC	0.55	3.96	1.97	0.88	44.67
枯叶率	CK	0.90	2.35	5.46	0.32	5.83
Withered leaf rate/%	25% PEG	20.50	100.00	60.84	19.64	32.28
	DC	11.73	86.96	38.99	17.34	44.47
叶绿素含量	CK	8.26	24.77	16.76	4.00	23.87
SPAD	25% PEG	0.03	17.60	7.90	4.01	50.76
	DC	0.00	1.29	0.52	0.27	51.92
叶片相对含水量	CK	47.42	97.52	87.38	8.02	9.17
Relative water content/%	25% PEG	14.37	88.96	60.32	19.37	32.11
	DC	0.18	1.53	0.71	0.24	33.80
鲜重根冠比	CK	0.14	0.53	0.35	0.09	25.71
Root-shoot ratio based on fresh weight	25% PEG	0.16	0.81	0.50	0.14	28.00
	DC	0.77	2.74	1.52	0.34	22.37
干重根冠比	CK	0.20	0.79	0.39	0.10	25.64
Root-shoot ratio based on dry weight	25% PEG	0.19	1.26	0.48	0.16	33.33
	DC	0.45	2.20	1.30	0.36	27.69
总根长	CK	19.79	199.89	76.09	38.02	49.97
Total root/cm	25% PEG	21.23	193.89	64.63	32.40	50.13
	DC	0.23	3.06	1.01	0.51	50.50
根系投影面积	CK	0.42	5.46	2.22	1.24	55.86
Root projection area/cm ²	25% PEG	0.07	6.60	1.90	1.07	56.32
	DC	0.16	2.32	1.02	0.49	48.04
根系表面积	CK	3.01	14.02	6.76	3.23	47.78
Root surface area/cm ²	25% PEG	0.68	17.94	5.79	2.84	49.05
	DC	0.20	2.35	0.99	0.47	47.47
总根体积	CK	0.01	0.27	0.14	0.06	42.86
Total root volume/cm ³	25% PEG	0.01	0.39	0.13	0.06	46.15
	DC	0.17	3.38	1.05	0.51	48.57
根平均直径	CK	0.14	0.48	0.34	0.07	20.59
Average root diameter/mm	25% PEG	0.21	0.86	0.42	0.12	28.57
	DC	0.61	2.61	1.32	0.33	25.00
地上鲜重	CK	0.13	2.23	0.58	0.37	63.79
Shoot fresh weight/g	25% PEG	0.03	0.98	0.27	0.17	62.96
	DC	0.09	0.92	0.49	0.19	38.78
地下鲜重	CK	0.05	0.71	0.20	0.11	55.00
Root fresh weight/g	25% PEG	0.01	0.54	0.15	0.09	60.00
	DC	0.08	1.69	0.71	0.33	46.48
地上干重	CK	0.03	0.20	0.10	0.04	40.00
Shoot dry weight/g	25% PEG	0.01	0.20	0.08	0.03	37.50
	DC	0.19	1.49	0.79	0.22	27.85
地下干重	CK	0.01	0.06	0.06	0.01	16.67
Root dry weight/g	25% PEG	0.00	0.06	0.06	0.01	16.67
	DC	0.22	2.77	0.99	0.41	41.41

注:DC表示耐旱系数,CK表示对照各指标的平均值,变异系数=(标准差/平均值)×100%

Note: DC stands for drought coefficient, and CK represents the average value of each index in the control group CV = (standard deviation / mean) × 100%

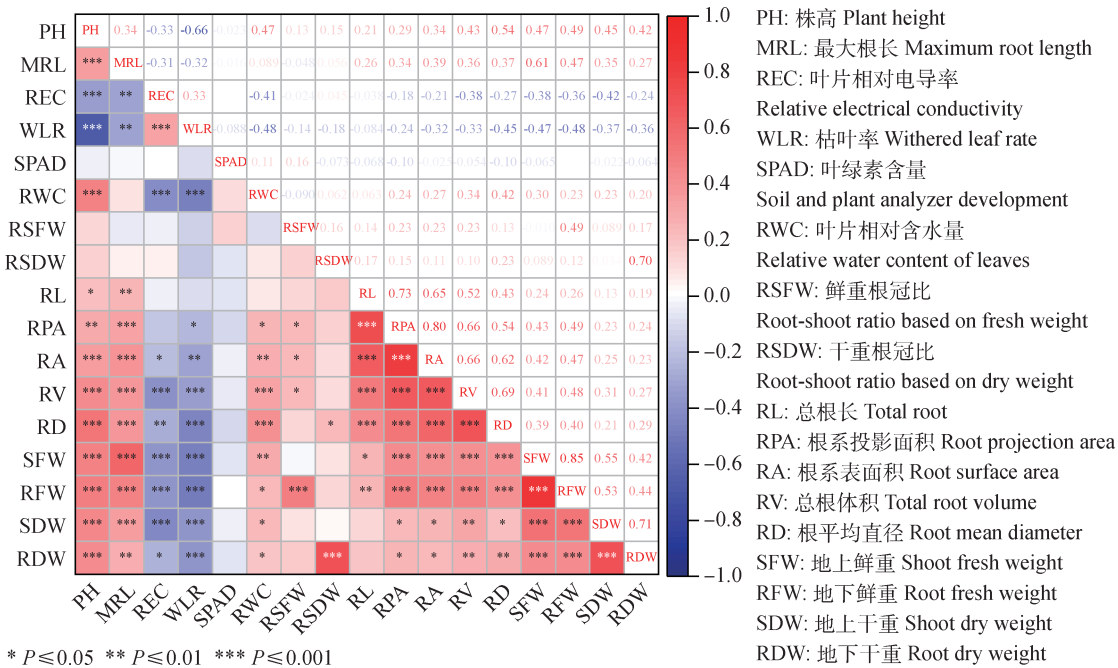


图 1 干旱胁迫下无芒雀麦各性状间的相关性分析

Fig 1 Correlation analysis among various traits of *bromus* under drought stress

注:*,**和***分别表示在0.05,0.01和0.001水平差异显著
Note:*,**and***indicate significant differences at the 0.05, 0.01 and 0.001 levels

表 3 各主成分分析的特征向量及贡献率

Table 3 Eigenvectors and contribution rates of each principal component analysis

变量 Variable	Principal Component 1, PC1	Principal Component 2, PC2	Principal Component 3, PC3	Principal, Component 4, PC4	Principal Component 5, PC5	Principal Component 6, PC6	Principal Component 7, PC7
株高 Plant height/cm	0.70	−0.29	−0.09	−0.27	0.00	−0.05	−0.26
最大根长 Maximum root length/cm	0.59	−0.07	−0.15	0.43	−0.16	0.39	−0.18
叶片相对电导率 Relative water content/%	−0.49	0.34	0.34	−0.03	0.02	0.29	−0.42
枯叶率 Withered leaf rate/%	−0.64	0.37	0.11	0.30	−0.12	−0.06	0.33
叶绿素含量 SPAD	−0.04	−0.12	−0.11	−0.19	0.68	0.61	0.29
叶片相对含水量 Relative water content of leaves/%	0.48	−0.25	−0.38	−0.55	−0.05	−0.01	0.16
鲜重根冠比 Root-shoot ratio based on fresh weight	0.26	0.17	0.39	0.01	0.74	−0.37	−0.10
干重根冠比 Root-shoot ratio based on dry weight	0.27	−0.06	0.79	−0.34	−0.22	0.17	−0.03
总根长 Total root/cm	0.53	0.65	0.10	0.03	−0.11	0.15	0.17
根系投影面积 Root projection area/cm ²	0.72	0.56	0.00	0.05	−0.02	0.01	0.10
根系表面积 Root surface area/cm ²	0.74	0.50	−0.07	−0.01	0.03	0.06	0.06
总根体积 Total root volume/cm ³	0.76	0.33	−0.14	−0.10	0.01	−0.15	0.13
平均根系直径 Average root diameter/mm	0.73	0.23	−0.11	−0.32	−0.13	−0.04	−0.18
地上鲜重 Shoot fresh weight/g	0.76	−0.25	−0.10	0.40	−0.07	0.14	−0.16
地下鲜重 Root fresh weight/g	0.78	−0.14	0.08	0.34	0.33	−0.10	−0.18
地上干重 Shoot dry weight/g	0.61	−0.45	0.12	0.30	−0.04	−0.09	0.36
地下干重 Root dry weight/g	0.59	−0.37	0.64	−0.04	−0.18	0.05	0.22
特征值 Eigenvalue	6.21	2.02	1.56	1.29	1.27	0.87	0.83
贡献率 Contribution rate	36.52	11.87	9.20	7.58	7.48	5.11	4.85
累积贡献率	36.52	48.38	57.58	65.16	72.64	77.75	82.60
Cumulative contribution rate/%							

表4 PEG胁迫下不同无芒雀麦种质抗旱性综合评价表

Table 4 Comprehensive evaluation table of drought tolerance for different *bromus* germplasms under stress

材料 Makings	D值 D value	排名 Ranking	材料 Makings	D值 D value	排名 Ranking
W1Z755	2.55	1	W1Z756	1.21	52
W1Z770	2.54	2	W1Z772	1.20	53
W1Z696	2.48	3	W1Z661	1.17	54
W1Z758	2.45	4	W1Z576	1.17	55
W1Z669	2.28	5	W1Z640	1.16	56
W1Z682	2.27	6	W1Z680	1.15	57
W1Z735	2.20	7	W1Z771	1.13	58
W1Z738	2.13	8	W1Z700	1.11	59
W1Z676	2.04	9	W1Z677	1.11	60
W1Z706	2.00	10	W1Z749	1.11	61
W1Z692	1.81	11	W1Z740	1.11	62
W1Z693	1.77	12	W1Z732	1.09	63
W1Z690	1.75	13	W1Z629	1.08	64
W1Z764	1.74	14	W1Z632	1.05	65
W1Z628	1.70	15	W1Z701	1.04	66
W1Z666	1.67	16	W1Z582	1.03	67
W1Z707	1.67	17	W1Z766	1.03	68
W1Z658	1.60	18	W1Z674	1.00	69
W1Z704	1.59	19	W1Z736	1.00	70
W1Z761	1.59	20	W1Z708	0.99	71
W1Z705	1.56	21	W1Z599	0.97	72
W1Z762	1.54	22	W1Z747	0.96	73
W1Z760	1.54	23	W1Z675	0.96	74
W1Z694	1.52	24	W1Z765	0.93	75
W1Z627	1.51	25	W1Z702	0.92	76
W1Z564	1.51	26	W1Z659	0.90	77
W1Z695	1.50	27	W1Z768	0.90	78
W1Z595	1.48	28	W1Z581	0.85	79
W1Z678	1.48	29	W1Z737	0.85	80
W1Z574	1.47	30	W1Z739	0.85	81
W1Z759	1.44	31	W1Z645	0.85	82
W1Z689	1.43	32	W1Z638	0.84	83
W1Z688	1.42	33	W1Z620	0.82	84
W1Z697	1.42	34	W1Z621	0.80	85
W1Z698	1.40	35	乌苏1号	0.80	86
W1Z663	1.39	36	W1Z671	0.80	87
W1Z589	1.39	37	W1Z767	0.79	88
W1Z584	1.39	38	W1Z585	0.78	89
W1Z734	1.38	39	W1Z703	0.77	90
W1Z673	1.35	40	W1Z670	0.73	91
W1Z668	1.34	41	W1Z637	0.70	92
W1Z769	1.33	42	W1Z633	0.68	93
W1Z753	1.33	43	W1Z683	0.64	94
W1Z655	1.31	44	W1Z563	0.60	95
W1Z590	1.29	45	W1Z571	0.59	96
W1Z699	1.28	46	W1Z679	0.58	97
W1Z672	1.27	47	W1Z603	0.51	98
W1Z757	1.27	48	W1Z763	0.45	99
W1Z733	1.25	49	W1Z587	0.43	100
W1Z748	1.23	50	W1Z626	0.37	101
W1Z642	1.21	51			

2.2.3 不同无芒雀麦的聚类分析 以耐旱性 D 值为基础,采用离差平方和法,以平方欧氏距离法为度量,对101份无芒雀麦种质材料进行聚类分析。结果表明(图2),可将101份材料分为4类,其 D 值介于0.37~2.55。

如图2所示,依据无芒雀麦材料的耐旱性综合 D 值将其划分为高度耐旱、中度耐旱、低度耐旱和旱敏感型材料4个等级。其中,第Ⅰ类包括10份种质材料,占总材料的9.90%,为极抗旱材料;第Ⅱ类包括38份材料,占总材料的37.62%,为中抗旱材料;第Ⅲ类包括42份种质材料,占总材料的41.58%,为低抗旱材料;第Ⅳ类包括11份种质材料,占总材料的10.89%,为旱敏感型材料。由图3可知,无芒雀麦不同耐旱等级的材料分布地区存在差异性,图(a)所示,以3份高等耐旱材料为例分布在明丰县和巴楚县,两地属于温带大陆性极端干旱气候,年降水量低,气候干旱,多风沙,且蒸发量大,该干旱条件与高耐旱无芒雀麦材料“耐极端干旱、深根吸水”的生理特性匹配;如图(d),而旱敏感型材料则分布在降水差异较大地区,主要在青河县和和静县。

3 讨论

3.1 无芒雀麦苗期耐旱性评价方法

牧草的耐旱性表现是一个综合性状,不同的种质资源耐旱性差异较大,需要多个指标的联合分析,不同的评价方法其结果也不尽相同^[23]。在植物耐旱性研究中,不同分析方法各有优势:聚类分析可通过量化种质间的性状差异,清晰呈现不同个体的遗传相似程度与亲缘关联,为后续分类筛选提供基础^[24];而隶属函数综合分析法基于模糊数学理论,能将多个独立测定的耐旱相关指标(如叶片相对含水量等)转化为统一的隶属度值,有效避免单一指标的局限性,使评价结果更具全面性、客观性与横向可比性,在多指标综合评估中准确性突出^[25-26]。已有研究也证实了多方法联合应用的有效性:如杨磊^[27]针对无芒雀麦苗期耐旱性,通过隶属函数法计算综合耐旱值,明确得出引进无芒雀麦种质的苗期耐旱能力显著优于本地无芒雀麦材料的结论;王一钊等^[28]利用隶属函数、主成分分析和聚类分析等综合评价了不同春小麦种质在苗期的耐旱性,筛选出耐旱种质材料,并将其分为三个不同

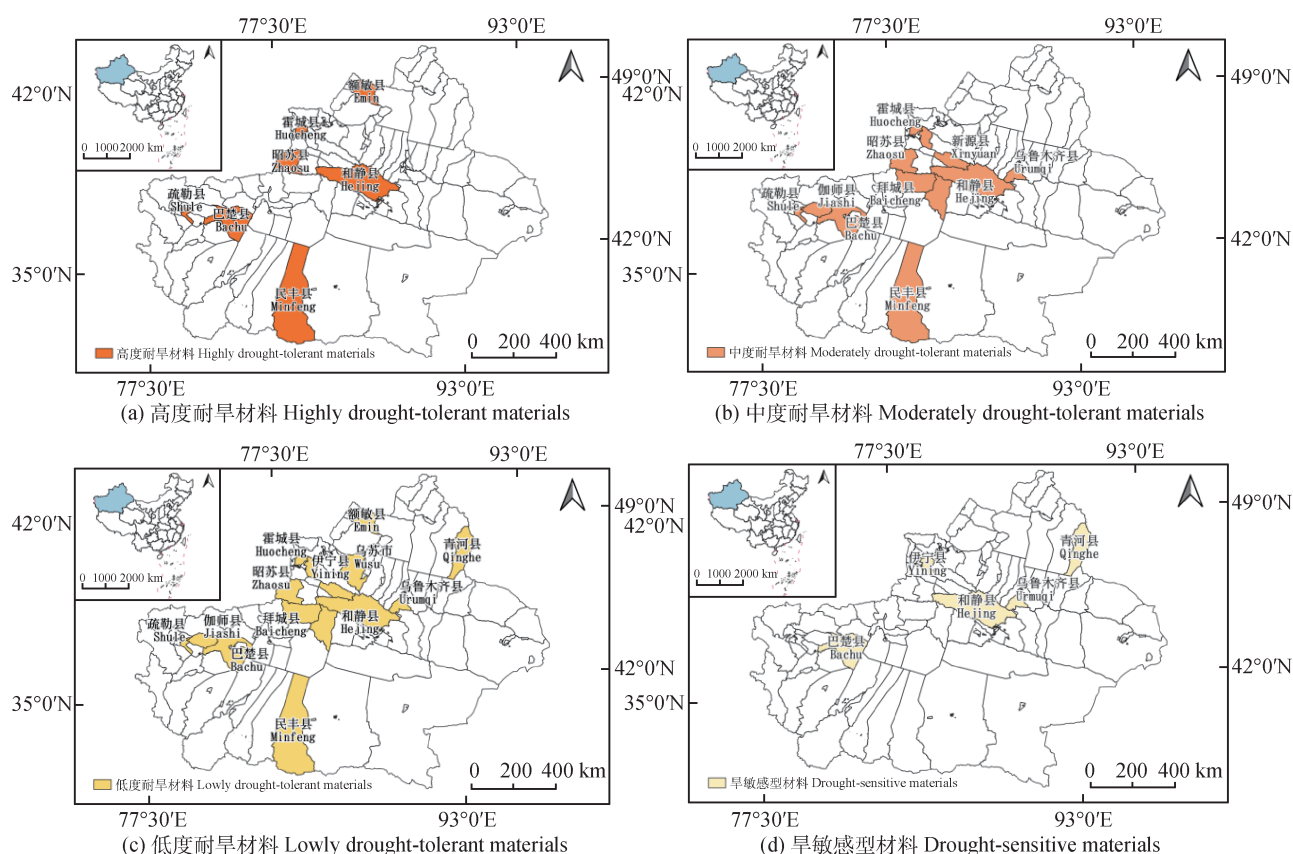


图3 无芒雀麦不同耐旱等级区域分布

Fig. 3 Regional distribution of *bromus* with different drought-tolerance levels

注:审图号为GS(2024)0650号

Note: The design review number is GS (2024) 0650

一致,如干旱处理使得鲜重根冠比、干重根冠比和根平均直径呈现增加趋势,其他根系指标呈现下降趋势,由此可以推断,干旱胁迫对无芒雀麦幼苗和地下的影响不同,在一定程度上抑制了地上部分生长,促进了地下根系的生长和粗化,进而增加根冠比,这一研究与白旭瑞^[31]研究结果一致。本研究在耐旱性鉴定及指标筛选时,发现株高、根长、苗鲜质量、叶片相对含水量、叶绿素含量均降低,且降低程度因材料的不同存在差异性,这与王睿等^[32]研究结果一致;赵佳佳等^[33]通过对小麦苗期根系性状及干旱特性分析,提出“最大根长和根生物量可作为旱地育种中耐旱高产优异种质筛选指标”,其核心逻辑“干旱下幼苗强化根生长,苗期壮根可保障生育后期单位株高干物质重量”,也与本研究中无芒雀麦的根系响应规律完全吻合。此外,本研究对17个指标和D值进行相关性分析,其中株高、根平均直径、地上鲜重、总根体积、根系表面积和根系投影面积的相关系数较高,这些指标与无芒雀麦耐旱能力相关,可作为耐旱性指标参考,这与张平等^[34]人

的研究结果一致。综上所述,株高、根平均直径、地上鲜重、总根体积、根系表面积、根系投影面积、地下鲜重、总根长、干重根冠比、最大根长、鲜重根冠比和地上干重12个指标可以作为无芒雀麦苗期耐旱性鉴定的重要参考指标。

3.3 无芒雀麦苗期耐旱性研究及未来展望

前人对无芒雀麦苗期耐旱性研究较少,植物苗期的耐旱性与其他发育阶段的耐旱性可能并不完全一致。本研究采用水培法育苗结合PEG模拟干旱,能精准解析干旱对植株苗期表型指标的响应速度与强度,既反映植株对干旱的适宜策略,也为评估植株耐旱能力、解析耐旱机制提供直接的表型依据,尤其对植株根系发育、生理代谢的短期影响,能为干旱响应基因挖掘、抗逆指标筛选提供可靠数据支撑。但无法完全模拟自然土壤环境,因此,需结合盆栽土壤干旱实验和田间干旱条件下进行验证,才能更好地将实验结论应用于田间生产中。未来研究应将多逆境复合胁迫机制研究,如“干旱-高温”

“干旱-盐碱”等田间复合胁迫下,为多逆境地区育苗提供理论支撑、挖掘抗逆基因与分子育种应用,研究成果向生产转化,让实验室研究与田间应用结合,建立抗逆性评价标准结合不同地区让研究成果落地。

4 结论

本文采用25% PEG-6000模拟干旱处理,通过对101份无芒雀麦种质材料的17个植株、根系的形态及生理指标测定,用主成分分析、相关性分析、隶属函数结合系统聚类等方法进行综合分析表明:苗期的株高、根平均直径、地上鲜重、总根体积、根系投影面积、地下鲜重、总根表面积、总根长、干重根冠比、最大根长、鲜重根冠比和地上干重可以作为无芒雀麦苗期耐旱性鉴定的重要指标。通过聚类分析,将101份试无芒雀麦材料分为4个耐旱等级,筛选出最耐旱材料和旱敏感型材料,本研究为无芒雀麦耐旱性评价和优异新品种选育提供了重要的理论支撑。

参考文献

- [1] 李阜灿,蔡晓蕊,格绒多吉,等. 青藏高原无芒雀麦不同部位营养价值差异及其分子结构特征解析[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250625.1546.002>, 2025-06-25/2025-09-05
LI F C, CAI X R, GE R D J, et al. Nutritional Variation and molecular structure characteristics in different fractions of bromus inermis from Qinghai-Tibet Plateau. Pratacultural Science [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250625.1546.002>, 2025-06-25/2025-09-05
- [2] 毛培春,孟林,高洪文,等. 20份无芒雀麦种质材料苗期抗旱性综合评价及光合特性分析[J]. 草地学报, 2011, 19(4): 619-624, 630
MAO P C, MENG L, GAO H W, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance and photosynthetic characteristic of 20 bromus inermis leyss. Accessions at seedling stage [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2011, 19(4): 619-624, 630
- [3] 程铭,骆秀梅,扈延成,等. 不同播种组合无芒雀麦产量构成因子的数量特征分析[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2015, 30(1): 43-48
CHENG M, LUO X M, HU Y C, et al. Cluster analysis and fuzzy comprehensive assessment on sowing scheme of *Bromus inermis* Leyss [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities, 2015, 30(1): 43-48
- [4] 郭孝,郭良兴,刘党标. 无芒雀麦在单播及混播下牧草产量和品质的分析[J]. 中国草食动物科学, 2018, 38(5): 62-65
GUO X, GUO L X, LIU D B. Analysis of forage yield and quality of *Bromus inermis* under monocropping and mixed sowing conditions [J]. Chinese Journal of Herbivore Science, 2018, 38(5): 62-65
- [5] 毛培春,孟林,高洪文,等. 39份无芒雀麦种质材料苗期抗旱性综合评价[J]. 草业科学, 2010, 27(11): 82-88
MAO P C, MENG L, GAO H W, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 39 bromus inermis germplasms at the seedling stage [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2010, 27(11): 82-88
- [6] 孙宇阳,李姣,张斌杰,等. PEG-6000胁迫不同无芒雀麦种质萌发期的抗旱性评价[J]. 贵州农业科学, 2025, 53(6): 31-41
SUN Y Y, LI J, ZHANG B J, et al. Evaluation on drought resistance of different bromus inermis germplasm resources at germination stage under PEG-6000 stress [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2025, 53(6): 31-41
- [7] 陈新,宋高原,张宗文,等. PEG-6000胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6): 1188-1195
CHEN X, SONG G Y, ZHANG Z W, et al. Identification and evaluation of drought resistance of naked oat (*Avena nuda* L.) under PEG-6000 stress at germination stage [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(6): 1188-1195
- [8] 潘多锋,张瑞博,李道明,等. 箭筈豌豆种质资源苗期抗旱性综合评价[J]. 草业科学, 2023, 40(1): 188-199
PAN D F, ZHANG R B, LI D M, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance in the *Vicia sativa* germplasm at the seedling stage [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(1): 188-199
- [9] 张芳,颜安,任毅,等. 新疆冬小麦萌发期抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(1): 100-112
ZHANG F, YAN A, REN Y, et al. Evaluation on drought resistance of winter wheat cultivars in Xinjiang [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(1): 100-112
- [10] 王兰芬,武晶,景蕊莲,等. 绿豆种质资源苗期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 145-153
WANG L F, WU J, JING R L, et al. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at seedlings stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 145-153
- [11] 李龙,毛新国,王景一,等. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价[J]. 作物学报, 2018, 44(7): 988-999
LI L, MAO X G, WANG J Y, et al. Drought Tolerance evaluation of wheat germplasm resources [J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(7): 988-999
- [12] 李瑞雪,孙任洁,汪泰初,等. 植物抗旱性鉴定评价方法及抗

- 旱机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2017, 33(7): 40-48
- LI R X, SUN R J, WANG T C, et al. Research progress on identification and evaluation methods, and mechanism of drought resistance in plants[J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(7): 40-48
- [13] 罗凤敏, 雷虹娟, 汪季, 等. 水肥调控对无芒雀麦品质的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(11): 2135-2140
- LUO F M, LEI H J, WANG J, et al. Effects of irrigation and fertilizer on quality of *Bromus inermis* [J]. Pratacultural Science, 2014, 31(11): 2135-2140
- [14] 朱亚琼, 郑伟, 王祥, 等. 混播方式对无芒雀麦+红豆草混播草地植物生长效率及混播效应的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(11): 2335-2346
- ZHU Y Q, ZHENG W, WANG X, et al. Effect of mixed pattern on growth efficiency and mixed advantage of *Bromus inermis*+*Onobrychis viciaefolia* mixture pasture [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(11): 2335-2346
- [15] SSEREMBA G, TONGOONA P, ELEBLU J, et al. Heritability of drought resistance in *Solanum aethiopicum* Shum group and combining ability of genotypes for drought tolerance and recovery[J]. Scientia Horticulturae, 2018(240): 213-220
- [16] YU F, WAN W, LÜ M J, et al. Molecular mechanism underlying the effect of the intraspecific alternation of seed size on plant drought tolerance[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2020, 68(3): 703-711
- [17] 吴雨涵. 高寒区无芒雀麦种质资源饲草生产性能评价筛选及抗旱性研究[D]. 西宁: 青海大学, 2023: 3-4
- WU Y H, Evaluation and screening of forage production performance and drought resistance *Bromus inermis* Leyss germplasm resources in alpine region [D]. Xining: Qinghai University, 2023: 3-4
- [18] 李丹宁, 刘琪琪, 万懿琦, 等. 12个青贮玉米苗期抗旱性综合评价[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 23-30
- LI D N, LIU Q Q, WAN Y Q, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance in 12 silage maize seedlings[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 55(1): 23-30
- [19] 尤燕聪. 小麦苗期抗旱种质的筛选与鉴定[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023: 44
- YOU Y C. Screening and identification of drought-resistant wheat germplasm at seedling stage [D]. Alaer: Tarim University, 2023: 44
- [20] 刘小慧, 王重丽, 王梦茹, 等. 圭亚那柱花草苗期抗旱性评价及抗旱种质鉴定[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 956-967
- LIU X H, WANG Z L, WANG M R, et al. Evaluation on drought-resistance of *Stylosanthes guianensis* and identification for drought-resistance germplasm in seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4): 956-967
- [21] 陈爱葵, 韩瑞宏, 李东洋, 等. 植物叶片相对电导率测定方法比较研究[J]. 广东教育学院学报, 2010, 30(5): 88-91
- CHEN A K, HAN R H, LI D Y, et al. A comparison of two methods for electrical conductivity about plant leaves [J]. Journal of Guangdong Education Institute, 2020, 28(4): 956-967
- [22] 李贺洋, 黄悠, 陈超超, 等. 黄花苜蓿种质资源苗期抗旱性鉴定评价[J]. 中国草地学报, 2023, 45(10): 34-45
- LI H Y, HUANG Y, CHEN C C, et al. Evaluation of drought resistance in seedling stage germplasm resources of *Medicago falcata* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(10): 34-45
- [23] 杨维强, 张晗, 姜吉顺, 等. 白三叶抗旱种质资源筛选及抗旱评价指标筛选[J]. 草地学报, 2025, 33(5): 1510-1522
- YANG W Q, ZHANG H, JIANG J S, et al. Screening of drought-tolerant germplasm resources of white clover and analysis of drought tolerance evaluation index [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5): 1510-1522
- [24] 魏忠芬, 李慧琳, 奉斌, 等. 贵州紫苏种质资源表型性状的遗传多样性[J]. 西南农业学报, 2017, 30(1): 45-52
- WEI Z F, LI H L, FENG B, et al. Genetic diversity of phenotype characters of *perilla frutescens* germplasm resources in Guizhou [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(1): 45-52
- [25] 闫志利, 牛俊义, 席玲玲, 等. 水分条件对豌豆保护酶活性及膜脂过氧化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 554-559
- YAN Z L, NIU J Y, XI L L, et al. Effect of soil water on protective enzyme activity and membrane lipid peroxidation in pea [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(3): 554-559
- [26] 姜慧新, 柏杉杉, 吴波, 等. 22个燕麦品种在黄淮海地区的农艺性状与饲草品质综合评价[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 140-149
- JIANG H X, BAI S S, WU B, et al. A multivariate evaluation of agronomic traits and forage quality of 22 oat varieties in the Huang-Huai-Hai area of China [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2021, 30(1): 140-149
- [27] 杨磊. 干旱胁迫对本地和引进无芒雀麦种子萌发及幼苗生理活性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017: 41-42
- YANG L. Effects of drought stresses on seed germination and physiological activities of *bromus inermis* and *bromus stamineus* [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017: 41-42
- [28] 王一钊, 杨其志, 刘玉秀, 等. 20% PEG 胁迫下评价引进哈萨克斯坦不同春小麦种质苗期的抗旱性[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(6): 1352-1360

- WANG Y Z, YANG Q Z, LIU Y X, et al. Evaluation of drought resistance of different spring wheat germplasm introduced from Kazakhstan during seedling stage under 20% PEG stress [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(6): 1352-1360
- [29] 赵小娜, 高志昊, 王斌, 等. 15份饲用型燕麦种质材料苗期抗旱性比较与评价[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3734-3743
- ZHAO X N, GAO Z H, WANG B, et al. Comparison and evaluation of drought resistance of 15 forage-type oat germplasm materials at seedling stage [J]. Acta Agraria Sinica, 2023, 31(12): 3734-3743
- [30] 曲可佳, 时晓磊, 张恒, 等. PEG处理下引进春小麦品种苗期抗旱性评价[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(6): 1363-1371
- QU K J, SHI X L, ZHANG H, et al. Evaluation of drought resistance of introduced spring wheat under PEG treatment [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(6): 1363-1371
- [31] 白旭瑞. 小麦苗期抗旱性鉴定及抗旱品种筛选[D]. 保定: 河北农业大学, 2021: 9
- BAI X R. Identification of drought resistance of wheat at seedling stage and selection of drought resistant varieties [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021: 9
- [32] 王睿, 马前, 李魁印, 等. PEG-6000模拟干旱胁迫对糯高粱幼苗生理特性的影响[J]. 作物研究, 2024, 38(3): 163-172
- WANG R, MA Q, LI K Y, et al. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on physiological characteristics of glutinous sorghum seedlings [J]. Crop Research, 2024, 38(3): 163-172
- [33] 赵佳佳, 乔玲, 武棒棒, 等. 山西省小麦苗期根系性状及抗旱特性分析[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 714-727
- ZHAO J J, QIAO L, WU B B, et al. Seedling root characteristics and drought resistance of wheat in Shanxi province [J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(4): 714-727
- [34] 张平, 刘永江, 孔治有, 等. 干旱及复水处理对不同小麦品种(系)苗期生长指标的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(1): 22-28
- ZHANG P, LIU Y J, KONG Z Y, et al. Effects of drought and rewater on the growth indicators of seedlings in different wheat varieties (lines), 2021, 36(1): 22-28
- (责任编辑 付 宸)