

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.015

引用格式:刘璋,杨森,郭晶瑜,等.基于隶属函数法的燕麦苗期耐旱性评价与种质筛选[J].草地学报,2026,34(6):2118—2127

LIU Zhang, YANG Miao, GUO Jing-yu, et al. Evaluation and Screening of Drought Tolerance Germplasm during the Seedling Stage of Oats Based on the Membership Function Method[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2118—2127

基于隶属函数法的燕麦苗期耐旱性评价与种质筛选

刘璋¹, 杨森², 郭晶瑜², 刘欣悦³, 张卫卫³, 马名川¹, 张笑^{2*}, 刘龙龙^{1*}

(1. 山西农业大学农业基因资源研究中心, 山西太原 030031;

2. 太原师范学院生物科学与技术学院, 山西晋中 030619; 3. 山西农业大学农学院, 山西晋中 030801)

摘要:华北和西北地区作为我国燕麦(*Avena sativa* L.)主产区,长期受干旱胁迫制约,导致燕麦产量受损。筛选抗旱种质资源是实现该区域燕麦稳产增效的核心策略。本研究以99个燕麦种质为材料,采用10% PEG-6000溶液模拟干旱条件(以Hoagland溶液为对照),系统测定苗期地上部分与根系共16项生长指标,并基于隶属函数法、主成分分析等分析方法和线性回归模型,综合评价供试材料的抗旱性。结果表明,干旱胁迫下所有性状均呈下降趋势,其中地上部干重、总根长、根尖数和根分叉数对干旱响应尤为敏感。最终,本研究将99份燕麦种质划分为3个抗旱等级,筛选出ZYC-101, ZYC-38, AM-124等10个强耐旱种质,为燕麦抗逆育种提供了理论依据,也为抗旱种质资源的大规模筛选与利用奠定了应用基础。

关键词:燕麦;苗期;耐旱性;种质评价

中图分类号:Q944

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2118-10

Evaluation and Screening of Drought Tolerance Germplasm during the Seedling Stage of Oats Based on the Membership Function Method

LIU Zhang¹, YANG Miao², GUO Jing-yu², LIU Xin-yue³, ZHANG Wei-wei³,
MA Ming-chuan¹, ZHANG Xiao^{2*}, LIU Long-long^{1*}

(1. Agricultural Gene Resources Research Center, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi Province 030031, China;

2. College of Biological Science and Technology, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi Province 030619, China;

3. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi Province 030801, China)

Abstract: The North and Northwest regions of China are major oat-producing areas. However, persistent drought stress there leads to significant yield losses of oat production. The identification of drought-resistant germplasm resources is therefore a core strategy for achieving stable and even enhanced oat production in these regions. In this study, 99 oat germplasm accessions were evaluated under simulated drought conditions using a 10% PEG-6000 solution, with Hoagland's solution serving as the control. A total of 16 growth traits—including both aboveground and root parameters—were systematically measured at the seedling stage. Drought resistance was comprehensively assessed through membership function analysis, principal component analysis, and linear regression modeling. The results revealed a general decline in all measured traits under drought stress, with aboveground dry weight, total root length, root tip number, and root fork number showing particularly high sensitivity. Based on the integrated evaluation, the 99 oat accessions were classified into three drought-resistance categories, and ten highly drought-tolerant lines—including ZYC-101, ZYC-38, and AM-124—

收稿日期:2025-09-05;修回日期:2025-11-01

基金项目:山西农业大学科技创新提升工程(CXGC2023097);国家燕麦荞麦产业技术体系(CARS-07-A-2);山西省重点研发计划项目(2022ZDYF110)资助

作者简介:刘璋(1986-),男,汉族,内蒙古丰镇人,副研究员,硕士,主要从事燕麦遗传育种及栽培的研究,E-mail:liuzhang162@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: lllong781211@sina.com; bjfuzhx@163.com

were identified. This work not only provides a theoretical foundation for stress-resilient oat breeding but also establishes a practical framework for the large-scale screening and utilization of drought-tolerant germplasm resources.

Key words: Oat; Seedling stage; Drought tolerance; Germplasm evaluation

全球气候变暖正日益加剧,其引发的高温、干旱和盐碱化等非生物胁迫,已在全球范围内成为制约农作物产量的主要因素^[1]。其中,干旱胁迫尤为突出,被广泛认为是影响作物生产并威胁粮食安全的主要因素之一^[2-3]。众多研究已经揭示了干旱对作物生长的负面影响。根系作为首先感知干旱并作出响应的器官,在植物水分和养分吸收中发挥着重要作用,进而影响作物的生长与胁迫适应能力^[4]。根系结构(Root system architecture, RSA)可以直接反映根系功能,其涵盖的形态特征,如根长、根表面积等对作物水分利用效率具有重要影响^[5-6]。Guo等^[7]的研究表明,在干旱条件下,根干重、根表面积、根体积、平均侧根角度以及侧根数量均呈现下降趋势。同样,Zhou等^[8]的研究发现干旱显著抑制了根长和根长密度,但却使根直径和根生物量比有所上升。Esan等^[9]采用聚乙二醇-6000(PEG-6000)模拟干旱胁迫,结果表明,所有20份测试种质的平均根直径和侧根数目均出现减少。有研究人员在比较不同品种的马铃薯响应时指出,耐旱基因型在干旱环境中往往形成更为细长的根系,而不耐旱品种的根长则变化不显著;同时,耐旱材料的根直径下降幅度也较为缓和^[10]。这些调整有助于植物在干旱环境中更有效地获取有限的水分和养分,从而增强其抗旱能力^[11]。与此同时,干旱也对植物地上部分产生影响。最早出现的缺水症状通常是膨压丧失,进而抑制细胞扩展与生长,尤其在茎和叶部位表现明显^[12]。干旱严重影响了植物的生长,导致其发育迟缓、叶片变小,并出现叶子枯萎、萎黄和变黄的现象^[13]。Zhang等^[14]认为,干旱条件下生物量的减少可归因于叶面积缩小和光合速率下降,后者往往由光合色素含量降低等生化限制引起。在研究多种药用植物(如车前子等)时发现,随干旱程度加重,植株的地上部重量和株高均显著低于正常水分条件下的植株^[15]。Albiski等^[16]的研究表明,株高、茎粗、叶面积、鲜重与干重以及植株含水量均因水分亏缺而下降。因此,在评估干旱对作物影响的过程中,需综合考察地上部与根系响应,从而系统解析植株抗旱机制,为耐旱种质的选育提供全面依据。

燕麦(*Avena sativa* L.)作为全球主要谷物作物

之一,广泛用于食品、饲料和工业加工^[17]。燕麦在中国的主要种植区域为西北、西南及华北等地,而华北地区近年来面临日益严重的干旱问题,这不仅制约了当地社会经济可持续发展,也对燕麦生产与产业发展构成严峻挑战^[18-20]。尽管燕麦具有较强的耐旱性,但持续干旱仍会影响其产量^[21]。因此,筛选和推广抗旱燕麦种质已成为应对粮食安全挑战、推动农业可持续发展的重要策略,也有助于深入理解燕麦在干旱条件下的产量潜力与适应机制^[22-23]。

隶属函数分析在多种筛选与评价方法中展现出优势。该方法能够基于一系列与胁迫响应相关的性状对基因型进行综合评价,而非依赖单一性状指标,从而提高了筛选的全面性与可靠性^[24]。例如,Zhang等^[25]通过分析幼苗生长特性,对100个燕麦品种的耐盐性进行了系统评估,构建了耐盐性评价体系,筛选出一批耐盐种质。Nabi等^[26]则在两个地点开展低温胁迫试验,对56个燕麦基因型的营养与产量相关性状进行了测定,最终筛选出5个兼具耐寒性、高营养品质和高产潜力的优良基因型。上述研究表明,基于多性状综合评估的隶属函数分析方法,在作物耐逆性筛选和品质改良中表现出较强的适用性和潜力,为遗传育种与品质提升提供了更为全面和可靠的分析手段。

本研究以99份不同的燕麦种质为材料,通过模拟干旱胁迫(10% PEG-6000处理),结合苗期形态指标(株高、茎粗、第一叶长、第一叶宽、主根长、总根长等16项生长指标)建立综合评价体系,利用主成分分析和聚类分析对不同燕麦种质幼苗的耐旱性差异进行分析,通过构建线性方程,最终筛选出综合性状优良的耐旱种质,旨在为燕麦抗旱种质的精准利用和新品种培育提供更具针对性的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为选择的99个燕麦核心种质资源,均由山西农业大学农业基因资源研究中心提供,种质信息如表1所示。

表 1 供试燕麦种质

Table 1 Tested oat germplasms

种质编号 Germplasm number	种质名称 Germplasm name	种质编号 Germplasm number	种质名称 Germplasm name	种质编号 Germplasm number	种质名称 Germplasm name
1	ZYC-11	34	ZYC-45	67	ZYC-78
2	ZYC-12	35	ZYC-46	68	ZYC-79
3	ZYC-13	36	ZYC-47	69	ZYC-80
4	ZYC-14	37	ZYC-48	70	AM-81
5	ZYC-16	38	ZYC-49	71	AM-82
6	ZYC-17	39	ZYC-50	72	AM-83
7	ZYC-18	40	ZYC-51	73	AM-84
8	ZYC-19	41	ZYC-52	74	AM-85
9	ZYC-20	42	ZYC-53	75	AM-86
10	ZYC-21	43	ZYC-54	76	AM-87
11	ZYC-22	44	ZYC-55	77	AM-88
12	ZYC-23	45	ZYC-56	78	AM-89
13	ZYC-24	46	ZYC-57	79	AM-90
14	ZYC-25	47	ZYC-58	80	ZYC-101
15	ZYC-26	48	ZYC-59	81	ZYC-102
16	ZYC-27	49	ZYC-60	82	ZYC-103
17	ZYC-28	50	ZYC-61	83	ZYC-104
18	ZYC-29	51	ZYC-62	84	ZYC-105
19	ZYC-30	52	ZYC-63	85	ZYC-106
20	ZYC-31	53	ZYC-64	86	ZYC-108
21	ZYC-32	54	ZYC-65	87	ZYC-109
22	ZYC-33	55	ZYC-66	88	ZYC-110
23	ZYC-34	56	ZYC-67	89	AM-120
24	ZYC-35	57	ZYC-68	90	AM-121
25	ZYC-36	58	ZYC-69	91	AM-122
26	ZYC-37	59	ZYC-70	92	AM-123
27	ZYC-38	60	ZYC-71	93	AM-124
28	ZYC-39	61	ZYC-72	94	AM-125
29	ZYC-40	62	ZYC-73	95	AM-126
30	ZYC-41	63	ZYC-74	96	AM-127
31	ZYC-42	64	ZYC-75	97	AM-129
32	ZYC-43	65	ZYC-76	98	AM-130
33	ZYC-44	66	ZYC-77	99	AM-131

1.2 试验方法

选用 10% PEG-6000 的 1:2 Hoagland 营养液作为处理组模拟干旱胁迫环境,并以正常 1:2 Hoagland 营养液作为对照组。挑选饱满、一致、无病虫害的燕麦种子,经 2% 的次氯酸钠消毒 15 min 后用无菌水冲洗至干净无味,均匀铺在放有双层滤纸的培养皿中。向培养皿中加入 10 mL 蒸馏水后将其置于光照培养箱中。光照培养箱的昼夜温度分别为 25℃ 和 20℃。光照强度为 6000 lx,每天 16 h,平均相对湿度为 65%。种子出苗后,挑选生长状况一致的幼苗放置于盛有蒸馏水的育苗盘中,待幼苗生长为两叶一心时进行胁迫处理。同时,对照组溶液更换为 1:2 Hoagland 营养液。每 3 天更换营养液,7 天后进行测定。

1.3 指标测定

从每个种质的每组处理中选取 10 株燕麦幼苗进行测定。使用直尺测量植株株高、第一叶长、第二叶长、第一叶宽;使用游标卡尺测量茎粗;使用天

平测量地上部鲜重;采用烘干法测量地上部干重。

本研究采用 MICROTEK 扫描仪(型号:MRS-9600TFU2L)对根部指标进行扫描分析。这些指标涵盖了主根长、总根长、根投影面积、根表面积、根系平均直径、根尖数、根分叉数,使用天平测量根鲜重,采用烘干法测量根干重。为确保数据的准确性和可靠性,每项指标均进行了三次重复测量。

1.4 数据统计分析及评价方法

利用 Microsoft Excel 进行数据的基础整理,采用 SPSS 26.0, R4.5.1 软件以及派森诺基因云平台(<https://www.genescloud.cn/home>)对数据进行相关性分析、主成分分析及聚类分析,具体公式如下:

通过公式(1)计算变异系数,消除了量纲影响,可跨数据集比较变异水平^[27]。

$$CV = \frac{\text{标准差}}{\text{平均值}} \quad (1)$$

运用公式(2)以每一个测定指标 3 次重复的平均值为基础数据。计算每个测定指标的耐旱系数^[28]。

耐旱系数 = $\frac{\text{干旱胁迫处理平均值}}{\text{对照处理平均值}} \times 100\%$ (2)

对各指标的耐旱系数进行主成分分析,按照公式(3)计算权重,式中 W_j 表示第 j 个指标的权重, P_i 表示第 i 个指标的方差贡献率。

$$w_i = \frac{p}{\sum_{i=1}^n P_i}, i = 1, \dots, n$$
 (3)

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对燕麦生长指标的影响

本研究系统比较了 99 份燕麦种质在干旱处理前后地上部与根系形态的表型变化。统计分析结果表明,干旱胁迫下燕麦的生长发育总体受到抑制

(表 2)。具体而言,16 项生长指标,包括地上部形态指标(株高、茎粗、地上部鲜重、地上部干重)、叶片形态参数(第一叶长、第一叶宽、第二叶长)、根系构型(主根长、总根长、根投影面积、根表面积、根系平均直径、根尖数、根分叉数)、根鲜重和干重,其均值较对照组均呈现下降趋势。与之相反,茎粗和根系平均直径则呈现上升趋势。

表 3 进一步展示了 16 个指标中所有耐旱系数的变化情况。结果显示,多数种质的耐旱系数小于 1,这表明干旱胁迫对生长具有普遍的抑制作用。在所调查的性状中,总根长耐旱系数的变异幅度最大(0.11~10.71),表明该性状对于干旱响应较为敏感;而第一叶宽的耐旱系数变异范围最小(0.44~1.67),说明其受干旱影响相对较小。

表 2 10% PEG-6000 处理对燕麦幼苗生长性状的影响

Table 2 The effect of 10% PEG-6000 treatment on the growth traits of oat seedlings

性状 Traits	对照组 Control group	处理组 Treatment group
株高 Plant height/cm	3.69±1.18 ^a	3.26±1.11 ^a
茎粗 Stem diameter/mm	1.11±0.81 ^a	1.68±0.50 ^a
地上部鲜重 Shoot fresh weight/g	3.69±1.18 ^a	0.31±0.16 ^a
地上部干重 Shoot dry weight/g	0.04±0.02 ^a	0.04±0.04 ^a
第一叶长 The length of the first leaf/cm	12.83±3.72 ^a	11.61±3.10 ^a
第二叶长 The length of the second leaf/cm	12.02±3.22 ^a	10.77±3.59 ^a
第一叶宽 The width of the first leaf/cm	0.49±0.08 ^a	0.46±0.08 ^a
主根长 Primary root length/cm	15.67±16.00 ^a	10.80±4.55 ^a
总根长 Total root length/cm	135.47±76.76 ^a	93.68±67.36 ^b
根投影面积 Area of root projection/cm ²	5.38±2.93 ^a	4.18±2.53 ^a
根表面积 The root surface area/cm ²	16.97±9.24 ^a	12.98±7.78 ^a
根系平均直径 Average diameter of root system/cm	0.42±0.13 ^a	0.49±0.18 ^a
根尖数 Number of root tips/个	421.02±389.34 ^a	285.39±258.06 ^b
根分叉数 The number of root forks/个	605.16±551.75 ^a	474.77±424.08 ^b
根鲜重 Root fresh weight/g	0.28±0.16 ^a	0.22±0.14 ^a
根干重 Root dry weight/g	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a

注:数据为平均值±标准差。不同小写字母为同一燕麦种质在不同处理下差异显著($P<0.05$)

Note: The data is the mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences in the same oat germplasm under different treatments ($P<0.05$)

表 3 99 份燕麦种质在干旱胁迫下各性状统计描述

Table 3 Statistical description of traits in 99 oat germplasms accessions under drought stress

性状 Traits	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV
株高 Plant height/cm	0.25	3.00	0.92	0.29	0.31
茎粗 Stem diameter/mm	0.33	3.00	0.96	0.29	0.30
地上部鲜重 Shoot fresh weight/g	0.25	5.28	0.87	0.38	0.44
地上部干重 Shoot dry weight/g	0.07	6.83	1.04	0.67	0.64
第一叶长 The length of the first leaf/cm	0.35	3.32	0.84	0.28	0.33
第二叶长 The length of the second leaf/cm	0.16	2.74	0.92	0.29	0.31
第一叶宽 The width of the first leaf/cm	0.44	1.67	0.97	0.19	0.19
主根长 Primary root length/cm	0.07	3.04	0.82	0.37	0.45
总根长 Total root length/cm	0.08	3.94	0.77	0.52	0.67
根投影面积 Area of root projection/cm ²	0.10	5.15	0.86	0.48	0.56
根表面积 The root surface area/cm ²	0.10	4.02	0.84	0.45	0.53
根系平均直径 Average diameter of root system/cm	0.48	2.75	1.19	0.33	0.28
根尖数 Number of root tips/个	0.11	10.71	0.94	0.90	0.96
根分叉数 The number of root forks/个	0.11	8.88	0.99	0.87	0.88
根鲜重 Root fresh weight/g	0.08	4.36	0.86	0.47	0.55
根干重 Root dry weight/g	0.13	6.00	0.97	0.51	0.53

2.2 燕麦耐旱性综合评价

2.2.1 干旱胁迫下燕麦苗期各指标的相关性及主成分分析 相关性分析结果表明,在10% PEG-6000模拟的干旱胁迫条件下,燕麦苗期地上部的大多数生长指标之间呈现显著的正相关关系($P < 0.05$)(图1)。其中,燕麦幼苗的第一叶长与株高、

茎粗、地上部鲜重之间均存在极显著正相关关系($P < 0.001$),第一叶宽与茎粗、地上部鲜重、地上部干重之间呈显著正相关($P < 0.05$)。此外,燕麦苗期根部的大多数生长指标间也存在显著的正相关关系($P < 0.05$)(图1)。燕麦苗期总根长与根投影面积、根表面积、根系平均直径、根尖数及根分叉数之间

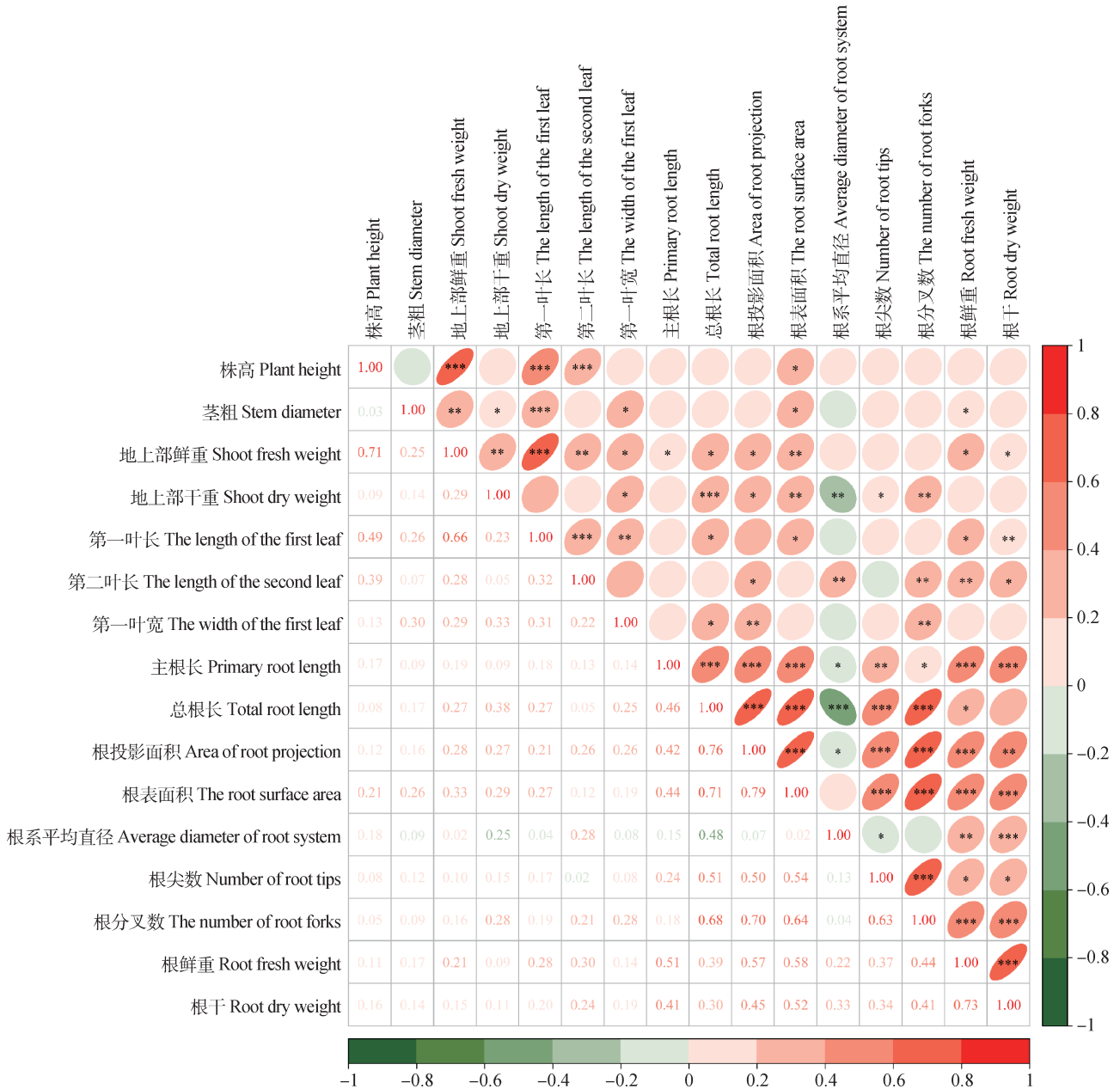


图1 燕麦幼苗各生长性状间相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis among growth traits of oat seedlings

注:图中通过颜色映射表示相关系数强度,深红色(接近1)表示强正相关,深绿色(接近-1)表示强负相关。靠近下方的每个单元格标注了相关系数值(保留两位小数),靠近上方的每个单元格标注了显著性(* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$),对角线显示自身相关($r = 1.00$)

Note: The intensity of the correlation coefficient is represented by color mapping. Dark red (close to 1) indicates a strong positive correlation, and dark green (close to -1) indicates a strong negative correlation. Each cell in the lower portion displays the correlation coefficient value (rounded to two decimal places), while the upper portion indicates statistical significance (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$). The diagonal displays identity correlations ($r = 1.00$)

均存在极显著正相关关系($P<0.001$),根系平均直径与根尖数、根分叉数、根鲜重、根干重之间也存在极显著正相关关系($P<0.001$)。本研究结果揭示了燕麦在干旱响应过程中各性状间存在复杂的相互作用关系,表明仅通过单一指标难以全面、准确地评价其耐旱性。因此,为更系统、客观地评估燕麦的耐旱能力,有必要采用多元统计方法,以实现更为科学和综合的抗旱性评价。

基于燕麦幼苗各指标耐旱系数的计算,对 99 个不同燕麦种质幼苗的指标进行主成分分析。统计分析表明,当达到 7 个主成分时,累计方差贡献率达到 80.41%,可有效反映出 16 项测定指标的绝大部

分信息(表 4)。因此,将测定的 16 项指标转换成 7 个综合指标,用于下一步燕麦耐旱性综合评价值计算。成分得分系数矩阵能反映出各个评价指标对主成分的影响程度。在主成分 1 中,主根长、根投影面积及根分叉数是第 1 主成分的主要指标,相关系数均为 0.17。该主成分与根的生长密切相关。第 2 主成分与地上部鲜重的相关性较大,相关系数为 0.26,说明该主成分与燕麦幼苗地上部分的指标较为密切,反映了燕麦幼苗地上部分物质质量积累的情况。而第 4 和第 7 主成分与茎粗的相关性较大,相关系数分别为 0.48 和 0.65,说明该主成分与燕麦幼苗横向生长密切相关(表 5)。

表 4 10% PEG-6000 模拟下的总方差解释

Table 4 Total variance explained under 10% PEG-6000 simulation

成分 Ingredients	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract the sum of squares of the loads		
	特征值	方差贡献率	累积	特征值	方差贡献率	累积
	Characteristic value	Variance contribution rate	Cumulative/%	Characteristic value	Variance contribution rate	Cumulative/%
1	4.55	28.45	28.45	4.55	28.45	28.45
2	2.39	14.96	43.41	2.39	14.96	43.41
3	1.81	11.31	54.72	1.81	11.31	54.72
4	1.32	8.26	62.99	1.32	8.26	62.99
5	1.12	6.99	69.98	1.12	6.99	69.98
6	0.86	5.40	75.38	0.86	5.40	75.38
7	0.81	5.03	80.41	0.81	5.03	80.41

表 5 10% PEG-6000 模拟下成分得分系数矩阵

Table 5 Component score coefficient matrix under 10% PEG-6000 simulation

成分 Ingredients	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	主成分 4 Principal component 4	主成分 5 Principal component 5	主成分 6 Principal component 6	主成分 7 Principal component 7
株高 Plant height	0.08	0.31	-0.13	-0.24	-0.16	0.16	-0.01
茎粗 Stem diameter	0.05	0.02	-0.19	0.48	0.11	-0.20	0.65
地上部鲜重 Shoot fresh weight	0.10	0.26	-0.21	-0.07	-0.13	0.22	-0.09
地上部干重 Shoot dry weight	0.09	-0.05	-0.23	0.10	0.23	0.64	-0.20
第一叶长 The length of the first leaf	0.09	0.24	-0.22	0.10	0.03	-0.20	0.20
第二叶长 The length of the second leaf	0.07	0.21	0.13	-0.33	0.03	-0.38	0.14
第一叶宽 the width of the first leaf	0.07	0.04	-0.16	0.11	0.53	-0.45	-0.57
主根长 Primary root length	0.11	-0.02	0.06	0.22	-0.57	-0.25	-0.35
总根长 Total root length	0.17	-0.19	-0.09	-0.13	-0.10	-0.07	0.04
根投影面积 Area of root projection	0.17	-0.13	0.07	-0.12	0.05	-0.13	-0.07
根表面积 The root surface area	0.16	-0.04	0.03	0.10	-0.05	0.32	-0.02
根系平均直径 Average diameter of root system	-0.03	0.21	0.34	-0.01	0.29	0.22	0.18
根尖数 Number of root tips	0.15	-0.15	0.02	-0.17	-0.01	0.01	0.41
根分叉数 The number of root forks	0.17	-0.12	0.10	-0.22	0.26	0.00	0.12
根鲜重 Root fresh weight	0.13	0.08	0.29	0.31	-0.05	0.05	0.02
根干重 Root dry weight	0.11	0.11	0.29	0.25	0.08	0.07	-0.22

2.2.2 干旱胁迫下各指标的主成分得分 以 99 个不同燕麦种质幼苗的 16 个生长性状对应的主成分值为系数构建线性方程:

$$y_1=0.079x_1+0.051x_2+0.104x_3+0.087x_4+0.092x_5+0.074x_6+0.071x_7+0.109x_8+0.173x_9+0.174x_{10}+0.156x_{11}-0.030x_{12}+0.145x_{13}+0.166x_{14}+$$

$$0.125x_{15}+0.110x_{16}$$

$$y_2=0.305x_1+0.018x_2+0.260x_3-0.051x_4+0.235x_5+0.213x_6+0.035x_7-0.017x_8-0.185x_9-0.126x_{10}-0.043x_{11}+0.214x_{12}-0.148x_{13}-0.118x_{14}+0.076x_{15}+0.114x_{16}$$

$$y_3=-0.131x_1-0.191x_2-0.212x_3-0.230x_4-0.222x_5+0.125x_6-0.161x_7+0.056x_8-0.093x_9+0.068x_{10}+0.034x_{11}+0.343x_{12}+0.022x_{13}+0.104x_{14}+0.285x_{15}+0.288x_{16}$$

$$y_4=-0.242x_1+0.483x_2-0.071x_3+0.100x_4+0.098x_5-0.327x_6+0.106x_7+0.217x_8-0.128x_9-0.124x_{10}+0.103x_{11}-0.009x_{12}-0.168x_{13}-0.219x_{14}+0.306x_{15}+0.249x_{16}$$

$$y_5=-0.164x_1+0.114x_2-0.134x_3+0.231x_4+0.032x_5+0.034x_6+0.532x_7-0.567x_8-0.096x_9+0.053x_{10}-0.051x_{11}+0.291x_{12}-0.012x_{13}+0.260x_{14}-0.053x_{15}+0.080x_{16}$$

$$y_6=0.162x_1-0.203x_2+0.216x_3+0.639x_4-0.202x_5-0.383x_6-0.452x_7-0.248x_8-0.066x_9-0.125x_{10}+0.324x_{11}+0.223x_{12}+0.012x_{13}+0.001x_{14}+0.050x_{15}+0.066x_{16}$$

$$y_7=-0.010x_1+0.65x_2-0.090x_3-0.198x_4+0.202x_5+0.137x_6-0.567x_7-0.346x_8+0.038x_9-0.070x_{10}-0.018x_{11}+0.176x_{12}+0.408x_{13}+0.119x_{14}+0.018x_{15}-0.220x_{16}$$

式中, $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7$ 代表7个主成分值; $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}$ 分别代表燕麦种质苗期的株高、茎粗、地上部鲜重、地上部干重、第一叶长、第二叶长、第一叶宽、主根长、总根长、根投影面积、根表面积、根系平均直径、根尖数、根分叉数、根鲜重、根干重的标准化值。计算7个主成分因子得分的贡献率权重(0.354, 0.186, 0.141, 0.103, 0.087, 0.067, 0.062)进而得出综合公式:

$$Y=0.354y_1+0.186y_2+0.141y_3+0.103y_4+0.087y_5+0.067y_6+0.062y_7$$

利用以上公式,可计算出99个不同燕麦种质幼苗生长性状的综合得分(表6)。综合得分越高,说明其综合性状表现越好。99个不同燕麦种质幼苗生长性状的综合得分范围为0.55~1.19。得分最高的是ZYC-101,得分1.19;其次是ZYC-38,得分1.09;得分最低的是ZYC-43,得分0.55。

2.2.3 干旱胁迫下燕麦种质资源的耐旱性聚类分析 基于耐旱系数综合评价,对99份燕麦种质进行

耐旱性排序,利用系统聚类方法,对其进行聚类分析(图2)。由分析结果可知,在10% PEG-6000模拟的干旱胁迫下,99份燕麦种质可划分为3大类。第1类是强耐旱种质,包括ZYC-101, ZYC-38, AM-124, ZYC-57, AM-85, ZYC-13, ZYC-31, ZYC-42, ZYC-11, AM-121共10个燕麦种质。第3类是弱耐旱种质,包括ZYC-43, ZYC-33, ZYC-39, ZYC-36, ZYC-37, ZYC-53, ZYC-25, ZYC-45, ZYC-41, ZYC-34, ZYC-52, ZYC-73, ZYC-61, ZYC-60, ZYC-110, ZYC-79, ZYC-108, ZYC-72, AM-126, ZYC-23, ZYC-103, ZYC-80, ZYC-56, AM-123共24个燕麦种质。其他65个种质均为第2类,属于中度耐旱种质。

3 讨论

3.1 干旱胁迫对燕麦形态指标的影响

在干旱胁迫下,燕麦的生长发育受到显著抑制,最终对产量造成不利影响^[21,29]。为应对气候变化,选育抗旱性强的燕麦种质已成为保障其产量稳定的关键策略^[30-31]。已有研究表明,干旱胁迫可导致燕麦根系干重与根长降低,同时抑制株高与叶长的伸长^[32]。此外,幼苗株高、叶面积、根长及生物量积累受干旱抑制的现象已被广泛报道^[33]。在本研究中,通过10% PEG模拟干旱胁迫,系统评价了99份燕麦种质资源的抗旱性。结果显示,除了茎粗和根系平均直径外,其余生长指标均受到抑制。这与前人的研究结果一致^[34-36]。其中,茎粗、地上部干重、根系平均直径和根干重的平均降幅最低,表明这些性状在胁迫条件下保持相对稳定;但主根长、总根长、根尖数和根分叉数下降幅度最大,反映了根系形态建成对干旱胁迫具有高度敏感性。

植物生长性状是衡量干旱适应性的重要指标^[37]。地上部干重能稳定反映植株在干旱胁迫下的光合产物积累和水分利用效率,是鉴定耐旱基因型的可靠指标^[38]。Belay等^[39]的研究结果表明,地上部干重的变异系数(47.3%)最高,对于干旱响应差异显著,适合开展耐旱性筛选。本研究燕麦幼苗的地上部干重变异系数(64%)在所有地上性状中占据首位,对于干旱胁迫最为敏感,可作为燕麦苗期地上部分耐旱筛选的首选指标。根的生长状况是影响燕麦生长的重要因子^[40]。Ghimire等^[41]研究表明,水分条件对根长、根表面积、根干重等性状均产生显著影响。本研究中耐旱性相关性状总根长

表 6 不同燕麦种质幼苗生长性状的综合得分

Table 6 Comprehensive scores of seedling growth traits of different oat germplasms

种质编号 Germplasm number	得分 Score	排名 Rank	种质编号 Germplasm number	得分 Score	排名 Rank	种质编号 Germplasm number	得分 Score	排名 Rank
ZYC-101	1.19	1	AM-127	0.88	34	ZYC-58	0.77	67
ZYC-38	1.09	2	ZYC-109	0.87	35	ZYC-59	0.77	68
AM-124	1.08	3	ZYC-16	0.86	36	ZYC-63	0.77	69
ZYC-57	1.07	4	ZYC-14	0.86	37	ZYC-65	0.76	70
AM-85	1.07	5	ZYC-17	0.86	38	ZYC-77	0.75	71
ZYC-13	1.05	6	AM-88	0.85	39	ZYC-55	0.74	72
ZYC-31	1.04	7	ZYC-62	0.85	40	ZYC-66	0.74	73
ZYC-42	1.04	8	AM-83	0.84	41	ZYC-12	0.74	74
ZYC-11	1.02	9	AM-87	0.84	42	AM-90	0.73	75
AM-121	1.01	10	ZYC-70	0.84	43	ZYC-36	0.73	76
ZYC-19	0.99	11	AM-129	0.84	44	ZYC-45	0.72	77
ZYC-29	0.98	12	AM-86	0.83	45	ZYC-25	0.72	78
ZYC-18	0.98	13	AM-130	0.83	46	ZYC-53	0.71	79
ZYC-32	0.95	14	ZYC-102	0.83	47	ZYC-37	0.71	80
ZYC-78	0.94	15	ZYC-67	0.83	48	AM-126	0.71	81
ZYC-74	0.94	16	ZYC-51	0.82	49	ZYC-72	0.70	82
ZYC-24	0.94	17	ZYC-54	0.82	50	ZYC-79	0.70	83
AM-122	0.94	18	ZYC-68	0.82	51	ZYC-108	0.70	84
ZYC-28	0.93	19	ZYC-35	0.82	52	ZYC-60	0.70	85
AM-89	0.93	20	ZYC-76	0.82	53	ZYC-110	0.69	86
ZYC-30	0.92	21	ZYC-44	0.81	54	ZYC-61	0.69	87
ZYC-106	0.92	22	ZYC-20	0.81	55	ZYC-41	0.69	88
ZYC-47	0.92	23	ZYC-49	0.81	56	ZYC-52	0.68	89
ZYC-69	0.91	24	ZYC-21	0.81	57	ZYC-73	0.68	90
ZYC-105	0.91	25	ZYC-50	0.81	58	ZYC-34	0.68	91
ZYC-40	0.91	26	ZYC-71	0.80	59	ZYC-103	0.67	92
AM-120	0.90	27	ZYC-75	0.80	60	ZYC-23	0.66	93
AM-81	0.90	28	ZYC-64	0.80	61	ZYC-80	0.65	94
AM-131	0.89	29	ZYC-46	0.79	62	ZYC-56	0.63	95
ZYC-27	0.89	30	ZYC-22	0.79	63	AM-123	0.63	96
AM-82	0.88	31	ZYC-26	0.78	64	ZYC-39	0.57	97
AM-84	0.88	32	ZYC-104	0.77	65	ZYC-33	0.56	98
ZYC-48	0.88	33	AM-125	0.77	66	ZYC-43	0.55	99

(67%)、根尖数(96%)、根分叉数(88%)变异系数较大,说明这些性状对于旱胁迫响应敏感,干旱环境明显限制了燕麦根部的生长发育。通过对 99 个不同燕麦种质的 16 个生长性状进行分析,发现不同燕麦种质生长性状的变异系数范围为 19%~96%,表明这些种质具有丰富的遗传多样性,为筛选优良耐旱燕麦种质提供了重要依据。

3.2 干旱胁迫下燕麦耐旱性的综合评价分析

鉴于耐旱性是多因素调控的复杂农艺性状,基于单一性状的评价体系存在局限性。相比之下,隶属函数分析能够对多个耐旱相关指标进行系统量化与综合评估,从而实现对作物耐旱性更为全面和客观的评价^[35]。Belay 等^[39]基于根长、根鲜重和根干重等的测量,最终从 43 个小麦品种中筛选出 3 个耐旱性最强的品种。杨丽丽等^[36]在对 33 份苜蓿品种进行苗期干旱处理的基础上,采用隶属函数分析

成功筛选出 4 个抗旱性优异的品种。同样地,王璐等^[42]通过对 124 份玉米苗期进行 PEG 模拟干旱胁迫,并运用该分析方法将材料划分为 4 个耐旱类别,其中 9 个品种表现出极强的耐旱性。此外,隶属函数分析在油莎豆^[43]、花生^[44]、小麦^[45]等作物的抗旱性综合评价中得到广泛应用,显示出良好的适用性与可靠性。本研究采用隶属函数分析方法,将 16 项性状指标转化为 7 个综合性指标,累计贡献率达 80.41%,反映出抗旱性是一个由多维度特征共同构成的复杂性状。通过进一步聚类分析,将 99 份燕麦种质划分为 3 个耐旱类别,其中包括 10 个强耐旱种质(如 ZYC-101,ZYC-38,AM-124 等)、65 个中度耐旱种质(如 ZYC-22,ZYC-26,ZYC-46 等),以及 24 个弱耐旱种质(如 ZYC-43,ZYC-33,ZYC-39 等)。该分类结果不仅为燕麦抗旱种质的精准筛选与高效利用提供了科学依据,同时也为培育高产耐旱燕麦新品种奠定了坚实的材料与方法基础。

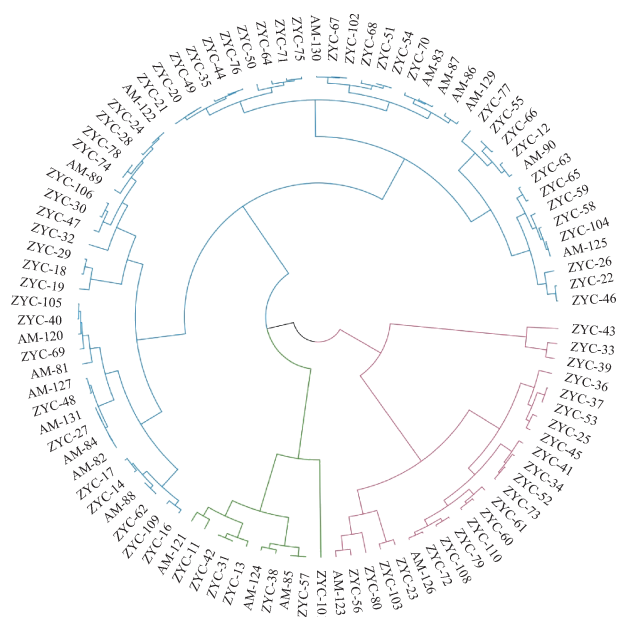


图2 不同燕麦种质幼苗的耐旱性聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of drought tolerance of different oat germplasm at the seedling stage

4 结论

本研究系统分析了干旱胁迫对燕麦种质幼苗生长的影响,共评估了包括株高、茎粗、主根长和总根长在内的16项形态指标。结果表明,干旱胁迫导致燕麦生长受到抑制,其中地上部干重和地下部分总根长、根尖数和根分叉数则表现出较大的变异幅度,说明这些指标对干旱响应尤为敏感。进一步采用隶属函数法、主成分分析、相关性分析、聚类分析及线性回归模型,选出 ZYC-101, ZYC-38, AM-124, ZYC-57, AM-85, ZYC-13, ZYC-31, ZYC-42, ZYC-11 和 AM-121 共10个强耐旱种质,为耐旱育种和基因挖掘提供了优异的种质资源。

参考文献

- [1] YADAV S, MODIP, DAVE A, et al. Sustainable crop production[M]. London: IntechOpen, 2020, 3(17): 5-16
- [2] CHEN X J, MIN D H, AHMAD YASIR T, et al. Evaluation of 14 morphological, yield-related and physiological traits as indicators of drought tolerance in Chinese winter bread wheat revealed by analysis of the membership function value of drought tolerance (MFVD)[J]. Field Crops Research, 2012, 137: 195-201
- [3] XU C H, MAO J, LI X J, et al. Evaluation of drought tolerance in sugarcane genotypes using the membership function value of drought tolerance (MFVD)[J]. Euphytica, 2023, 219(3): 37
- [4] FENTA B A, BEEBE S E, KUNERT K J, et al. Field pheno-

typing of soybean roots for drought stress tolerance [J]. Agronomy, 2014, 4(3): 418-435

- [5] YORK L M, GALINDO-CASTAÑEDA T, SCHUSSLER J R, et al. Evolution of US maize (*Zea mays* L.) root architectural and anatomical phenes over the past 100 years corresponds to increased tolerance of nitrogen stress[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(8): 2347-2358
- [6] ROGERS E D, MONAENKOVA D, MIJAR M, et al. X-ray computed tomography reveals the response of root system architecture to soil texture[J]. Plant Physiology, 2016, 171(3): 2028-2040
- [7] GUO C C, ZHU L X, SUN H C, et al. Evaluation of drought-tolerant varieties based on root system architecture in cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 127
- [8] ZHOU G Y, ZHOU X H, NIE Y Y, et al. Drought-induced changes in root biomass largely result from altered root morphological traits: evidence from a synthesis of global field trials[J]. Plant, Cell & Environment, 2018, 41(11): 2589-2599
- [9] ESAN V I, OBISESAN I A, OGUNBODE T O. Root system architecture and physiological characteristics of soybean (*Glycine max* L.) seedlings in response to PEG-6000-simulated drought stress[J]. International Journal of Agronomy, 2023, 2023(1): 9697246
- [10] BOGUSZEWSKA-MAŃKOWSKA D, ZARZYŃSKA K, NOSALEWICZ A. Drought differentially affects root system size and architecture of potato cultivars with differing drought tolerance [J]. American Journal of Potato Research, 2020, 97(1): 54-62
- [11] JONGRUNGLANG N, TOOMSAN B, VORASOOT N, et al. Classification of root distribution patterns and their contributions to yield in peanut genotypes under mid-season drought stress[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 181-190
- [12] HUANG L L, LI M J, ZHOU K, et al. Uptake and metabolism of ammonium and nitrate in response to drought stress in *Malus prunifolia* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 127: 185-193
- [13] FAROOQ M, WAHID A, KOBAYASHI N, et al. Sustainable agriculture [M]. Dordrecht: Springer, 2009: 153-188
- [14] ZHANG S H, XU X F, SUN Y M, et al. Influence of drought hardening on the resistance physiology of potato seedlings under drought stress[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(2): 336-347
- [15] HOSSEIN L M, ASHOURABADI E S. Growth indices of some medicinal plants under different water stresses[J]. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 2004, 20(3): 249-261
- [16] ALBISKI F, NAJLA S, SANOUBAR R, et al. In vitro screening of potato lines for drought tolerance [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2012, 18(4): 315-321
- [17] MARSHALL A, COWAN S, EDWARDS S, et al. Crops that feed the world 9. Oats-a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications[J]. Food Security, 2013, 5(1): 13-33
- [18] ZHAO G Q, JU Z L, CHAI J K, et al. Effects of silage additives and varieties on fermentation quality, aerobic stability, and nutritive value of oat silage [J]. Journal of Animal Science, 2018, 96(8): 3151-3160
- [19] GONG W L, JU Z L, CHAI J K, et al. Physiological and tran-

- scription analyses reveal the regulatory mechanism in oat (*Avena sativa*) seedlings with different drought resistance under PEG-induced drought stress[J]. *Agronomy*, 2022, 12(5):1005
- [20] GONG Z Z, XIONG L M, SHI H Z, et al. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency[J]. *Science China Life Sciences*, 2020, 63(5):635-674
- [21] SINGH P, TOMAR M, SINGH A K, et al. Oat (*Avena sativa*) [M]. England: CRC Press, 2024:47-68
- [22] WEN G Q, MA B L, SHI Y C, et al. Selection of oat (*Avena sativa* L.) drought-tolerant genotypes based on multiple yield-associated traits[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(9):4380-4391
- [23] HUANG H Y, WANG X T, LI J Q, et al. Trends and directions in oats research under drought and salt stresses: a bibliometric analysis (1993 - 2023)[J]. *Plants*, 2024, 13(14):1902
- [24] GHOLIZADEH A, DEGHANI H, AKBARPOUR O, et al. Assessment of Iranian wheat germplasm for salinity tolerance using analysis of the membership function value of salinity tolerance (MFVS)[J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2022, 25(5):611-619
- [25] ZHANG M X, BAI R, NAN M, et al. Evaluation of salt tolerance of oat cultivars and the mechanism of adaptation to salinity[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2022, 273:153708
- [26] NABI S, HUSSAN S U, NABI T, et al. Bi-environmental evaluation of oat (*Avena sativa* L.) genotypes for yield and nutritional traits under cold stress conditions using multivariate analysis[J]. *Plant Genetic Resources*, 2024, 22(5):295-303
- [27] BROWN C E. Applied multivariate statistics in geohydrology and related sciences[M]. Berlin: Springer, 1998:155-157
- [28] SIO-SE MARDEH A, AHMADI A, POUSTINI K, et al. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions[J]. *Field Crops Research*, 2006, 98(2/3):222-229
- [29] YOUSAF H, ISHFAQ M, ZAFAR A, et al. Drought stress[M]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025:199-219
- [30] ISIDRO-SÁNCHEZ J, PRATS E, HOWARTH C, et al. Genomic designing of climate-smart cereal crops[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020:133-169
- [31] HOWARTH C J, MARTINEZ-MARTIN P M J, COWAN A A, et al. Genotype and environment affect the grain quality and yield of winter oats (*Avena sativa* L.) [J]. *Foods*, 2021, 10(10):2356
- [32] KOU X Y, HAN W H, KANG J. Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:1085409
- [33] WU F Z, BAO W K, LI F L, et al. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63(1/2/3):248-255
- [34] 黄钰, 翁雪莲, TRAYE I D, 等. 基于萌发期和苗期主要形态指标的耐旱小麦种质筛选与评价[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(14):106-116
- HUANG Y, WENG X L, TRAYE I D, et al. Screening and evaluation of drought-tolerant wheat germplasms based on main morphological indices at germination and seedling stages[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(14):106-116
- [35] 白宇捷, 赵然, 崔顺立, 等. 不同基因型花生抗旱性分级及鉴定[J]. *华北农学报*, 2025, 40(4):107-118
- BAI Y J, ZHAO R, CUI S L, et al. Classification and Identification of drought resistance of different genotypes of peanut[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2025, 40(4):107-118
- [36] 杨丽丽, 南丽丽, 王永, 等. 苜蓿种质苗期抗旱性评价及筛选[J]. *草原与草坪*, 2024:1-18
- YANG L L, NAN L L, WANG Y, et al. Screening and evaluation of drought resistance of alfalfa germplasm at seedling stage[J]. *Grassland and Turf*, 2024:1-18
- [37] AHMAD ANJUM S, ASHRAF U, ZOHAIB A, et al. Growth and development responses of crop plants under drought stress: a review[J]. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2017, 104(3):267-276
- [38] MUELLER L, BEHRENDT A, SCHALITZ G, et al. Above ground biomass and water use efficiency of crops at shallow water tables in a temperate climate [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(2):117-136
- [39] BELAY G A, ZHANG Z B, XU P. Physio-morphological and biochemical trait-based evaluation of Ethiopian and Chinese wheat germplasm for drought tolerance at the seedling stage[J]. *Sustainability*, 2021, 13(9):4605
- [40] HRYHORIV Y Y, BUTENKO A O, KOVALENKO V M, et al. Productivity of oat (*Avena sativa* L.) with different methods of cultivation on soddy - podzolic soils[J]. *Ama-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*, 2021(51):1793-1799
- [41] GHIMIRE K, MCINTYRE I, CAFFE M. Evaluation of morpho-physiological traits of oat (*Avena sativa* L.) under drought stress[J]. *Agriculture*, 2024, 14(1):109
- [42] 王璐, 邓杰, 张泽, 等. PEG胁迫下玉米苗期耐旱种质资源鉴定与评价[J]. *作物杂志*, 2024(4):43-53
- WANG L, DENG J, ZHANG Z, et al. Identification and evaluation of drought tolerant germplasm resources at seedling stage of maize under PEG stress[J]. *Crops*, 2024(4):43-53
- [43] 金羽琨, 魏尊苗, 程艳, 等. 不同油莎豆种质资源苗期抗旱性的筛选与转录组分析[J/OL]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0027>, 2025-08-29/2025-09-04
- JIN Y K, WEI Z M, CHENG Y, et al. Screening and transcriptome analysis of drought resistance in different *Cyperus esculentus* L. germplasm at the seedling stage[J/OL]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0027>, 2025-08-29/2025-09-04
- [44] 曹凤岩, 苑翠玲, 刘玉龙, 等. 花生种质资源苗期抗旱性鉴定[J]. *花生学报*, 2024, 53(4):88-99
- CAO F Y, YUAN C L, LIU Y L, et al. Drought resistance identification of peanut germplasm resources at seedling stage[J]. *Journal of Peanut Science*, 2024, 53(4):88-99
- [45] 雷庭澍. 小麦种质资源抗旱性鉴定及筛选[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025:56-68
- LEI T S. Identification and screening of drought resistance in wheat germplasm resources [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025:56-68