文章编号:1000-7601(2025)02-0032-12 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.02.04

高粱种质资源萌发期耐旱性综合评价

吴国江[1],周 伟[1],吕静波[2],王振国[1,2],李 岩[1,2],余忠浩[1],
邓志兰[2],崔凤娟[2],李 默[2],徐庆全[2],周亚星[1]

(1. 内蒙古民族大学科尔沁沙地生态农业国家民委重点实验室,内蒙古 通辽 028000;
2. 通辽市农牧科学研究所,内蒙古 通辽 028000)

摘 要:以不同浓度 PEG-6000 为渗透剂对 30 份高粱种质进行模拟干旱胁迫处理,结果显示,15% PEG-6000 为高粱种质胁迫适宜浓度。在该处理胁迫浓度下,对 279 份高粱种质萌发期的耐旱性进行了综合评价。结果表明,9 个耐旱指标的变异系数介于 21.6%~52.6%之间,并依据各指标的关联度大小确定了发芽势、发芽率和发芽指数 3 个耐旱关键指标。通过主成分分析,将 9 个耐旱指标综合成为了 3 个相互独立的综合指标(主成分值),这 3 个主成分值的累计贡献率达 88.044%。基于主成分分析,利用隶属函数法计算得出高粱种质萌发期耐旱性的综合评价 *D* 值,同时基于灰色关联度分析利用 DTOPSIS 法计算得出高粱种质萌发期耐旱性的相对贴进度,再将 *D* 值和相对贴进度求平均,得到新的综合评价值,依据新的综合评价值采用欧式距离及类平均法将 279 份高粱种质划分为五大类,分别包含 29 个极耐旱种质、170 个耐旱种质、52 个中度耐旱种质、12 个干旱敏感种质和 16 个干旱高度敏感种质。

关键词:高粱;种质资源;萌发期;耐旱性;综合评价

中图分类号:S514; S32 **文献标志码**:A

Comprehensive evaluation of drought tolerance of sorghum germplasm resources during germination period

WU Guojiang[1], ZHOU Wei[1], LV Jingbo[2], WANG Zhenguo[1,2], LI Yan[1,2], YU Zhonghao[1],
DENG Zhilan[2], CUI Fengjuan[2], LI Mo[2], XV Qingquan[2], ZHOU Yaxing[1]

(1. *Key Laboratory of State Ethnic Affairs Commission of Ecological Agriculture in Horchin Sandy Land, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia* 028000, *China*; 2. *Tongliao Institute of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tongliao, Inner Mongolia* 028000, *China*)

Abstract: In this study, 30 sorghum germplasms were treated with simulated drought stress using PEG-6000 at different concentrations as a penetrant. The results showed that 15% PEG-6000 was the appropriate concentration for sorghum germplasm stress. Under this treatment of concentration stress, the drought tolerance of 279 sorghum germplasms was comprehensively evaluated at the germination stage. The results showed that the coefficient of variation of the nine drought tolerance indexes ranged from 21.6% to 52.6%. According to the correlation degree of each index, three key drought tolerance indexes, germination potential, germination rate and germination index were determined. Through principal component analysis, the nine drought tolerance indexes were integrated into three independent comprehensive indexes (principal component values), and the cumulative contribution rate of these three principal component values was 88.044%. Based on principal component analysis, the comprehensive evaluation *D* value of drought tolerance of sorghum germplasm at germination stage was calculated by membership function method. At the same time, based on grey correlation analysis, the relative sticking progress of drought tol-

收稿日期:2024-05-17 **修回日期**:2024-07-25

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2023LHMS03018);科尔沁沙地生态农业国家民委重点实验室开放基金(MDK2023091);内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0102);内蒙古自治区高等学校青年科技英才项目(NJYT22052);2022 年度内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(GXKY22143)

作者简介:吴国江(1997-),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为作物遗传改良与种质创新。E-mail:2592406718@qq.com

通信作者:周亚星(1981-),女,河北石家庄人,博士,副教授,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:zhouyaxing3@163.com

erance of sorghum germplasm at the germination stage was calculated by DTOPSIS method, and then the *D* value and relative sticking progress were averaged to obtain a new comprehensive evaluation value. Based on the new comprehensive evaluation value, 279 sorghum germplasms were classified into five categories using the Euclidean distance and class average method. These categories include 29 extremely drought-tolerant germplasms, 170 drought-tolerant germplasms, 52 moderately drought-tolerant germplasms, and 28 drought-sensitive germplasms (12 sensitive and 16 highly sensitive).

Keywords: sorghum; germplasm resources; germination stage; drought tolerance; comprehensive evaluation

受气候条件的制约,全世界近 1/3 的土地受到干旱的影响[1]。我国干旱半干旱地区的土地面积约有 48%,其中没有灌溉条件的旱地面积约占总耕地面积的 1/2[2],水分亏缺严重制约着农业生产的发展,已经成为当今社会的重要议题[1]。植物体内约 80%~95%的新鲜生物量由水组成,水在各种生理过程中起着至关重要的作用,包括植物生长、发育和代谢等方面[3-4]。由于水资源的枯竭和世界人口不断增长引起的粮食需求增加,导致干旱对农业的影响不断加剧[5]。干旱的不可预测性取决于多种因素,例如降雨分布不均匀和不可靠、蒸散量和根际周围的持水能力等[6]。此外,在某些情况下,即使根区存在足够的水分,植物也无法从土壤中吸收水分[7],这种现象称为生理干旱或伪干旱[8]。

高粱[*Sorghum bicolor*(L)Moench]为禾本科高粱属单子叶草本植物,是二倍体 C4 作物,被认为是继小麦、水稻、玉米和大麦之后的世界第五大谷物[9-10],主要分布于热带、亚热带和温带地区。由于高粱具有耐瘠薄的特性,其能够适应多种多样的农业气候环境。干旱、盐碱、高温和冷害等非生物胁迫是影响作物正常生长发育的主要因素。高粱作为最耐旱的作物之一,筛选耐旱性强的种质来选育优良品种,探究其耐旱机理是研究高粱耐旱性的基础,而培育具有强耐旱性的作物是植物科学的巨大挑战之一,也是维持粮食安全的核心[11]。萌发期是耐旱性鉴定最为关键的时期之一,已有大量学者对不同作物萌发期耐旱性进行了评价。朱丽丽等[12]对 116 份藜麦种质资源萌发期耐旱性进行了评价,筛选出 29 个耐旱性较强的藜麦种质,构建了藜麦耐旱性鉴定的评价体系。熊雪等[13]利用隶属函数法对 21 个谷子品种萌发期的耐旱性进行综合评价,结果得出有 6 个谷子品种的耐旱性较强。王永刚等[14]以新疆地方品种和育成品种为材料,通过萌发期耐旱性鉴定,发现 134 个地方品种中有 7 个高耐旱品种,54 个育成品种中有 3 个高耐旱品种。目前,国内外学者对高粱耐旱性也做了较多的研究。张瑞栋等[15]以 2 份高粱品种晋杂 22 和晋早 5564 为研究材料,结果发现在萌发期进行干旱胁迫处理会显著降低高粱种子的发芽率,抑制种子胚芽和胚根的伸长。Harris-Shultz、Ashraf、Kebede 等[16-18]已经鉴定了有助于高粱耐旱性的几个数量性状基因座(QTL),但这些 QTL 中的大多数基因对抗旱性的贡献尚未明确[16]。Fracasso 等[19]对水分利用率不同的 2 个高粱基因型响应干旱转录组进行研究,发现敏感基因型中 *DE* 基因数目较多,强调了 2 个基因型在应对干旱胁迫所采取的策略上的差异。虽然目前对高粱耐旱性方面的研究已较为深入,但由于我国旱地面积占比较大以及气候环境的不断恶化,高粱品种仍需持续选育更新,而对耐旱高粱种质进行筛选鉴定,是培育耐旱品种的关键。基于此,本试验以 279 份高粱种质为试验材料,采用 PEG-6000 作为渗透剂进行胁迫,探究不同高粱种质萌发期的耐旱性并筛选耐旱性较强的种质,以期为耐旱高粱种质的资源开发和品种选育提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

本试验以西辽河平原的 279 份高粱种质为参试材料,材料均由通辽市农牧科学研究所提供,材料名称见表 1。

1.2　试验方法

1.2.1　预试验　试验于 2022—2024 年在内蒙古民族大学科尔沁沙地生态农业国家民委重点实验室进行。本研究从 279 份高粱种质材料中随机选取 30 份种质进行预试验,挑选籽粒饱满、大小一致、无损伤、无虫害及病毒侵染的高粱种子各 30 粒,用 1% NaClO 溶液消毒 10 min,再用自来水和蒸馏水分别清洗 3 次,然后分别接种于含有蒸馏水(CK),5%、10%、15%、20% PEG-6000 溶液浸湿的双层滤纸培养皿中。将所有培养皿置于人工气候箱中发芽培养,昼夜温度分别设置为 25℃/15℃,时长分别为 12 h/12 h,相对湿度为 60%。胁迫处理期间,每天进行不同溶液更换以保证胁迫浓度的稳定性,胁迫处理

表 1 279 份高粱种质材料名称及编号

Table 1 Name and number of 279 sorghum germplasm materials

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
1127	0402/水科 Shuike 001X1	28H	9702/晋混 Jinhun 0	1301H	NW10X
1129	0650X9	29H	吉 Ji 586	1999H	0677-2
2402	0650 选 Xuan	30H	0660	2079H	0631-1
2423	LG601/9802	32H	185 选 Xuan	2406H	15-2090
2559	L17-1	33H	2008	2408H	0673-1
2568	LTR102	36H	吉 Ji 1586-1	2409H	0674
3314	S101	38H	忻粱 Xinliang 52	2410H	NW4-1
3335	009/雁 Yan 4X3	39H	0402	2411H	NW14-1
4205	V7A	40H	03 吉 Ji 1 三尺三 Sanchisan	2414H	2011-38
6621	品资 Pinzi 02159	43H	黄壳蛇眼 Huangkesheyan 三尺三 Sanchisan. 黄壳蛇眼 Huangkesheyan 77/128/9701/9701	2417H	9801
6627	S11	44H	0908	2419H	NW9
6635	品资 Pinzi 02240	46H	188 选 Xuan	2435H	LG601-1
3017A	晋长早 Jinchangzao A	47H	2004/9701	2440H	敖汉 Aohan NR2
3018A	98125A	50H	9058/忻 Xin 52	2446H	敖汉 Aohan NR2-5
3020A	QL33A	58H	水科 Shuike 001	2448H	敖汉 Aohan BNR-1
3021A	吉 Ji 354A	60H	选吉 Xuanji	2451H	京都五号 Jingdu 5
3022A	D51(D53)A	63H	2011-16	2453H	2011-31
3023A	2003A	64H	2011-30	2456H	黑糯 Heinuo R2
3025A	D73A	67H	9702/2002	2457H	G12487
3028A	314A/(15B/QL33B)/321A	77H	吉 Ji R123-2 /2002	2458H	17 甜选 Tianxuan 2
3029A	404A	80H	0657	2460H	2011-8
3031A	赤繁 Chifan5578/2001A	81H	185 选 Xuan 1	2461H	13X3
3036A	D369/370A	86H	9700	2464H	15/V4
3041A	吉 Ji 406A	1101H	2002/9705/185X1 叶上 Yeshang 185X1	2472H	188X
3043A	314A/承 Cheng 16.和良 Heliang 30A	1102H	W-2002	2476H	LY175
3045A	哲 Zhe 27A/哲 Zhe 15/沈帚 Shenzhou 4716.404/龙 Long 188	1103H	2004/9702	2499H	19 新选 Xinxuan
3049A	0615/98125A	1104H	2004/螟 Ming 1/南 Nan 14-09X5	2502H	敖汉 Aohan NR2-1
3051A	V4A	1105H	2005/水科 Shuike 001	2504H	糯高粱 Nuogaoliang
3053A	0630-2A	1106H	2004/水科 Shuike 001	2509H	河北引 Hebeiyin 19
3011B	龙 Long 188/17/102A	1107H	2007/7788	2512H	NW14 选白粒 Xuanbaili-1
3309B	0614-1	1108H	2011-49	2516H	A3
3310B	IV33	1109H	7413-24	2517H	03 名 3
3312B	QL33/15	1110H	7413-25	2522H	黑糯 Heinuo R2-1
3316B	S102	1111H	9704	2523H	龙米粱 longmiliang 3-1
3317B	S301	1112H	哈引极早 Hayinjizao 82	2525H	红缨子 Hongyingzi
3318B	QL31/321 叶上好 Yeshanghao	1114H	哈引极早 Hayinjizao 80	2534H	19-DUS7
3319B	QL33/321 叶上好 Yeshanghao	1115H	0677	2537H	敖汉 Aohan NR2-2
3321B	S302	1116H	护脖矬 Hubocuo-1	2541H	河北引 Hebeiyin 9
3322B	HBA	1117H	0667	2542H	河北引 Hebeiyin 11
3323B	雁 Yan 4/0624X2	1119H	通早 Tongzao 1X52	2545H	吉糯杂 Jinuoza 3
3326B	澳 Ao 4X1	1123H	绥 Sui R	2551H	敖汉 Aohan NR
3332B	雁 Yan 4//15/V4	1124H	140R	2553H	19-DUS3
3334B	15-03281	1127H	0401/ 水科 Shuike 001X1	2562H	9804
3336B	S201A	1128H	0650X6	2566H	NW14-6
3338B	QL33/15X6	1130H	0664/0650	2572H	敖汉 Aohan NR2-7
3339B	S301A	1131H	901	2576H	NW14-16
3340B	哲 Zhe 15/V4A 好 V4A Hao	1132H	0661	2577H	9806
3341B	S303	1137H	15-5928/8004	2581H	敖汉 Aohan BNR
4201B	2001A	1138H	Z7	2710H	甜 Tian-1
4204B	承 Cheng 16A	1139H	Z8	2716H	L3
4206B	吉 Ji 352A	1141H	Z9	2717H	L5
4207B	622A	1142H	Z13	2718H	L6

续表 1
Continued table 1

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
4208B	871300A	1143H	40817	2722H	L9
4210B	L405A	1147H	Z16	2723H	L11
4211B	D511A	1149H	哈引极早 Hayinjizao 80X4×8004	2753H	G12485
4212B	D679A	1151H	护脖矬 Hubocuo	2764H	0778
4216B	15/7050A	1154H	2002/9705X	2787H	Dus9
4218B	404/321A	1155H	石 Shi R49X7	2790H	早蔗 Zaozhe 26
4219B	2001-1A	1158H	通早 Tongzao 1X11	2811H	特用甜 Teyongtian X
4221B	17-HCB	1163H	通早 Tongzao 1X86	H25H	9701/晋混 Jinhun 40
4222B	吉 Ji 406/V4A	1164H	早熟杂交种 X1 Early maturing hybrid X1	7HV	吉 Ji 104
4224B	V4/404/2001A	1170H	吉 Ji 1586	8HV	9701/和 He R106
4228B	JN	1172H	L840	10HV	2005/9702
4235B	XR3	1173H	660	15HV	L441
4237B	0608-1	1175H	L4	16HV	吉糯 2 号 Jinuo 2
4238B	0608	1176H	661	55HV	2011-36-1
4239B	A3 不育系 Sterile line	1179H	Z11	75HV	L944
4240B	0607	1186H	0650X	1120HV	通早 Tongzao 1X54
4242B	赤繁 Chifan 5576/2001A	1189H	8917	1126HV	2002/9705
4226BV	2018-2080A	1191H	0905X	1177HV	Z17
4229BV	D501A	1192H	水科 Shuike 001/2002	1178HV	04126
1212V	哈引极早 Hayinjizao 80X008	1196H	GAO2	1200HV	LG607
1268V	原育 Yuanyu 7046/2002/9705	1197H	吉 Ji 44/9701X	1215HV	0402/2002/9705/2004X1
1309V	0924 精选 Jingxuan	1198H	0654/0650X	1270HV	M2
2455V	2011-33	1203H	NW15	1275HV	2002/9705X062
2490V	185-1	1204H	白杂 Baiza 13R	1289HV	Z10
4214V	吉 Ji AI/0619A	1206H	8004	1307HV	克杂 Keza 17
4220V	承 Cheng 3A	1209H	护脖矬 Hubocuo P4	2401HV	LG601
H1290V	185X5	1212H	哈引极早 Hayinjizao 81X008	2403HV	2011-48
H1	秋 Qiu 6/吉 Ji 116	1220H	2002/9705/0675X4	2447HV	QNR
H72	4126	1228H	2003X6	2508HV	9803
H76	吉 Ji R104	1232H	9704X3	Z490	9701
H83	吉 Ji 1586-2	1239H	哈引极早 Hayinjizao 80X020	Z491	印 Yin 71
H2554	9802	1245H	通早 Tongzao 1/ 护脖矬 Hubocuo X1	Z558	0798
H2580	19-DUS5	1249H	2002/9705X039	Z568	NY7
2H	哲 Zhe 37R/抗晋金 Kangjinjin /2003	1250H	2002/9705X048	2701H 甜 2701 H Tian	甜 Tian-3
6H	2005	1256H	2002/9705X078	2704 甜 2704 Tian	甜 Tian-3 选 Xuan 1
9H	77/128/9701/9701/ 龙福粱 Longfuliang/ 82-111-1/106	1260H	0677 选 Xuan	2746H 甜 2746 H Tian	关东青 Guandongqing/ 忻粱 Xinliang 52
13H	9702	1264H	2002/9705X101	2786 甜 H 2786 Tian H	19 新选甜 Xinxuantian
19H	0916	1273H	M5	2815 甜 H 2815 Tian H	98456
20H	0939	1284H	吉 Ji R123X	2821 甜 H 2821 Tian H	19 新选甜 Xinxuantian-1
22H	2005/2004	1298H	924	2822 甜 H 2822 Tian H	0439
23H	Jan-02	1300H	NW1X	2823H 甜 2823 H Tian	LY176

共 8 d,种子“露白”即视为发芽,4 d 时,记录种子发芽势,8 d 时,记录种子发芽率。

1.2.2　正式试验　从 279 份高粱种质材料中分别挑选籽粒饱满、大小一致、无损伤、无虫害、无病毒侵染的高粱种子各 30 粒,用 1%的 NaClO 溶液消毒 10 min,再用自来水和蒸馏水分别清洗 3 次后,将其均匀接种于含有 15% PEG-6000 溶液的双层滤纸培养皿中,3 次重复。将所有培养皿置于人工气候箱中发芽培养,培养箱参数设置同预试验。胁迫处理期间,每天补充 15% PEG-6000 溶液,胁迫处理共 8 d。

1.3　测定指标

每天在相同时间统计种子的发芽数量直至第 8 天。第 8 天从每个培养皿中随机选取 10 株长势一致且具有代表性的幼苗,测量幼苗的芽长、根长、芽

质量和根质量。各指标计算公式如下：

发芽势=第4天发芽种子数/试验种子数×100% (1)

发芽率=第8天发芽种子数/试验种子数×100% (2)

$$发芽指数 = \sum (Gt/Dt) \quad (3)$$

式中，Gt 为逐日发芽种子数；Dt 为相应 Gt 的发芽天数。

活力指数=发芽指数×(根长+芽长) (4)

萌发耐旱指数=水分胁迫下种子萌发指数/对照种子萌发指数 (5)

式中，种子萌发指数=(1.00)nd_2+(0.75)nd_4+(0.50)nd_6+(0.25)nd_8，其中 nd_2、nd_4、nd_6、nd_8 分别为第2天、第4天、第6天、第8天的种子发芽率，1.00、0.75、0.50、0.25分别为相应萌发天数所赋予的权重系数。

根冠比=根质量/芽质量 (6)

1.4 综合评价

1.4.1 隶属函数分析法

(1)隶属函数值的计算。不同种质各综合性状的隶属函数值计算公式见式(7)。

$$u(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \quad j = 1,2,\cdots,n \quad (7)$$

式中，X_j 表示第 j 个综合性状；$X_{\min}$ 表示第 j 个综合性状的最小值；$X_{\max}$ 表示第 j 个综合性状的最大值。

(2)权重的计算。各性状的权重计算公式见式(8)。

$$w_j = p_j \Big/ \sum_{j=1}^{n} p_j, \quad j = 1,2,\cdots,n \quad (8)$$

式中，w_j 表示第 j 个综合性状在所有综合性状中的重要程度，即权重；P_j 为第 j 个综合性状的贡献率。

(3)综合评价 D 值的计算。各种质的综合评价 D 值计算公式见式(9)。

$$D = \sum_{j=1}^{n} [u(X_j) \times w_j], \quad j = 1,2,\cdots,n \quad (9)$$

1.4.2 灰色关联度分析法

(1)各性状的无量纲化。为保证不同性状单位的统一，必须对各变量作无量纲化处理。在灰色关联度法中，常用的无量纲化处理有初值法、均值法等，本研究采用均值法对原始数据进行无量纲化处理，使每个观察值都趋近于1。不同种质各性状的无量纲化处理计算公式见式(10)。

$$f'_{ij}(x) = \frac{f_{ij}(x)}{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} f_{ij}(x)}, \quad i = 1,2,\cdots,m; \ j = 1,2,\cdots,n \quad (10)$$

式中，$f'_{ij}(x)$ 为第 i 个种质第 j 个性状的无量纲化处理值；$f_{ij}(x)$ 为第 i 个种质第 j 个性状的观察值；m 为参试种质个数；n 为考察性状个数。

(2)关联系数的计算。关联系数反映了各性状指标与理想值的吻合程度，本研究中考察的9个性状均以最大值为理想值。不同种质各性状间的关联系数计算公式见式(11)。

$$\xi_i(x) = \frac{\min\Delta_i(x) + \rho\max\Delta_i(x)}{\Delta_i(x) + \rho\max\Delta_i(x)}, \quad i = 1,2,\cdots,m \quad (11)$$

式中，$\xi_i(x)$ 为关联系数；$\Delta_i(x) = |f_0(x) - f_{ij}(x)|$，$f_{ij}(x)$ 为第 i 个种质第 j 个性状的观察值，$f_0(x)$ 为相应性状的理想值，$\max\Delta_i(x)$ 与 $\min\Delta_i(x)$ 为 $|f_0(x) - f_{ij}(x)|$ 的二级最大值与二级最小值，ρ 为分辨系数，通常为0.5。

(3)关联度和权重的计算。由于关联系数较多，不便于比较，故需将关联系数求平均值，使数据信息集中化，所得的平均值即为关联度，再将其归一化处理，得到各性状指标的权重 W_j。各性状间的关联度计算公式见式(12)。

$$\gamma_i = \frac{1}{n}\sum_{x=1}^{n} \xi_i(x), \quad i = 1,2,\cdots,m \quad (12)$$

式中，γ_i 为关联度。

1.4.3 DTOPSIS分析法

(1)规范化决策矩阵的建立。将灰色关联度法得到的无量纲化处理结果与其每个性状所对应的权重相乘得到决策矩阵(R)。

(2)正、负理想解的确定。正理想解即为决策矩阵 R 中每个种质在各性状中的最大值 X^+，负理想解即为每个种质在各性状中的最小值 X^-。

(3)正、负理想距离的计算。不同种质各性状与正理想解的距离 S_i^+ 及与负理想解的距离 S_i^- 的计算公式见式(13)和式(14)。

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (R_{ij} - X_j^+)^2}, \quad i = 1,2,\cdots,m; \ j = 1,2,\cdots,n \quad (13)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (R_{ij} - X_j^-)^2}, \quad i = 1,2,\cdots,m; \ j = 1,2,\cdots,n \quad (14)$$

式中，S_i^+ 为正理想距离；S_i^- 为负理想距离；R_{ij} 为决策矩阵 R 中第 i 个种质第 j 个性状的数值；X_j^+ 为决策矩阵 R 中每个种质第 j 个性状的最大值；X_j^- 为决策矩阵 R 中每个种质第 j 个性状的最小值。

(4)相对贴近度的计算。各种质的相对贴近度计算公式见式(15)。

$$C_i = S^- / (S^- + S^+), \quad i = 1,2,\cdots,m \quad (15)$$

式中，C_i 为相对贴近度，$C_i \in [0,1]$。

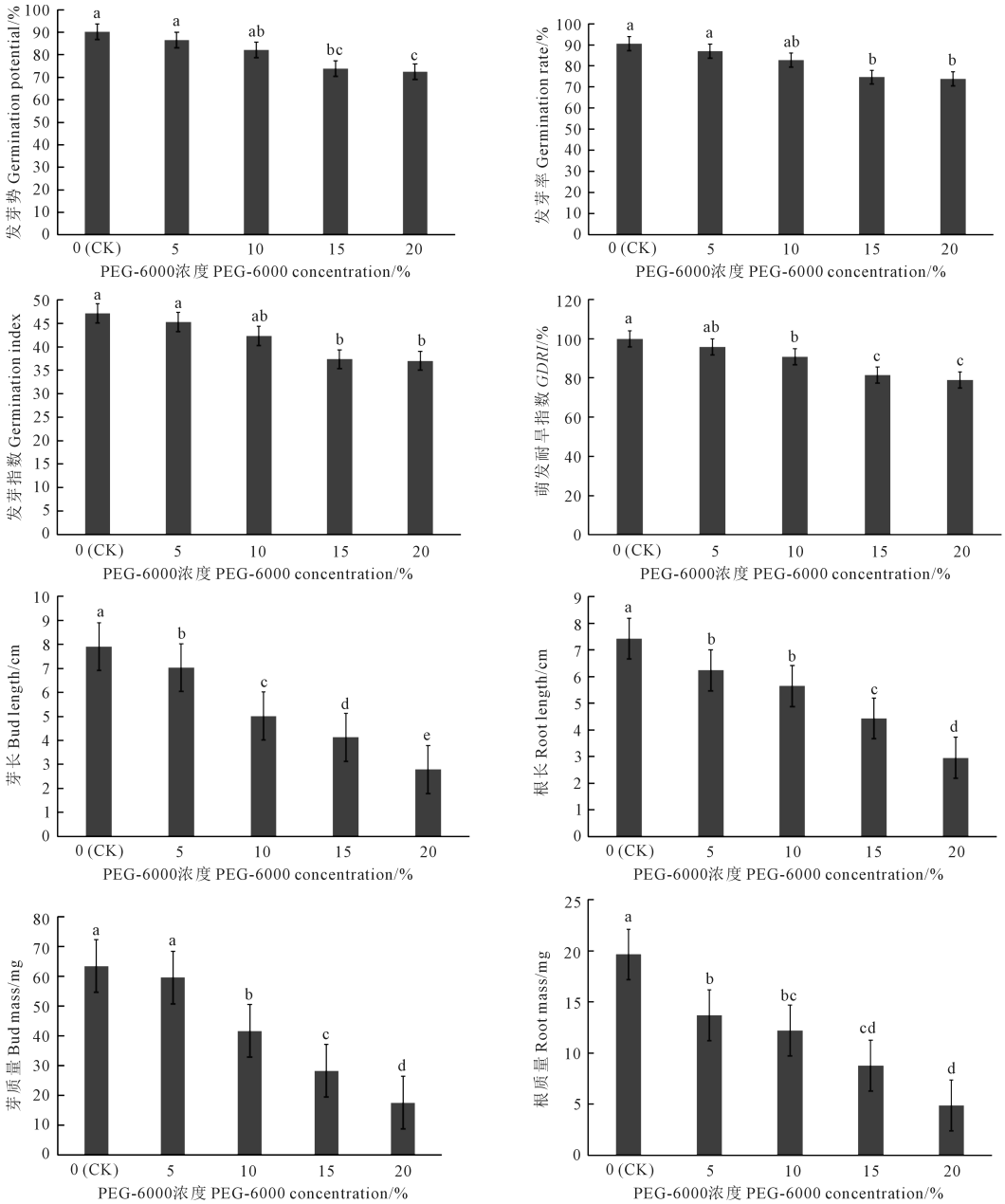
1.5　数据统计处理

利用 Excel 2019 进行数据统计分析,并进行隶属函数、灰色关联度和 DTOPSIS 分析;采用 DPS 9.01进行差异显著性(Duncan 新复极差法)分析;采用 SPSS Statistics 26 进行主成分分析;采用 Origin 2021 进行聚类分析。

2　结果与分析

2.1　高粱种质资源耐旱性适宜胁迫浓度鉴定

图 1 和图 2 结果表明,5% PEG-6000 浓度相较于 CK 仅对高粱种质的芽长、根长和根质量有显著影响,对其余耐旱指标影响均不显著;10% PEG-6000 浓度相较于 CK 对高粱种质的萌发耐旱指数、芽长、根长、芽质量和根质量有显著影响,但对发芽势、发芽率和发芽指数没有显著影响;20% PEG-6000 浓度相较于 CK 虽然各性状指标都表现出显著差异,但 30 份高粱种质的整体长势较差,不利于进行模拟干旱试验。15% PEG-6000 浓度相较于 CK 对高粱种质的各性状指标均有显著影响,说明 15% PEG-6000 浓度处理可以有效区分高粱种质的耐旱能力。



注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05).

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments (P<0.05).

图 1　不同浓度 PEG-6000 处理下高粱种质耐旱相关性状指标统计分析

Fig.1　Statistical analysis of drought tolerance related traits in sorghum germplasm treated with different concentrations of PEG-6000

2.2 高粱种质萌发期耐旱指标的变异分析

表2显示,9个性状指标的变异系数在21.6%~52.6%之间,说明在模拟干旱胁迫下,各种质性状间表现出一定差异。其中,根质量的变异系数最大,变异幅度在0.1~22.5 mg之间,说明该性状易受环境影响。发芽率的变异系数最小,变异幅度在15%~100%之间,说明该性状稳定性最好。一般情况下,变异系数>10%表示样本间差异较大[20],本试验在15% PEG-6000模拟干旱胁迫下的9个性状指标均大于10%,表明279份高粱种质对于模拟干旱胁迫的性状表现有较大差异,适合进行耐旱种质资源的筛选与鉴定。

2.3 高粱种质萌发期耐旱指标的主成分分析

主成分(PC)分析是一种用于识别数据集中的模式和消除单变量分析中的冗余的方法[21]。当涉及多共线性数据时,PC分析本质上是将包含许多相关变量的数据集重组为原始变量的较小组件集,新的组件集既保留了原有信息,又彼此独立。通过对高粱的9个耐旱指标进行主成分分析(表3),以特征值大于1、累计贡献率大于80%为阈值[22],将原有的9个耐旱指标综合成了3个独立的综合指标,贡献率分别为53.760%、18.896%和15.388%,累计贡献率达88.044%,说明这3个主成分所包含的信息已能够代表原9个性状指标的大部分信息,可以作为评价高粱耐旱性的综合指标。

表2 15% PEG-6000模拟干旱胁迫下高粱种质各性状指标的变异分析

Table 2 Variation analysis of sorghum germplasm traits under 15% PEG-6000 simulated drought stress

指标 Item	发芽势/% Germination potential	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vital index	芽长/cm Bud length	根长/cm Root length	芽质量/mg Bud mass	根质量/mg Root mass	根冠比 Root-shoot ratio
最大值 Maximum	100.0	100.0	54.4	854.0	7.7	13.0	54.7	22.5	1.0
最小值 Minimum	15.0	15.0	5.7	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
极差 Range	85.0	85.0	48.7	852.8	7.6	12.9	54.6	22.4	1.0
平均值 Average	82.0	82.3	41.0	334.3	3.6	4.4	24.3	7.5	0.3
标准差 *SD*	17.9	17.8	10.4	159.6	1.5	2.1	9.9	3.9	0.2
变异系数 *CV*/%	21.9	21.6	25.4	47.7	41.9	48.7	40.6	52.6	51.2

主成分载荷矩阵可以体现出各主成分与各变量指标之间的相互关系,绝对值越大,表明该变量与某个主成分之间的关联程度越高。由表3可知,第1主成分特征值为4.838,贡献率为53.760%,在方差占比中最大,说明它综合原有变量的能力最强,其中,活力指数对第1主成分贡献最大,载荷值为0.189,其次是发芽势、发芽率、发芽指数、芽长和芽质量,说明第1主成分主要反映了高粱萌发和地上部分生长情况,因此,可以作为高粱萌发和地上部分生长因子;根长对第2主成分贡献最大,载荷值为0.354,其次是发芽势、发芽率、发芽指数和根质量,说明第2主成分主要反映了高粱萌发和地下部分生长情况,因此,可以作为高粱萌发和地下部分生长因子;根冠比对第3主成分贡献最大,载荷值为0.627,说明第3主成分主要反映了高粱根和芽的相关性,因此,可以作为根冠比因子。

表3 15% PEG-6000模拟干旱胁迫下高粱种质各性状指标的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of sorghum germplasm traits under 15% PEG-6000 simulated drought stress

指标 Index	主成分 Principal component		
	1	2	3
发芽势 Germination potential	0.169	−0.314	0.111
发芽率 Germination rate	0.169	−0.312	0.115
发芽指数 Germination index	0.170	−0.288	0.118
活力指数 Vital index	0.189	0.136	−0.042
芽长 Bud length	0.164	0.223	−0.226
根长 Root length	0.112	0.354	−0.038
芽质量 Bud mass	0.170	0.204	−0.068
根质量 Root mass	0.103	0.252	0.481
根冠比 Root-shoot ratio	−0.075	0.107	0.627
特征值 Eigenvalue	4.838	1.701	1.385
贡献率/% Contribution rate/%	53.760	18.896	15.388
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	53.760	72.656	88.044

2.4 高粱种质萌发期耐旱指标的灰色关联度分析

表4可见,高粱种质资源耐旱指标的关联度表现为发芽率>发芽势>发芽指数>芽长>芽质量>活力指数>根冠比>根长>根质量。依据灰色关联分析原则,首先应该考虑与理想种质关联度较大的性状指

标,其次再考虑与理想种质关联度较小的性状指标,发芽率、发芽势、发芽指数与理想种质关联度较大,说明发芽率、发芽势和发芽指数是耐旱性鉴定的关键指标。

2.5　高粱种质萌发期耐旱性综合评价

2.5.1　基于主成分分析的隶属函数综合评价　通过对所得的各主成分得分进行计算,得出高粱种质各综合指标的隶属函数值,并依据各综合指标贡献率大小和累计贡献率,求出前 3 个综合指标的权重分别为 0.6106、0.2146 和 0.1748。通过对隶属函数值进行加权,进而得出各高粱种质的综合评价 *D* 值,*D* 值反映了不同种质的综合耐旱能力大小,*D* 值越大,表明其耐干旱能力越强。根据 *D* 值大小,可以对 279 份高粱种质的耐旱性强弱进行排名,由于数据量过大,所以只取排名前 20 和排名后 20 的材料进行对比,结果见表 5。其中,1232H、2710H、3020A、2811H、1158H、1177HV、1250H、3041A、33H、2568、2823H 甜、1107H、43H、3023A、1175H、6H、1143H、2764H、3018A 和 1103H 的综合评价 *D* 值相对较大,表明其耐旱性较强,属于强耐旱型种质。2410H、4226BV、4238B、1249H、1130H、2402、1198H、3340B、1206H、4206B、2455V、4240B、2414H、2H、2417H、1139H、1203H、1192H、2508HV 和 1154H 的综合评价 *D* 值相对较小,表明其耐旱性较弱,属于干旱敏感型种质。

表 4　高粱种质萌发期耐旱指标的理想值、关联度及权重系数

Table 4　Ideal value, correlation degree and weight coefficient of drought tolerance index of sorghum germplasm at germination stage

指标 Item	发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vital index	芽长 Bud length	根长 Root length	芽质量 Bud mass	根质量 Root mass	根冠比 Root-shoot ratio
理想值 Ideal value	1.2189	1.2157	1.3257	2.5542	2.1636	2.9906	2.2516	3.0136	3.0149
关联度 Correlation degree	0.8851	0.8865	0.8361	0.5045	0.5787	0.4395	0.5579	0.4387	0.4404
权重系数 Weight coefficient	0.1590	0.1592	0.1502	0.0906	0.1039	0.0789	0.1002	0.0788	0.0791

表 5　高粱种质萌发期各材料耐旱性的综合评价 *D* 值及排序

Table 5　Comprehensive evaluation *D* value and ranking of drought tolerance of sorghum germplasm at germination stage

材料名称 Materials name	*D* 值 *D* value	排序 Ranking	材料名称 Materials name	*D* 值 *D* value	排序 Ranking
1232H	0.840	1	2410H	0.365	260
2710H	0.803	2	4226BV	0.345	261
3020A	0.796	3	4238B	0.341	262
2811H	0.795	4	1249H	0.326	263
1158H	0.786	5	1130H	0.317	264
1177HV	0.786	6	2402	0.316	265
1250H	0.785	7	1198H	0.316	266
3041A	0.784	8	3340B	0.314	267
33H	0.784	9	1206H	0.309	268
2568	0.763	10	4206B	0.283	269
2823H 甜 2823 H Tian	0.754	11	2455V	0.278	270
1107H	0.745	12	4240B	0.270	271
43H	0.742	13	2414H	0.269	272
3023A	0.738	14	2H	0.266	273
1175H	0.738	15	2417H	0.261	274
6H	0.732	16	1139H	0.249	275
1143H	0.731	17	1203H	0.247	276
2764H	0.721	18	1192H	0.235	277
3018A	0.711	19	2508HV	0.224	278
1103H	0.709	20	1154H	0.222	279

2.5.2　基于灰色关联度分析的 DTOPSIS 综合评价　本研究提出了一种新的基于灰色关联度的评价指标体系。通过将灰色关联度法所得到的无量纲化处理结果和每个性状所对应的权重相乘,得到决策矩阵(*R*)。根据决策矩阵求出每个性状的正、负理想解,并计算得出正、负理想距离,进而求得相对贴进度,相对贴进度越大,表明种质的耐旱性越强。根据相对贴进度大小,可以对 279 份高粱种质的耐旱性强弱进行排名,由于数据量过大,所以只取排名前 20 和排名后 20 的材料进行对比,结果见表 6。其中,1232H、2710H、1177HV、3020A、3041A、1250H、33H、2568、1158H、2811H、2823H 甜、1107H、43H、2764H、1175H、3023A、1143H、6H、3018A 和 3326B 的相对贴进度相对较大,表明其耐旱性较强,属于强耐旱型种质。Z490、1309V、3017A、2545H、2508HV、1154H、1196H、1198H、1249H、2414H、4240B、3340B、4226BV、1130H、1206H、2417H、1203H、2455V、1139H 和 1192H 的相对贴进度相对较小,表明其耐旱性较弱,属于干旱敏感型种质。

表 6 高粱种质萌发期各材料耐旱性的相对贴进度及排序

Table 6 Relative progress and ranking of drought tolerance of sorghum germplasm at germination stage

材料名称 Materials name	相对贴进度 Relative closeness	排序 Ranking	材料名称 Materials name	相对贴进度 Relative closeness	排序 Ranking
1232H	0.685	1	Z490	0.304	260
2710H	0.680	2	1309V	0.293	261
1177HV	0.672	3	3017A	0.292	262
3020A	0.671	4	2545H	0.288	263
3041A	0.669	5	2508HV	0.285	264
1250H	0.658	6	1154H	0.285	265
33H	0.656	7	1196H	0.273	266
2568	0.653	8	1198H	0.270	267
1158H	0.651	9	1249H	0.258	268
2811H	0.651	10	2414H	0.257	269
2823H 甜 2823H Tian	0.638	11	4240B	0.248	270
1107H	0.630	12	3340B	0.247	271
43H	0.628	13	4226BV	0.232	272
2764H	0.628	14	1130H	0.212	273
1175H	0.624	15	1206H	0.206	274
3023A	0.623	16	2417H	0.200	275
1143H	0.621	17	1203H	0.192	276
6H	0.621	18	2455V	0.187	277
3018A	0.605	19	1139H	0.134	278
3326B	0.600	20	1192H	0.114	279

2.6 高粱种质萌发期耐旱性聚类分析

由于综合评价 *D* 值和相对贴进度都是无量纲的纯数,因此,可以将每个种质所对应的综合评价 *D* 值和相对贴进度求平均值,得到新的综合评价值,再采用欧式距离及类平均法对其进行聚类分析,结果将 279 份高粱种质划分为五大类(图 3),第Ⅰ类包含 29 个高粱种质,这一类群占种质材料的10.4%,属于极耐旱种质;第Ⅱ类包含 170 个高粱种质,这一类群占种质材料的 60.9%,属于耐旱种质;第Ⅲ类包含 52 个高粱种质,这一类群占种质材料的 18.6%,属于中度耐旱种质;第Ⅳ类包含 12 个高粱种质,这一类群占种质材料的 4.3%,属于干旱敏感种质;第Ⅴ类包含 16 个高粱种质,这一类群占种质材料的 5.7%,属于干旱高度敏感种质。

3 讨 论

干旱是一种综合的胁迫条件,在植物不同生长阶段,不同的干旱胁迫持续时间和严重程度会使作物产量受到严重限制[23]。萌发期是植物生命周期中最关键和最敏感的时期[24],种子暴露于干旱等不利环境条件,会损害后续幼苗的形态建成,导致幼苗无法正常生长发育[25]。因此,探究作物萌发期耐旱性的强弱,是选育耐旱品种较为重要的环节。

植物耐逆性往往因生育期而异,耐逆性的种类很多,如耐旱性、耐冷性、耐盐碱性和耐高温性等,其中耐旱性一般具有形态结构耐旱和生理生化耐旱两种特性,在生长发育的各个阶段表现不同[26]。耐旱鉴定就是按作物品种、品系或种质资源耐旱能力进行筛选、评价和归类的过程,通过耐旱鉴定可以为耐旱育种提供优异的种质资源[27]。植物的抗旱性是多因子共同作用下的一个复杂的数量性状,不同种质间抗旱机制差异较大,造成不同种质对同一指标的抗旱响应差异也较大,采用单个指标难以全面、精确地反映其抗旱能力,需采用多指标综合评估。

不同种质材料在逆境胁迫下每个性状均会表现出一定的差异,根据各性状的差异表现,制定适宜的育种计划,是选育抗逆品种的关键。张娟伟等[28]利用 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫 139 份粳稻种质资源材料,统计分析了 8 个耐旱相关指标的变异情况发现,活力指数的变异系数最大,相对发芽率的变异系数最小,除相对发芽率外,其他 7 个耐旱指标的变异系数均大于 25%。樊瑀等[29]在探究谷子萌发期各指标对干旱胁迫的响应时发现,每个指标对干旱胁迫的敏感程度存在一定差异,相对发芽势和相对萌发指数对干旱较为敏感,相对根干质量和相对芽干质量对干旱相对不敏感。本研究通过预试验筛选出的最佳 PEG-6000 浓度(15%)对 279 份高粱种质进行模拟干旱胁迫试验发现,除发芽势、发芽率和发芽指数变异系数较小以外,其余 6 个耐旱指标的变异系数均较大,说明这些指标较为敏感,易受干旱胁迫的影响,同时也说明这些指标在 279 份种质资源之间存在着丰富的变异,适合进行耐旱种质资源的筛选与鉴定,这与前人研究结果基本一致[28,30]。

多元分析能够同时处理多个具有共同效应的变量,从中归纳出相似的数据模式,并阐明数据内部结构[31]。主成分分析是最常用的多元分析方法,主成分通过降维的方法把多个变量综合成为几个相对独立的综合指标,从而科学评价综合性状[32-33]。隶属函数法则是一种在多指标测定基础上对材料进行综合评价的方法[34]。本研究将主成分分析和隶属函数法相结合,通过计算得到综合评价 *D* 值,基于 *D* 值将 279 份高粱种质划分为耐旱、中度耐旱和旱敏感 3 种类型,较为准确地评价了 279 份高粱种质的耐旱性,这与李王胜等[35]对甜菜种质资源的耐旱性评价结果基本相似。

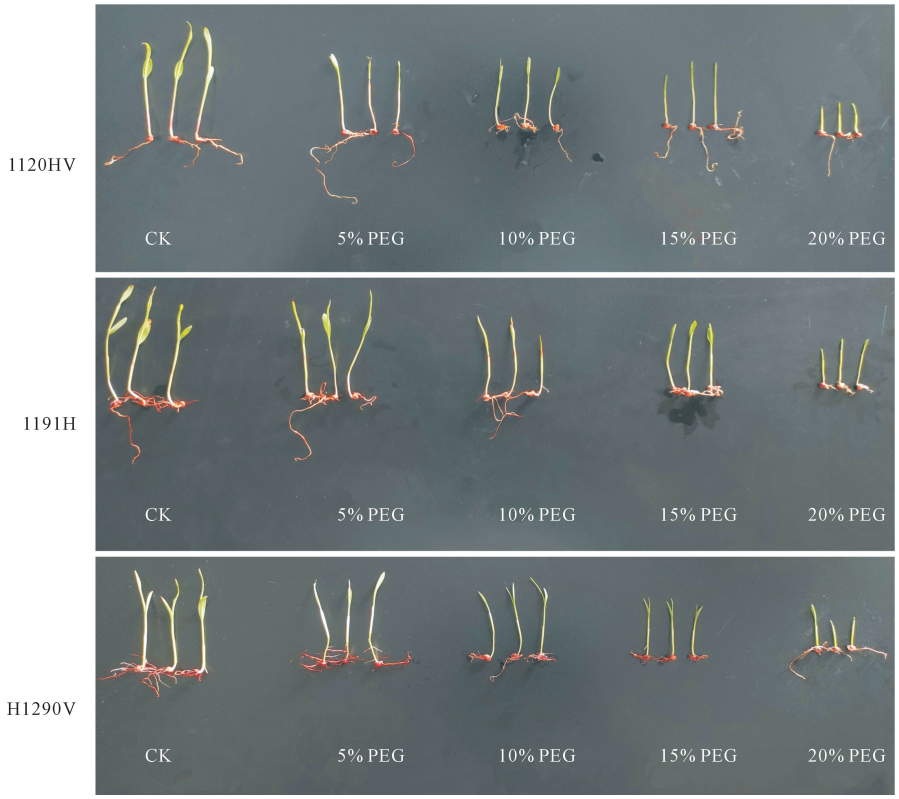


图 2　不同 PEG-6000 溶液浓度下高粱种质长势差异

Fig.2　Differences in sorghum germplasm growth under different concentrations of PEG-6000 solution

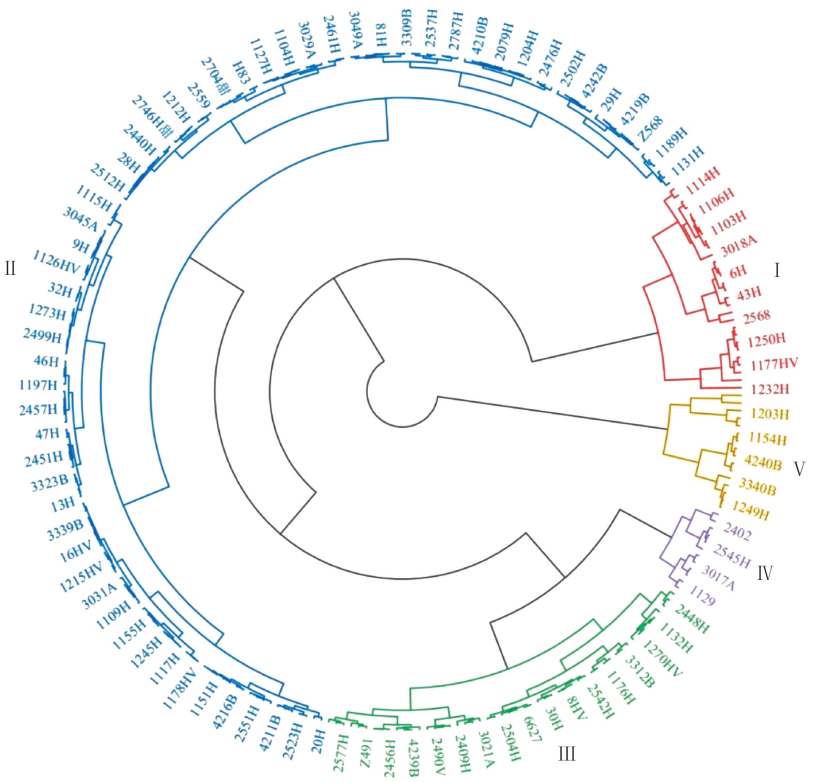


图 3　高粱种质萌发期耐旱性聚类图

Fig.3　Cluster diagram of drought tolerance of sorghum germplasm at germination stage

灰色关联度分析具有对系统和事物的动态过程进行研究的优势[36],同时又可以用来识别影响作物耐旱性的主要因素[37]。而DTOPSIS法不仅避免了以往评价中只强调某几项要素指标而忽略其他指标的问题,而且能详细比较各指标间的差异,根据相对贴进度来判别不同品种或种质的耐逆性,方法简便、直观[38]。本研究运用灰色关联度法计算求得的权重系数,相较于人为确定的权重系数更具客观性和可靠性,同时发现权重系数的总变幅为0.0788~0.1592,各指标的权重差异不大,表明将其运用于DTOPSIS进行计算的合理性,同时也加强了两种分析方法的关联性。

通过以上方法,本研究证明279份高粱种质的*D*值和相对贴进度结果高度符合,1232H、2710H、1177HV、3020A和3041A等种质在两种排序结果中均排名靠前,说明其具有强耐旱性;1192H、1139H、2455V、1203H和2417H等种质在两种排序结果中均排名靠后,说明其表现出高度干旱敏感性,这也从侧面印证了这两种综合评价方法的可靠性。由于两种综合评价的排序结果高度符合,并且*D*值和相对贴进度都是无量纲的纯数,因此,将每个种质所对应的综合评价*D*值和相对贴进度求平均值,得到新的综合评价值,基于新的综合评价值进行聚类分析,结果将279份高粱种质划分为极耐旱种质、耐旱种质、中度耐旱种质、干旱敏感种质和干旱高度敏感种质五大类,这一结果与闫治斌等[39]对88份玉米自交系进行耐旱性类群划分结果基本一致。基于耐旱性类群划分,可将最耐旱和最敏感的基因型进一步用于杂交计划,以创造最大的遗传变异。

4 结 论

对279份高粱种质进行了萌发期耐旱性鉴定,确定了发芽势、发芽率和发芽指数3个耐旱关键指标;将279份高粱种质划分为五大类,分别包含29个极耐旱种质、170个耐旱种质、52个中度耐旱种质、12个干旱敏感种质和16个干旱高度敏感种质。

参 考 文 献:

[1] 杨宏羽, 平海涛, 王蒂, 等. 不同倍性马铃薯品种的抗旱性[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1041-1049.
YANG H Y, PING H T, WANG D, et al. Drought resistance of different ploidy potato varieties[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1041-1049.

[2] 牟舒敏, 张丽娟, 李红兵, 等. 三种转基因甘薯响应PEG-6000模拟干旱胁迫的生理性差异[J]. 植物生理学报, 2023, 59(7): 1339-1350.
MU S M, ZHANG L J, LI H B, et al. Physiological differences of three transgenic sweet potatoes in response to PEG-6000-imitated drought stress[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(7): 1339-1350.

[3] BRODERSEN C R, RODDY A B, WASON J W, et al. Functional status of xylem through time[J]. Annual Review of Plant Biology, 2019, 70: 407-433.

[4] ABBASI T, ABBASI S A. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 919-937.

[5] O'CONNELL E. Towards adaptation of water resource systems to climatic and socio-economic change[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 2965-2984.

[6] PASSIOURA J B, ANGUS J F. Chapter 2-improving productivity of crops in water-limited environments[J]. Advances in Agronomy, 2010, 106: 37-75.

[7] DARYANTO S, WANG L X, JACINTHE P A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: a review[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 18-33.

[8] SALEHI-LISAR S Y, BAKHSHAYESHAN-AGDAM H. Agronomic crop responses and tolerance to drought stress[M]//HASANUZZAMAN M. Agronomic Crops. Singapore: Springer, 2020: 63-91.

[9] MABELEBELE M, SIWELA M, GOUS R M, et al. Chemical composition and nutritive value of South African sorghum varieties as feed for broiler chickens[J]. South African Journal of Animal Science, 2015, 45(2): 206-213.

[10] ESPITIA-HERNÁNDEZ P, CHÁVEZ GONZÁLEZ M L, ASCACIO-VALDÉS J A, et al. Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as a potential source of bioactive substances and their biological properties[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(8): 2269-2280.

[11] OGBAGA C C, STEPIEN P, JOHNSON G N. Sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties adopt strongly contrasting strategies in response to drought[J]. Physiologia Plantarum, 2014, 152(2): 389-401.

[12] 朱丽丽, 张发玉, 安宁, 等. 116份藜麦种质资源萌发期抗旱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 23-31.
ZHU L L, ZHANG F Y, AN N, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 116 quinoa germplasm resources during germination[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 23-31.

[13] 熊雪, 郎万鑫, 王春芳, 等. 不同谷子品种萌发期抗旱性综合评价[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 93-97.
XIONG X, LANG W X, WANG C F, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of different millet cultivars at germination stage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(23): 93-97.

[14] 王永刚, 张胜军, 刘亚丽, 等. 新疆冬小麦品种资源萌发期耐旱性鉴定与筛选[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(11): 2024-2034.
WANG Y G, ZHANG S J, LIU Y L, et al. Identification and screening of drought tolerance in winter wheat cultivars in Xinjiang during germination period[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(11): 2024-2034.

[15] 张瑞栋, 梁晓红, 刘静, 等. 种子引发对干旱胁迫下高粱种子发芽及生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2022, (6): 234-240.
ZHANG R D, LIANG X H, LIU J, et al. Effects of seed priming on germination and physiological characteristics of sorghum seeds under drought stress[J]. Crops, 2022, (6): 234-240.

[16] HARRIS-SHULTZ K R, HAYES C M, KNOLL J E. Mapping QTLs and identification of genes associated with drought resistance in sorghum[J]. Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.), 2019, 1931: 11-40.

[17] ASHRAF M. Inducing drought tolerance in plants: recent advances [J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(1): 169-183.

[18] KEBEDE H, SUBUDHI P K, ROSENOW D T, et al. Quantitative trait loci influencing drought tolerance in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench)[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2001, 103(2): 266-276.

[19] FRACASSO A, TRINDADE L M, AMADUCCI S. Drought stress tolerance strategies revealed by RNA-seq in two sorghum genotypes with contrasting WUE[J]. BMC Plant Biology, 2016, 16(1): 115.

[20] 邓艳凤, 肖水平, 刘新稳, 等. 主成分分析和隶属函数法对早熟棉 F1 代材料的综合评价[J]. 亚热带农业研究, 2022, 18(1): 1-6.
DENG Y F, XIAO S P, LIU X W, et al. Comprehensive evaluation of early-maturing cotton F1 materials by principal component analysis and membership function method[J]. Subtropical Agriculture Research, 2022, 18(1): 1-6.

[21] IEZZONI A F, PRITTS M P. Applications of principal component analysis to horticultural research[J]. HortScience, 1991, 26(4): 334-338.

[22] 肖继兵, 刘志, 辛宗绪, 等. 基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 34-44.
XIAO J B, LIU Z, XIN Z X, et al. Identification of drought tolerance in foxtail millet during its entire growth period based on principal component analysis and membership function[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 34-44.

[23] MUSCOLO A, SIDARI M, ANASTASI U, et al. Effect of PEG-induced drought stress on seed germination of four lentil genotypes[J]. Journal of Plant Interactions, 2014, 9(1): 354-363.

[24] AHMAD S, AHMAD R, ASHRAF M Y, et al. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) response to drought stress at germination and seedling growth stages[J]. Pakistan Journal of Botany, 2009, 41(2): 647-654.

[25] DE FIGUEIREDO E ALBUQUERQUE M C, DE CARVALHO N M. Effect of the type of environmental stress on the emergence of sunflower (*Helianthus annus* L.), soybean (*Glycine max* (L.) Merril) and maize (*Zea mays* L.) seeds with different levels of vigor[J]. Seed Science and Technology, 2003, 31(2): 465-479.

[26] 王仁刚, 丁福章, 林世锋, 等. 14 个烤烟品种在干旱胁迫下的生理变化及其抗旱性评价[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(10): 64-66, 71.
WANG R G, DING F Z, LIN S F, et al. Physiological changes and drought resistance of 14 flue-cured varieties under drought stress[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(10): 64-66, 71.

[27] 白志英, 李存东, 孙红春, 等. 小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4264-4272.
BAI Z Y, LI C D, SUN H C, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation on physiological indices of drought resistance in wheat substitution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12): 4264-4272.

[28] 张娟伟, 石亚飞, 路旭平, 等. 种子萌发期粳稻种质资源耐旱性综合评价[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2093-2103.
ZHANG J W, SHI Y F, LU X P, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of japonica rice germplasm resources at seed germination stage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(11): 2093-2103.

[29] 樊瑀, 董淑琦, 原向阳, 等. 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(6): 42-54.
FAN Y, DONG S Q, YUAN X Y, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of foxtail millet germplasm resources during germination period and drought resistance index screening[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(6): 42-54.

[30] 张海平, 张俊峰, 陈妍, 等. 大豆种质资源萌发期耐旱性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(1): 130-138.
ZHANG H P, ZHANG J F, CHEN Y, et al. Identification and evaluation of soybean germplasm resources for drought tolerance during germination stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(1): 130-138.

[31] BIBI A, SADAQAT H A, TAHIR M H N, et al. Screening of sorghum (*Sorghum bicolor* Var Moench) for drought tolerance at seedling stage in polyethylene glycol[J]. The Journal of Animal & Plant Sciences, 2012, 22(3): 671-678.

[32] 卿春燕, 王秀全, 卢庭启, 等. 主成分分析法研究玉米新品种协玉 901 的最适密度和氮肥量[J]. 中国种业, 2022, (8): 89-94.
QING C Y, WANG X Q, LU T Q, et al. The optimum density and nitrogen fertilizer amount of new maize variety Xieyu 901 were studied by principal component analysis[J]. China Seed Industry, 2022, (8): 89-94.

[33] 吴国江, 周伟, 余忠浩, 等. 基于主成分、灰色关联和 DTOPSIS 分析的 176 份糯高粱种质资源综合评价[J]. 河南农业科学, 2023, 52(5): 40-51.
WU G J, ZHOU W, YU Z H, et al. Comprehensive evaluation of 176 waxy sorghum germplasm resources based on principal component, grey correlation and DTOPSIS analyses[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(5): 40-51.

[34] 田艺心, 曹鹏鹏, 高凤菊. 基于主成分、隶属函数和聚类分析的大豆耐盐性综合评价[J]. 山东农业科学, 2020, 52(4): 16-22.
TIAN Y X, CAO P P, GAO F J. Comprehensive evaluation on soybean salt tolerance based on principal component, membership function and cluster analyses[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(4): 16-22.

[35] 李王胜, 王雪倩, 尹希龙, 等. 甜菜种质资源苗期耐旱性综合评价[J]. 作物杂志, 2022, (6): 54-60.
LI W S, WANG X Q, YIN X L, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of sugar beet germplasms at seedling stage[J]. Crops, 2022, (6): 54-60.

[36] 张莎. 灰色关联分析新算法研究及其意义[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
ZHANG S. The study on the new algorithms of grey relational analysis and its significance[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.

[37] WANG N, WANG Y T, YU J L, et al. Prioritization of feasible physiological parameters in drought tolerance evaluation in sorghum: a grey relational analysis[J]. Zemdirbyste-Agriculture, 2015, 102(4): 457-464.

[38] 高桂芹, 王秀玲, 郑艳萍, 等. 唐山引种紫花苜蓿 TOPSIS 生态适宜性评价[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 378-381.
GAO G Q, WANG X L, ZHENG Y P, et al. Assessment on growing division of alfalfa (*Medicago sativa*) sowed on Tang-Shan by means of TOPSIS[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(17): 378-381.

[39] 闫治斌, 罗致春, 段卫稷, 等. 玉米自交系耐旱性鉴定与评价[J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 8-14.
YAN Z B, LUO Z C, DUAN W J, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of maize inbred lines[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(4): 8-14.