

PEG-6000 胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价

陈 新¹, 宋高原², 张宗文^{1,2}, 吴 斌²

(¹国际生物多样性中心东亚办事处, 北京 100081; ²中国农业科学院作物科学研究所/Bioversity-CAAS 农业生物多样性中心, 北京 100081)

摘要:以 17 个裸燕麦品种为试材, 测定了 20% PEG-6000 水溶液模拟干旱胁迫下各品种的发芽势、发芽率、发芽指数等 11 个鉴定指标。以鉴定指标的相对值为抗旱性评价指标, 在主成分分析的基础上, 利用加权隶属函数法对供试裸燕麦品种的抗旱性进行了综合评价, 然后对不同鉴定指标在抗旱性评价中的作用进行了比较分析。结果表明: 不同裸燕麦品种的抗旱性可由不同鉴定指标来体现; 鉴定指标中的种子活力指数 (VI) 受干旱胁迫的影响最大, 并与萌发期抗旱性的关系最为密切, 可用于裸燕麦种质萌发期抗旱性的快速或初步鉴定; 通过测定发芽率、平均发芽速度、最长初生根长、初生根总长、胚芽鞘长、种子活力指数, 可有效预测裸燕麦品种萌发期的抗旱性; 通过比较供试品种的抗旱性综合评价值 (D 值), 筛选出 N-C33 IV-45-16、grosse 和高千四号 3 个抗旱性较强的裸燕麦品种, 可用于抗旱栽培或抗旱育种。

关键词:裸燕麦; 萌发期; 抗旱性; 鉴定指标; 综合评价

Identification and Evaluation of Drought Resistance of Naked Oat (*Avena nuda* L.) under PEG-6000 Stress at Germination Stage

CHEN Xin¹, SONG Gao-yuan², ZHANG Zong-wen^{1,2}, WU Bin²

(¹Bioversity International East Asia Office, Beijing 100081; ²Bioversity-CAAS Center of Excellence for Agrobiodiversity/Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Germination energy, germination rate, germination index, and other eight identification indices of seventeen varieties of naked oat were measured under drought stress simulated with 20% PEG-6000. According to the relative value of eleven identification indices as evaluation indices, drought resistance of oat varieties was evaluated comprehensively with the method of weighted membership function on the basis of the principal component analysis. The role that identification indices played in evaluation of drought resistance among different varieties was compared. The results showed that vigor index (VI) was the most susceptible to drought stress, and the closest to the comprehensive evaluation value of drought resistance and could be used for rapid and preliminary identification of drought resistance of naked oat germplasm at germination stage. An optimal regression model for the comprehensive evaluation of drought resistance was established and could be used to effectively predict the drought resistance of naked oat varieties at germination period through measuring germination rate, average germination velocity, length of the longest primary root, total length of primary roots, coleoptile length, and vigor index of seed. Three varieties, named N-C33 IV-45-16, grosse, and Gaoqian Sihao with stronger resistance to drought stress were identified through comparing the comprehensive value of drought resistance among tested varieties, and could be used for cultivation and breeding under dry conditions.

Key words: *Avena nuda* L.; germination stage; drought resistance; identification index; comprehensive evaluation

收稿日期: 2014-02-11 修回日期: 2014-03-12 网络出版日期: 2014-10-13

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20141013.2034.024.html>

基金项目: 国际生物多样性中心合作项目 (APO12/003); 农业部作物种质资源保护专项 (NB2012-2130135-25-06)

第一作者从事小宗作物抗逆性研究。E-mail: x.chen@cgiar.org

通信作者: 张宗文, 从事小宗作物种质资源研究。E-mail: zhangzongwen@caas.cn

燕麦属(*Avena*)的栽培种是一年生草本植物,具有较强的适应性和抗逆性以及较高的营养价值,是一种粮、饲、药多用途作物。目前,生产上广泛种植的是裸燕麦(*A. nuda* L.)和皮燕麦(*A. sativa* L.)^[1]。我国以种植裸燕麦为主,主要用作粮食;燕麦种植区主要集中在西北、华北、西南等地区的高海拔、干旱和冷凉地带^[2]。随着气候变化,季节性干旱或不定期干旱在这些地区愈加频繁发生,因而抗旱性研究已成为裸燕麦研究中的重要内容之一。

多年来,国内外学者在作物抗旱性鉴定、评价方面做了大量工作,提出了形态特征、生理生化特性、生长发育性状等方面的许多鉴定指标,并指出多指标的综合评价是必要的^[3]。萌发期是作物适应干旱胁迫最为关键的时期,决定着立苗和后期的生长发育^[4],因此,很多学者都非常重视萌发期的抗旱性研究。对作物萌发期抗旱性的鉴定常采用聚乙二醇(PEG)、甘露醇等高渗溶液模拟干旱胁迫的方法^[5-6],其中以 PEG-6000 使用最为广泛^[7-9]。发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、平均发芽速度、胚芽鞘长、胚芽长、胚根长以及衍生出的种子萌发指数^[10]、种子活力指数^[11]等是水稻^[8]、小麦^[9]、玉米^[11]、大麦^[12]等作物萌发期抗旱性鉴定的常用指标,但未见对这些鉴定指标进行比较分析的研究报道。与小麦、水稻、玉米、大麦等作物相比,对燕麦萌发期抗旱性的研究较少,齐华等^[13]以种子萌发指数为依据,对 14 个燕麦品种在萌发期的发芽率、胚根长、胚根干重、贮藏物质转运率等鉴定指标进行了比较,分析指出胚根长、胚根干重、贮藏物质转运率可作为燕麦萌发期抗旱性的鉴定指标,但贾志国等^[14]认为发芽势、发芽率比贮藏物质转运率更适用于燕麦萌发期的抗旱性鉴定。对于裸燕麦抗旱研究仅有零星报道,牛瑞明等^[15]根据 4 种胁迫强度下的种子萌发指数、种子活力指数、发芽率、发芽势,利用平均隶属函数法从 15 份裸燕麦材料中筛选出了 2 份抗旱性较强的品种(坝莜 6 号和坝莜 3 号)。鉴于此,本研究以不同地理来源的 17 个裸燕麦品种为试材,以发芽势、发芽率等 11 个鉴定指标的相对值为评价指标,在主成分分析的基础上,利用加权隶属函数法对裸燕麦萌发期的抗旱性进行了综合评价,然后对不同鉴定指标在抗旱性评价中的作用进行了比较分析,以期为抗旱性鉴定指标的选择与综合评价提供方法指导,为选择抗旱育种亲本材料提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试裸燕麦品种 17 个,均由中国农业科学院国家农作物种质资源保存中心提供,试验所用种子是 2013 年繁殖的,品种信息详见表 1。

表 1 供试裸燕麦品种地理来源及编号

Table 1 Geographical origin and code of tested varieties of naked oat

编号 Code	品种名称 Variety name	地理来源 Geographical origin
1	578	河北
2	冀杂二号	河北
3	蒙燕 7309	内蒙古
4	D 16	内蒙古
5	左之大莜麦	山西
6	老莜麦	甘肃
7	老莜麦	甘肃
8	N-C33 IV-45-16	加拿大
9	grosse	丹麦
10	品 5 号	河北
11	品 14	河北
12	品 7752-8-2	河北
13	高千四号	内蒙古
14	系左莜麦	山西
15	品 2	内蒙古
16	小莜麦	内蒙古
17	二不秋莜麦	山西

1.2 试验方法

根据《农作物种子检验规程 - 发芽试验》(GB/T 3543.4—1995)进行发芽试验。每个品种挑取饱满无残缺、大小基本一致的种子,用 5% 次氯酸钠浸泡 15 min 进行消毒处理,然后用自来水冲洗 2 min,再用蒸馏水淘洗 1 min,于纱布上摊开自然晾干备用。每个品种设蒸馏水对照和渗透胁迫 2 种处理,各处理 3 次重复,1 个培养皿(Φ 9 cm)为 1 次重复,每皿平铺 2 张中性滤纸(Φ 10 cm)。用移液枪向进行渗透胁迫的培养皿中加入 20% PEG-6000 水溶液^[13](20℃下渗透势约为 - 0.66 MPa^[7]) 8 mL,对照中加入蒸馏水 8 mL,再用镊子(70%酒精消毒)将已晾干的种子均匀地摆放在培养皿中,随机挑选,每皿 50 粒,盖上皿盖。最后将培养皿一起放入人工气候培养箱(Percival AR-36L3),培养条件:20℃恒

温、相对湿度 $60\% \pm 3\%$ 、每天光照 12 h (6:00-18:00)、光照强度 $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。培养 10 d, 用蒸馏水补充水分损失, 保持滤纸水分饱和状态。

1.3 鉴定指标

以胚根至少与种子等长、芽长不短于种子长的 1/2 为发芽标准。从培养的第 2 天开始, 每天在固定时间段里调查各重复的发芽数。分别以各品种第 5 天、第 10 天的萌发率为其发芽势 (GE, germination energy)、发芽率 (GR, germination rate)。培养至第 10 天 (约 240 h) 时, 从 3 个重复中随机挑选 10 株正常生长的幼苗, 吸干幼苗表面附着水分后剪下初生根、胚芽, 分别测定初生根数 (NPR, number of primary root)、最长初生根长 (LLPR, length of the longest primary root)、初生根总长 (TLPR, total length of primary roots) 以及胚芽鞘长 (CL, length of coleoptile)、胚芽长 (SL, length of shoot)。萌发率 (GP, germination percentage)、发芽指数 (GI, germination index)、平均发芽速度 (GV, average of germination velocity)^[16]、种子萌发指数 (PI, promptness index)^[10]、种子活力指数 (VI, vigor index)^[11] 计算公式如下:

$$GP = (\text{发芽种子总数} / \text{种子总数}) \times 100 \quad (1)$$

$$GI = \sum (G_t / D_t) \quad (2)$$

$$GV = \sum (G_t \times D_t) / \sum G_t \quad (3)$$

$$PI = 1.00 \times nd_2 + 0.75 \times nd_4 + 0.50 \times nd_6 + 0.25 \times nd_8 \quad (4)$$

$$VI = PI \times SL \quad (5)$$

式中: G_t 为第 t 天的发芽数, D_t 为萌发第 t 天; nd_2 、 nd_4 、 nd_6 、 nd_8 分别为第 2 天、第 4 天、第 6 天、第 8 天的种子萌发率。

为了消除品种间种子活力所带来的差异, 依据公式 (鉴定指标相对值 = 胁迫下指标值/对照指标值) 计算相对发芽势 (X_1)、相对发芽率 (X_2)、相对发芽指数 (X_3)、相对平均发芽速度 (X_4)、种子萌发抗旱指数 (X_5)、相对初生根数 (X_6)、相对最长初生根长 (X_7)、相对初生根总长 (X_8)、相对胚芽鞘长 (X_9)、相对胚芽长 (X_{10})、种子活力抗旱指数 (X_{11})。

1.4 数据整理与分析

加权隶属函数法和灰色关联度分析相关公式如下:

$$\mu(Z_j) = (Z_j - Z_{j\min}) / (Z_{j\max} - Z_{j\min}) \quad (j = 1, 2, 3) \quad (6)$$

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (7)$$

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(Z_j) \cdot W_j] \quad (8)$$

$$X'_i(k) = [X_i(k) - \bar{X}_i] / S_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 11) \quad (9)$$

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_k |X'_0(k) - X'_i(k)| + \rho \max_k |X'_0(k) - X'_i(k)|}{|X'_0(k) - X'_i(k)| + \rho \max_k |X'_0(k) - X'_i(k)|} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, 17) \quad (10)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \quad (11)$$

式中: Z_j 为各品种综合指标 j 的值, $Z_{j\max}$ 、 $Z_{j\min}$ 分别为各品种中 Z_j 的最大值和最小值, $\mu(Z_j)$ 为各品种 Z_j 的隶属函数值, P_j 为综合指标 j 的贡献率, W_j 为综合指标 j 的权重, D 为各品种的抗旱性综合评价值; $X_i(k)$ 为品种 k 在鉴定指标 i 上的相对值, $X_0(k)$ 表示品种 k 的 D 值, \bar{X}_i 、 S_i 分别为所有供试品种鉴定指标 i 相对值的平均值、标准差, $X'_i(k)$ 为 $X_i(k)$ 无量纲化后的标准值, $X'_0(k)$ 为 $X_0(k)$ 无量纲化后的标准值, $\zeta_i(k)$ 表示 $X_i(k)$ 与 D 值的关联系数, ρ 为分辨系数 (本文取值 0.5), γ_i 表示 $X_i(k)$ 与 D 值的关联度。

利用 Excel 2007 整理试验数据, 使用 SPSS Statistics 17.0 进行相关性分析、主成分分析和逐步回归分析, 利用 GGE biplot V 6.3 作双标图。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同裸燕麦品种萌发的影响

根据 11 个鉴定指标的相对值 (表 2), 在 20% PEG-6000 的干旱胁迫下, 所有品种的发芽势、发芽率、发芽指数、最长初生根长、初生根总长、胚芽长、种子活力抗旱指数都小于蒸馏水对照下的测定值, 说明这些性状都受到了干旱胁迫的抑制作用; 而平均发芽速度 (GV, 种子萌发所需要的天数) 均高于对照, 如编号 7 (老莪麦) 在胁迫下所需的发芽天数甚至是对照的 2 倍多, 即干旱胁迫延长了编号 7 种子萌发天数 1 倍多, 这表明 GV 值越大, 种子萌发所需的天数就越长, 受干旱胁迫的抑制作用就越大; 除了编号 6、8、9、12 以外, 其他品种的种子萌发指数都小于对照; 编号 4、8、10、11、16 的初生根数稍多于对照, 编号 13 的初生根数明显多于对照, 其他品种的初生根数与对照的差异不大; 大多数品种的胚芽鞘长略小于对照, 但编号 1、5、8、9、10、11、13、14 稍高于对照。

由表 2 可知, 11 个鉴定指标的相对值在 17 个裸燕麦品种中的变异程度并不一致。变异系数越大则变异程度越大, 说明该鉴定指标对干旱胁迫越敏感, 反之则受影响越小, 如种子活力指数 (X_{11}) 的变异系数最大, 因而在品种之间的差异最大, 表明种子活力指数 (VI) 对干旱胁迫最为敏感; 相对胚芽鞘长

(X_9)的变异系数最小,说明胚芽鞘长(CL)对干旱胁迫最不敏感(受影响最小)。基于各鉴定指标相对值变异系数的大小,11个鉴定指标对于干旱胁迫的

敏感程度由大到小依次为:VI > PI > GE > TLPR > LLPR > GR > GI > SL > GV > NPR > CL。

表 2 17 个裸燕麦品种萌发期 11 个鉴定指标的相对值

Table 2 Relative values of eleven identification indices of seventeen oat varieties at germination stage

编号 Code	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
1	0.1194	0.5118	0.3767	1.2590	0.3841	0.8750	0.3150	0.3010	1.0541	0.4583	0.1760
2	0.2353	0.4683	0.3137	1.3587	0.2741	0.9259	0.3923	0.3579	0.9638	0.5747	0.1575
3	0.2222	0.4198	0.2695	1.4829	0.1481	0.8136	0.2710	0.2848	0.8148	0.4148	0.0614
4	0.3750	0.7050	0.3831	1.7071	0.3057	1.0000	0.2592	0.3239	0.9133	0.4919	0.1503
5	0.1653	0.5493	0.3094	1.7563	0.2321	0.9455	0.1973	0.2234	1.0488	0.4713	0.1094
6	0.2121	0.7254	0.3802	1.8827	1.0282	0.9787	0.3139	0.3415	0.9467	0.4714	0.4847
7	0.1087	0.5862	0.2931	2.0024	0.6837	0.7833	0.3036	0.2926	0.9781	0.4616	0.3156
8	0.3419	0.8936	0.5240	1.6313	1.3333	1.0179	0.5150	0.5438	1.0353	0.6801	0.9068
9	0.3810	0.8733	0.4869	1.8232	1.3548	0.9692	0.3535	0.4125	1.0291	0.6608	0.8953
10	0.4949	0.8361	0.5297	1.4170	0.7797	1.1064	0.3494	0.3936	1.0179	0.5811	0.4530
11	0.2394	0.7008	0.4977	1.2845	0.5000	1.0200	0.4540	0.4436	1.0461	0.6344	0.3172
12	0.2991	0.8873	0.5222	1.4511	1.1652	0.9661	0.3184	0.3320	0.9427	0.5152	0.6003
13	0.4112	0.9127	0.5728	1.4738	0.9813	1.3415	0.4024	0.4946	1.0162	0.6004	0.5892
14	0.2520	0.7014	0.3965	1.6544	0.8727	0.9444	0.3796	0.3790	1.0385	0.5074	0.4428
15	0.0779	0.6293	0.4377	1.2990	0.2913	0.9796	0.3341	0.3543	0.9935	0.6705	0.1953
16	0.3488	0.8417	0.4415	1.8242	0.4661	1.0385	0.3947	0.4360	0.9319	0.5953	0.2775
17	0.0952	0.6842	0.3915	1.6123	0.4779	0.7937	0.2709	0.2787	0.8796	0.5419	0.2590
最小值 Min.	0.0779	0.4198	0.2695	1.2590	0.1481	0.7833	0.1973	0.2234	0.8148	0.4148	0.0614
最大值 Max.	0.4949	0.9127	0.5728	2.0024	1.3548	1.3415	0.5150	0.5438	1.0541	0.6801	0.9068
平均值 Average	0.2576	0.7015	0.4192	1.5835	0.6634	0.9705	0.3426	0.3643	0.9794	0.5489	0.3760
标准差 SD	0.1221	0.1572	0.0923	0.2274	0.3967	0.1299	0.0769	0.0829	0.0677	0.0830	0.2551
变异系数 CV	0.4741	0.2241	0.2202	0.1436	0.5980	0.1338	0.2243	0.2276	0.0691	0.1513	0.6785

2.2 萌发期抗旱性综合评价

2.2.1 抗旱性评价综合指标的筛选 以鉴定指标的相对值(X_1, X_2, \dots, X_{11})为评价指标,对于某一品种,基于11个评价指标的排序是不一致的(表2)。如品种10的相对发芽势(X_1)最大,而其他的评价指标却并非最大。因此,利用其中单一评价指标进行抗旱性评价都是片面的,有必要对这些评价指标进行系统分析以筛选最适合的综合指标。

对11个评价指标进行相关关系显著性分析,结果显示许多评价指标之间呈现显著或极显著相关(表3)。如 X_1 与 X_2 呈极显著相关性(0.683**),二者都是反映种子萌发情况的指标,即可认为相对发

芽势(X_1)与相对发芽率(X_2)所携带的种子萌发方面的信息中68.3%是相同的,其他具有相关性的评价指标之间也存在这种信息重叠的现象。因此,所筛选的综合指标应该既能有效代表所有单项评价指标,而且彼此独立,没有信息重叠。

对11个评价指标进行主成分分析,分析结果如表4所示。根据特征值大于1以及累积贡献率大于80%的原则,选取前3个主成分作为综合指标,可有效反映原11个评价指标全部81.29%的信息。由表4中3个综合指标的系数可知,在PC1中起主要作用的是 X_3, X_8, X_2, X_{11} ,对应的鉴定指标分别是发芽指数、初生根总长、发芽率、种子活力指数,可概括

为萌发因子;在 PC2 中起主要作用的是 X_4 、 X_5 , 对应的鉴定指标分别为平均发芽速度、种子萌发指数, 也为萌发因子;在 PC3 中起主要作用的是 X_1 、 X_9 、 X_6 , 对应的鉴定指标分别为发芽势、胚芽鞘长、初生根

数, 则概括为生长因子。由此看出, 萌发指标对抗旱性评价尤为重要, 在裸燕麦萌发期的抗旱性综合评价中应重点考察这类指标。

表 3 17 个裸燕麦品种萌发期评价指标间的简单相关性

Table 3 Linear correlation among evaluation indices of seventeen oat varieties at germination stage

指标相对值 Relative value	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1	1.000										
X_2	0.683 **	1.000									
X_3	0.627 **	0.885 **	1.000								
X_4	0.048	0.191	-0.264	1.000							
X_5	0.469	0.787 **	0.649 **	0.293	1.000						
X_6	0.703 **	0.658 **	0.754 **	-0.188	0.351	1.000					
X_7	0.382	0.479	0.606 **	-0.239	0.477	0.451	1.000				
X_8	0.612 **	0.697 **	0.766 **	-0.119	0.578 *	0.689 **	0.922 **	1.000			
X_9	0.115	0.257	0.405	-0.145	0.339	0.381	0.397	0.366	1.000		
X_{10}	0.338	0.574 *	0.703 **	-0.227	0.381	0.493 *	0.714 **	0.763 **	0.408	1.000	
X_{11}	0.518 *	0.805 **	0.706 **	0.226	0.971 **	0.398	0.573 *	0.685 **	0.380	0.546 *	1.000

* 表示相关性显著 ($P < 0.05$); ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)

* indicates significant correlation at 0.05 level, ** indicates significant correlation at 0.01 level

表 4 3 个主成分的系数、特征值、方差贡献率及累积贡献率

Table 4 Coefficient, eigenvalue, variance contribution rate, and accumulated contribution rate of three principal components

项目 Item	PC1	PC2	PC3
X_1	0.1127	0.0880	-0.5362
X_2	0.1421	0.1854	-0.1608
X_3	0.1474	-0.0750	-0.1372
X_4	-0.0092	0.5289	0.0882
X_5	0.1240	0.3028	0.2260
X_6	0.1204	-0.1278	-0.4258
X_7	0.1237	-0.1895	0.2576
X_8	0.1464	-0.1054	0.0250
X_9	0.0770	-0.1512	0.4647
X_{10}	0.1220	-0.1990	0.1926
X_{11}	0.1359	0.2374	0.2411
特征值 Eigenvalue	6.2266	1.6632	1.0521
方差贡献率 (%) Variance contribution rate	56.6050	15.1200	9.5642
累积贡献率 (%) Accumulated contribution rate	56.6050	71.7250	81.2892

2.2.2 抗旱性评价 根据各鉴定指标的相对值 (表 2) 和 3 个综合指标的系数 (表 4), 可得到每个品种的综合指标值, 然后依据公式 (6)、(7)、(8) 可分别求出每个品种综合指标的隶属函数值、各综合

指标的权重、每个品种的抗旱性综合评价值 (D 值), 如表 5 所示。依据 D 值大小排序, 品种编号 8、9、13 位列前 3 位, 编号 1、5、3 排在后 3 位。

表 5 裸燕麦品种综合指标值、权重、隶属函数值、 D 值、预测值及抗旱性排序Table 5 Value, weight, membership function value of three integrated indices, and D value, predicted value, and order of naked oat varieties for drought resistance

编号 Code	综合指标值 Value of three integrated indices			隶属函数值 Membership function value			D 值 D value	预测值 Predicted value	排序 Order
	Z_1	Z_2	Z_3	$\mu(Z_1)$	$\mu(Z_2)$	$\mu(Z_3)$			
1	-0.8405	-1.1499	0.8941	0.2314	0.1824	0.8573	0.2959	0.3096	15
2	-0.5814	-1.3261	0.2414	0.3067	0.1270	0.6503	0.3137	0.3023	14
3	-1.6364	-0.0351	-1.1544	0.0000	0.5326	0.2076	0.1235	0.1285	17
4	-0.5204	0.4346	-1.8088	0.3244	0.6801	0.0000	0.3524	0.3548	12
5	-1.2226	0.2608	0.1424	0.1203	0.6255	0.6189	0.2729	0.2775	16
6	-0.1527	1.4529	0.1256	0.4313	1.0000	0.6135	0.5585	0.5502	8
7	-0.9784	1.3765	1.3260	0.1913	0.9760	0.9943	0.4318	0.4287	10
8	1.8035	0.1794	1.3441	1.0000	0.6000	1.0000	0.9256	0.9378	1
9	1.1826	1.3389	0.8157	0.8195	0.9642	0.8324	0.8479	0.8404	2
10	0.8809	-0.3379	-1.3441	0.7318	0.4375	0.1474	0.6083	0.5993	5
11	0.6041	-1.7305	0.5905	0.6513	0.0000	0.7610	0.5431	0.5404	9
12	0.4609	0.7168	-0.4853	0.6097	0.7688	0.4198	0.6169	0.6197	4
13	1.5829	-0.4631	-1.3833	0.9359	0.3981	0.1350	0.7416	0.7428	3
14	0.1241	0.2843	0.7918	0.5118	0.6329	0.8248	0.5712	0.5746	6
15	-0.2310	-1.6416	0.6596	0.4086	0.0279	0.7829	0.3818	0.3706	11
16	0.4101	0.2389	-0.9342	0.5949	0.6186	0.2774	0.5620	0.5659	7
17	-0.8856	0.4009	0.1790	0.2183	0.6695	0.6305	0.3507	0.3545	13
指标权重 Weight				0.6963	0.1860	0.1177			

2.3 鉴定指标与抗旱性评价

2.3.1 鉴定指标对品种抗旱性评价的适用性 在主成分分析的基础上,根据第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的值作双标图(图1),可以用来反映不同鉴定指标与供试品种抗旱性之间的关系。把突出的裸燕麦品种连接起来形成一个多边形,然后从原点(0,0)作各边的垂线,所作垂线将整个双标图分为若干个扇区,不同品种和各项鉴定指标都被划入相应的扇区,如 X_5 位于品种编号为9、12、14、16所在扇区,说明品种编号为9、12、14、16的抗旱性由种子萌发指数得以体现; X_7 、 X_9 、 X_{10} 与品种编号为10位于同一扇区,表明最长初生根长、胚芽鞘长、胚芽长最能体现品种编号为10的抗旱性。可见,不同裸燕麦品种的抗旱性是通过不同鉴定指标来体现的。

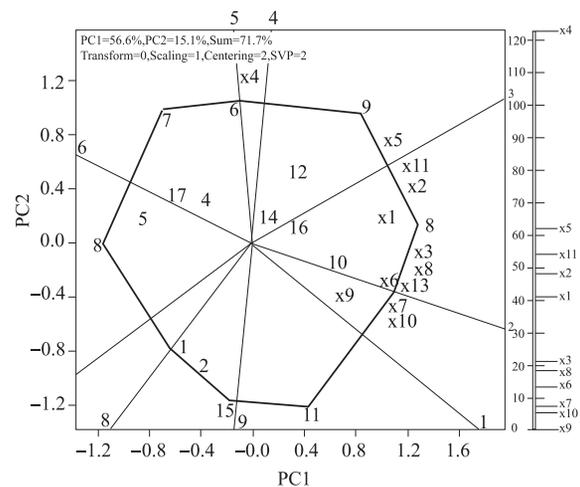


图 1 鉴定指标与燕麦品种抗旱性的关系图

Fig. 1 Map of relationship between identification indices and drought resistance of oat varieties

2.3.2 鉴定指标与抗旱性综合评价的关系 根据灰色系统理论,关联度反映的是构成该系统的比较数列和参考数列之间的密切程度;关联度越大,表明比较数列与参考数列变化的态势越接近、相互关系越密切^[17]。以 11 个鉴定指标的相对值(评价指标)为比较数列、以抗旱性综合评价值(D 值)为参考数列进行灰色关联度分析,并根据关联度大小得

到关联序,其中, X_{11} 与 D 值的关联度最大,这表明种子活力指数(VI)与品种抗旱性的变化态势最为接近; X_4 与 D 值的关联度最小,说明平均发芽速度(GV)与品种抗旱性的变化态势相距最远,同时印证了 2.1 的结果,即 PEG 胁迫下 GV 值越大,种子萌发所需天数越长,抗旱性则越弱(表 6)。

表 6 鉴定指标与 D 值的灰色关联分析

Table 6 Grey correlation analysis between identification indices and D value

项目 Item	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
关联度 Correlation degree	0.6405	0.7580	0.6936	0.5468	0.7735	0.6306	0.6649	0.7009	0.5985	0.6935	0.8353
关联序 Correlation order	8	3	5	11	2	9	7	4	10	6	1

2.3.3 品种抗旱性预测 以抗旱性综合评价值(D 值)为因变量,各单项鉴定指标的相对值为自变量进行逐步回归分析,建立最优回归方程 $Y = -0.737 + 0.422X_2 + 0.095X_4 + 0.339X_7 + 0.345X_8 + 0.409X_9 + 0.394X_{11}$,其中, X_2 、 X_4 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{11} 分别表示相对发芽率、相对平均发芽速度、相对最长初生根长、相对初生根总长、相对胚芽鞘长、种子活力抗旱指数,方程决定系数 $R^2 = 0.999$, $F = 1327.527$, 方程极显著。进一步对供试 17 个裸燕麦品种的 D 值与回归方程预测值(表 5)进行相关性分析,二者相关系数 $r = 0.999^{**}$,达到极显著水平。综上所述,利用相对发芽率、相对平均发芽速度、相对最长初生根长、相对初生根总长、相对胚芽鞘长、种子活力抗旱指数通过上述回归方程可以有效地预测裸燕麦品种萌发期的抗旱性。

3 讨论

3.1 干旱胁迫对裸燕麦萌发的影响

在 20% PEG-6000 胁迫下,除了平均发芽速度以外,发芽势、发芽率等其他 10 项鉴定指标都受到了不同程度的抑制,与品种的抗旱性表现为正相关,这一点与小麦^[9]、大麦^[12]、棉花^[16] 等作物上的研究结论一致;但有一些品种的种子萌发指数、初生根数、胚芽鞘长 3 个性状指标表现为促进作用而好于对照,这种现象在朱学海等^[6]对谷子萌发期的抗旱性研究中也曾出现,其研究指出 $-0.25 \sim 0.50$ MPa PEG-6000 对谷子的种子萌发指数、胚芽长、胚根长具有促进作用,这类现象表明不同作物或同一作物不同品种所能适

应的胁迫浓度范围是不一样的。

3.2 鉴定指标的选择

鉴定指标与品种抗旱性的 GGE 双标图分析结果表明,不同裸燕麦品种的抗旱性是通过不同鉴定指标得以体现的,初步揭示出不同裸燕麦品种适应干旱的方式并非一致,印证了不同作物和品种适应干旱的方式是多种多样的,一些作物和品种具有综合几种机制共同起作用的抗旱性的观点^[18]。因此,在进行作物抗旱性鉴定时,建议首先分析不同鉴定指标对供试品种抗旱性的反映程度,选择最适用的鉴定指标开展进一步分析,这样能够使鉴定结果更加可靠。

不同鉴定指标在 20% PEG-6000 所造成的干旱胁迫下的表现不同,其中种子活力指数在 17 个裸燕麦品种中的变异程度最大,表明其所反映的抗旱性在不同品种之间的差异最大;另外,灰色关联度分析结果表明,种子活力指数与品种萌发期抗旱性综合指标值的关系最为密切。因而,种子活力指数是裸燕麦萌发期抗旱性鉴定的优选指标,这一结论与张健等^[11]在玉米萌发期抗旱性研究中的结论一致。另有研究指出,在抗旱育种早代对大量遗传变异材料进行筛选时应选择简单、快捷的单一鉴定指标^[19],因此,在筛选裸燕麦抗旱育种早代大量材料时可选择种子萌发指数作为鉴定指标。但有许多研究认为种子萌发指数是水稻^[8]、燕麦^[13]、油菜^[20] 等作物萌发期抗旱性鉴定的可靠指标。与种子萌发指数相比,种子活力指数在萌发指数的基础上还考察了幼苗的生长情况(胚芽长),兼顾了种子萌发和幼苗生长 2 种性状,可以更好地反映品种萌发期的抗

旱性。抗旱性预测结果表明,在裸燕麦抗旱性种质资源初选和抗旱育种高代材料筛选时,通过鉴定发芽率、平均发芽速度、最长初生根长、初生根总长、胚芽鞘长、种子活力指数 6 个指标可对裸燕麦材料萌发期的抗旱性进行科学有效的评价。

3.3 抗旱性综合评价与抗旱品种的筛选利用

以鉴定指标的相对值作为抗旱性的评价指标,可以避免在正常条件下品种间种子活力对评价的影响,从而可以较为客观地评价待测品种对 20% PEG-6000 胁迫的反应。也有研究是以抗旱系数^[12]、抗旱指数^[8]为评价指标的。但是,很多研究结果表明,以单一指标来评价抗旱性都是不准确的,基于各指标所得到的抗旱性强弱排序也不一致^[9,12],这一结论在本研究中也得到了证实。

主成分分析可以在不损失或很少损失原有信息的前提下,将原来个数较多而且彼此相关的指标转换为新的个数较少且彼此独立的综合指标。通过主成分分析,11 个鉴定指标被综合成 3 个新的、彼此独立的综合指标,消除了鉴定指标之间的信息重叠对综合评价的干扰。加权隶属函数法不仅将每个指标值转换为 $[0,1]$ 的纯数,有效增强了不同指标之间的可比性,而且还考察了不同指标重要性的差异(权重),从而可较为科学有效地评价不同品种的抗旱性。这种方法在抗旱性^[9,12]、耐湿性^[21]等抗逆性评价方面应用广泛。

根据综合评价结果,品种编号为 8(N-C33 IV-45-16)、9(grosse)、13(高千四号)抗旱性综合评价值排在前三,表现为较强的抗旱性,这些材料可用于抗旱栽培或作为抗旱育种亲本材料。本研究只涉及裸燕麦萌发期的抗旱性,与苗期或全生育期抗旱性的相关性还需进一步研究。

参考文献

[1] 郑殿升,张宗文. 大粒裸燕麦(莜麦)(*Avena nuda* L.)起源及

- 分类问题的探讨[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(5):667-670
- [2] 董玉琛,郑殿升. 中国作物及其野生近缘植物[M]. 北京:中国农业出版社,2006:250-254
- [3] 黎裕. 作物抗旱鉴定方法与指标[J]. 干旱地区农业研究,1993,11(1):91-99
- [4] Ashraf M. Inducing drought tolerance in plants; Recent advances [J]. Biotechnol Advan,2010,28:169-183
- [5] 景蕊莲,昌小平. 用渗透胁迫鉴定小麦种子萌发期抗旱性的方法分析[J]. 植物遗传资源学报,2003,4(4):292-296
- [6] 朱学海,宋海燕,赵治海,等. 用渗透剂胁迫鉴定谷子芽期耐旱性的方法研究[J]. 植物遗传资源学报,2008,9(1):62-67
- [7] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. Plant Physiol,1973,51:914-916
- [8] 安永平,强爱玲,张媛媛,等. 渗透胁迫下水稻种子萌发特性及抗旱性鉴定指标研究[J]. 植物遗传资源学报,2006,7(4):421-426
- [9] 贾寿山,朱俊刚,王曙光,等. 山西小麦地方品种萌发期的抗旱性[J]. 华北农学报,2011,26(2):213-217
- [10] Bouslama M, Schapaugh W T. Stress tolerance in soybeans. I: Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance [J]. Crop Sci,1984,24:933-937
- [11] 张健,池宝亮,黄学芳,等. 以活力抗旱指数作为玉米萌芽期抗旱性评价指标的初探[J]. 华北农学报,2007,22(1):22-25
- [12] 鞠乐,齐军仓,贺雪,等. 大麦种子萌发期对渗透胁迫的响应及抗旱性鉴定指标的筛选[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(1):172-176
- [13] 齐华,许晶,孟显华,等. 水分胁迫下燕麦萌芽期抗旱指标的研究[J]. 种子,2009,28(7):7-10
- [14] 贾志国,张丽,牛瑞明. 不同燕麦品种萌芽期抗旱性初步研究[J]. 种子,2011,30(9):83-84
- [15] 牛瑞明,王燕,吴桂丽,等. 裸燕麦种子萌发对模拟干旱胁迫的响应及其耐旱性综合评价[J]. 麦类作物学报,2011,31(4):753-756
- [16] 李志博,魏亦农. 北疆主栽棉花种子对渗透胁迫的响应及其萌发力差异评价[J]. 种子,2010,29(7):1-4
- [17] 王士强,胡银岗,余奎军,等. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析[J]. 中国农业科学,2007,40(11):2452-2459
- [18] 山仑,陈培元. 旱地农业生理生态基础[M]. 北京:科学出版社,1998:1-17
- [19] 王俊娟,叶武威,王德龙,等. PEG 胁迫条件下 41 份陆地棉种质资源萌发特性研究及其抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(6):840-846
- [20] 张霞,谢小玉. PEG 胁迫下甘蓝型油菜种子萌发期抗旱鉴定指标的研究[J]. 西北农学报,2012,21(2):72-77
- [21] 周广生,梅方竹,周竹青,等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学,2003,36(11):1378-1382