

## 30份大麦种质资源的苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选

徐银萍<sup>1</sup>, 潘永东<sup>1</sup>, 张廷红<sup>1</sup>, 刘梅金<sup>2</sup>, 任 诚<sup>1</sup>, 姚元虎<sup>1</sup>, 贾延春<sup>1</sup>, 陈文庆<sup>1</sup>, 赵 锋<sup>1</sup>, 包奇军<sup>1</sup>, 火克仓<sup>1</sup>, 牛小霞<sup>1</sup>

(1. 甘肃省农业科学院经济作物与啤酒原料研究所, 甘肃 兰州 730070, 2. 甘南州农业科学研究所, 甘肃 合作 747000)

**摘要:** 在西北内陆地区, 干旱是影响大麦生长发育的重要非生物胁迫因素, 鉴定大麦资源的抗旱性, 确定抗旱指标, 筛选抗旱种质, 培育抗旱品种具有重要意义。以30份大麦种质为材料, 设置正常供水和反复干旱胁迫2个处理, 在旱棚内进行盆栽试验, 测定干旱对株高、根长、叶长、地上部鲜重、根鲜重、地上部干重、根干重和总干重的影响; 采用抗旱性度量值(*D*值)、综合抗旱系数(*CDC*值)、加权抗旱系数(*WDC*)、频次分析、相关分析、主成分分析、灰色关联度分析、隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析相结合的方法, 对其进行苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选。结果显示干旱胁迫对各指标均有极显著影响。频次分析表明, 各指标对干旱胁迫反应的敏感程度依次为根长、根干重、总干重、地上部鲜重、地上干重、叶长、根鲜重和株高; 相关分析表明, 总干重与根干重、地上部干重、叶长和根长呈极显著正相关, 与地上部鲜重呈显著正相关, 与株高和根鲜重呈不显著正相关; 主成分分析表明, 4个主成分可代表大麦种质资源抗旱性83.583%的原始数据信息量。基于*D*值、*CDC*值和*WDC*值的供试大麦种质抗旱性排序相近。灰色关联度分析表明, 各指标*DC*值与*D*值间的关联度大小依次为株高、地上部干重、总干重、叶长、地上部鲜重、根长、根干重、根鲜重, 与各指标*DC*值与*WDC*值关联度大小排序基本吻合。根据*D*值进行聚类分析, 可将供试大麦种质划分为5个抗旱级别, 其中1级2份、2级13份、3级6份、4级7份、5级2份。除根鲜重、地上部干重、根干重和总干重外, 其余指标的隶属函数值、*CDC*值、*D*值和*WDC*值均随抗旱级别的升高而增大。逐步回归分析表明, 与*D*值密切相关的指标有株高和总干重。苗期抗旱性强的大麦种质资源材料有西藏25和NEVADA, 可作为大麦抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制研究的材料。株高和总干重可作为评价大麦种质资源苗期抗旱性鉴定的性状指标。

**关键词:** 大麦(*Hordeum vulgare* L.); 苗期抗旱性; 抗旱指标; 综合评价

**中图分类号:** S512.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2021)09-0056-12

[doi:10.3969/j.issn.1001-1463.2021.09.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1463.2021.09.013)

## Drought Resistance Identification and Drought Resistance Indices Screening of 30 Barley Germplasm Resources at Seedling Stage

XU Yinping<sup>1</sup>, PAN Yongdong<sup>1</sup>, ZHANG Tinghong<sup>1</sup>, LIU Meijin<sup>2</sup>, REN Cheng<sup>1</sup>, YAO Yuanhu<sup>1</sup>, JIA Yanchun<sup>1</sup>, CHEN Wenqing<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>1</sup>, BAO Qijun<sup>1</sup>, HUO Kecang<sup>1</sup>, NIU Xiaoxia<sup>1</sup>

(1. Institute of Industrial Crops and Malting Barley, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu

收稿日期: 2021-06-22

基金项目: 甘肃省农业科学院农业科技自主创新专项现代生物育种项目(2019GAAS08); 甘肃省2020年祁连山国家公园试点项目“肃南县高山草原健康评价方法研究”。

作者简介: 徐银萍(1978—), 女, 甘肃民勤人, 副研究员, 硕士, 主要从事大麦青稞种质资源鉴定评价及新品种选育工作。联系电话: (0)13919785369。Email: xuyinping7810@163.com。

通信作者: 张廷红(1967—), 女, 甘肃靖远人, 副研究员, 主要从事大麦青稞新品种选育与高效栽培技术等方面的研究工作。联系电话: (0)13669325112。Email: 514014460@qq.com。

730070, China; 2. Agricultural Science Research Institute of Gannan Tibetan Autonomous Prefecture in Gansu Province, Hezuo Gansu 747000, China)

**Abstract:** Drought is the important abiotic stress factor for barley production in the northwestern hinterland. It is of great significance to identify drought resistance of barley resources, determine drought resistance index, screen drought resistance germplasm and cultivate drought resistance cultivars. The effects of the plant height, root length, leaf length, shoot fresh weight, root fresh weight, shoot dry weight, root dry weight and total dry weight of thirty barley germplasms were measured at the normal water supply and repeated drought treatments in pot experiments in rainprotection shed. Drought resistance comprehensive evaluation value (*D* value), comprehensive drought resistance coefficient (*CDC* value), weight drought resistance coefficient (*WDC* value), correlation analysis, frequency analysis, principal component analysis, grey relational analysis, subordinate function analysis, clustering analysis, and stepwise regression analysis were used to identify the drought resistance and screen drought resistance indices of tested barley germplasms at seedling stage. The results showed that drought stress had significant effects on all indices. Frequency analysis showed that the sensitive degrees of all indices response to drought stress in turn for root length, root dry weight, total dry weight, shoot fresh weight, shoot dry weight, leaf length, root fresh weight and plant height. Correlation analysis showed that the total dry weight was significantly and positively correlated with root dry weight, shoot dry weight, leaf length, root length and shoot fresh weight, but not with plant height and root fresh weight. Principal component analysis showed that 4 principal components could represent 83.583% of the original data information of barley drought resistance. The ranks of drought resistance of tested barley germplasms based on the *D* value, *CDC* value, and *WDC* value were similar. Grey relational analysis showed that the correlation degree between *DC* value of all indices and *D* value in turn for plant height, shoot dry weight, total dry weight, leaf length, shoot fresh weight, root length, root dry weight and root fresh weight, which was basically consistent with the order of correlation degree between *DC* value and *WDC* value. According to *D* value clustering analysis, tested barley germplasms were divided into 5 drought resistance grades, 2 belonged to grade 1, 13 belonged to grade 2, 6 belonged to grade 3, 7 belonged to grade 4, and 2 belonged to grade 5. The subordinate function values of tested indices except for root fresh weight, shoot dry weight, root dry weight and total dry weight, *CDC* value, *D* value, and *WDC* value were increased with increase of drought resistance grades. Stepwise regression analysis showed that the plant height and total dry weight were closely related to the *D* value. Xizang 25 and NEVADA were identified as drought resistance barley germplasms at seedling stage, which could be used as materials for the researches on cultivar breeding, mechanism, and regulation and alleviation mechanism of drought resistance in barley. The plant height and total dry weight could be used as the simple and intuitive identification indices of drought resistance in barley germplasm resources at seedling stage.

**Key words:** *Hordeum vulgare* L.; Drought resistance at seedling stage; Drought resistance indexes; Comprehensive evaluation

大麦(*Hordeum vulgare* L.)又称牟麦、饭麦、赤膊麦,属一年生禾本科作物,是世界上最古老的粮食作物之一<sup>[1-4]</sup>,对人类文明的产生与发展起到了十分重要的作用,其营养丰富,生育期短、抗逆性强、适应性广、丰产性好,具有食用、饲用、酿酒及医药等广泛的用途,在我国西北内陆旱地常年种植近 13.33 万  $\text{hm}^2$ 。干旱是影响该区大麦生产的重要非生物胁迫因素,因此,进行大麦种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选,对

大麦抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究具有重要意义。作物抗旱性鉴定及抗旱指标筛选是开展作物抗旱性研究首先要解决的关键技术,需要将不同指标相结合,对各个时期进行综合评价<sup>[5-7]</sup>。国内外学者采用伤害系数、抗旱系数、抗旱指数等直接评价方法,以隶属函数、平均抗旱系数、加权抗旱系数(*WDC*)、抗旱性度量值(*D*值)等综合评价方法分别对玉米、油菜、水稻、绿豆、菜豆、薏苡等作物的苗期抗旱性进行了

研究<sup>[8-14]</sup>, 提出了不同作物在苗期的抗旱性鉴定指标和判断标准, 筛选出了大批抗旱种质资源。

近年来, 多位学者主要从形态指标、生理指标、生长发育指标、生化指标等多个角度研究了大麦生长前期的抗旱性。鞠乐等<sup>[15-17]</sup>采用模拟干旱胁迫方法研究了大麦种子萌发期抗旱性鉴定指标, 确定发芽势等 9 项指标作为抗旱性鉴定形态指标, 胚根长等 4 项指标作为抗旱性鉴定生长发育指标, 过氧化氢酶等 3 项酶活性作为抗旱性鉴定生化指标。蒋花<sup>[18]</sup>采用渗透胁迫模拟干旱的方法, 研究了大麦前期生长状况与生理指标的变化, 表明发芽率、耐旱系数等 5 项指标均随着渗透胁迫浓度的增加而减小, 这与鞠乐等<sup>[15]</sup>的研究结果一致; 脯氨酸等 3 项酶活性和相对电导率随着渗透胁迫的增加而增加, 相对含水量、叶绿素的含量随着渗透胁迫的增加而下降, 这也与鞠乐等<sup>[17]</sup>的研究结果一致, 并指出发芽率等 10 项指标可作为评价不同大麦品种幼苗期的抗旱性鉴定指标。惠宏斌<sup>[19]</sup>采用盆栽称重控制土壤含水量的方法模拟大麦田间受到的土壤干旱胁迫, 结果表明根系活力和根活性吸收面积能够在一定胁迫范围内存在一定程度的补偿效应, 而且根系可以顺利接受土壤干旱的初级信号并通过植物体内一系列次级信号转导网络启动各种应对干旱胁迫的响应机制。汪军成等<sup>[20]</sup>采用温室模拟干旱胁迫-复水法测定了 20 份大麦种质材料苗期的生理生化等指标, 表明叶片含水量、相对电导率等 6 项指标与干旱胁迫压力呈正相关, 而叶片相对含水量、株高与干旱胁迫压力呈负相关; 以采用欧式距离法综合分析结果为依据, 将 20 份种质材料划分为相对抗旱、中等抗旱、相对敏感 3 个抗旱等级。本研究采用反复干旱胁迫法, 在旱棚内进行盆栽试验, 利用综合评价法对 30 份大麦种质幼苗的株高、根

长、叶长、地上部鲜重、根鲜重、地上部干重、根干重和总干重进行鉴定与评价, 以期筛选出苗期抗旱性强的大麦种质及易测定的与大麦种质抗旱性密切相关的指标, 为大麦抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究提供基础材料。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试大麦种质共 30 份, 包括美国引进 10 份、西藏引进 4 份、甘肃甘南州 1 份及甘肃省农业科学院选育的品种 7 份、新品系 8 份(表1)。

### 1.2 试验方法

试验于 2018 年与 2019 年在甘肃省农业科学院旱棚内进行。在花盆内(盆高 30 cm、内径 30 cm)装入 20 cm 厚的中等肥力水平的耕层土壤。土壤取自试验地耕层 20 cm, 含有机质 26.7 g/kg、碱解氮 81.3 mg/kg、有效磷 11.2 mg/kg、速效钾 197.0 mg/kg, pH 8.3。每盆施磷酸二铵 2 g、尿素 3 g 作为基肥一次施入, 并浇水至田间土壤最大持水量的 75%~80%。从供试大麦种质中选取大小均匀一致、饱满的种子温水浸种, 选择 30 粒发芽良好的种子均匀点播于花盆中, 播种后覆土 2 cm。试验随机区组设计, 设置正常供水(CK)和反复干旱(T)2 个处理, 3 次重复。从播种之日起至第 1 次复水期间采用称重法控水, 每天傍晚称重 1 次, 并补充水分, 保持每盆的土壤含水量基本稳定, 以确保幼苗正常生长及试验处理的一致性。第 1 次干旱-复水处理: 待幼苗长至 4~5 叶期时停止供水, 土壤绝对含水量降至田间土壤最大持水量的 25%~30%时复水至田间持水量的 75%~80%。第 2 次干旱-复水处理: 第 1 次复水后不再供水, 土壤绝对含水量降至田间土壤最大持水量的 25%~30%时, 复水至田间土壤最大持水量的 75%~80%。

表 1 30 份大麦种质资源信息

编号	种质资源名称	来源
DM1	Z06-278-9	美国
DM2	Z06-266-10	美国
DM3	MERIT	美国
DM4	Z06-291-1	美国
DM5	BARI188	美国
DM6	BARI160	美国
DM7	BARI187	美国
DM8	BARI165	美国
DM9	西藏 10	西藏
DM10	西藏 12	西藏
DM11	西藏 23	西藏
DM12	西藏 25	西藏
DM13	NEVADA	美国
DM14	甘啤 6 号	甘肃省农业科学院
DM15	甘饲 1 号	甘肃省农业科学院
DM16	0420-7(甘啤 4 号杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM17	0521-6(甘啤 7 号杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM18	2153122(甘啤 7 号杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM19	0821-2(MERIT 杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM20	0835-3(MERIT 杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM21	0844-1(MERIT 杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM22	0903-2(法瓦维特杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM23	中黄 1 号	甘肃省甘南州
DM24	0902-1(法瓦维特杂交后代)	甘肃省农业科学院
DM25	陇青 1 号	甘肃省农业科学院
DM26	甘啤 4 号	甘肃省农业科学院
DM27	甘啤 7 号	甘肃省农业科学院
DM28	甘啤 8 号	甘肃省农业科学院
DM29	甘啤 9 号	甘肃省农业科学院
DM30	Aspen	美国

### 1.3 测定项目与方法

于第 2 次复水 72 h 后, 每盆随机选择 20 株植株, 洗净后将根系剪下与幼苗分开。量取主茎自地面至植株顶端的距离, 即为株高; 主茎中部最大叶片基部至叶尖的长度,

即为叶长; 主根的长度, 即为根长。分别称取幼苗和根系鲜物质重量, 即为地上鲜重(SFW)和根鲜重(RFW); 将幼苗和根系晾干, 于 60 °C 下烘干后分别称重, 即为地上干重(SDW)和根干重(RDW); 地上干重和根干



重之和为总干重( $TDW$ )。

#### 1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2013 整理数据并用 SPSS18 软件进行统计分析。以 2 a 数据的平均值作为基础数据, 参照汪灿等<sup>[14, 21-22]</sup>、兰巨生<sup>[23]</sup>、祁旭升等<sup>[24-25]</sup>、张彦军等<sup>[26]</sup>、罗俊杰等<sup>[27]</sup>的方法, 采用配对处理  $t$  检验对各指标测定值进行平均数差异显著性检测。按公式(1)和(2)分别计算单项抗旱系数( $DC$ )和综合抗旱系数( $CDC$ )。式中  $x_i$  和  $CK_i$  分别表示反复干旱胁迫和正常灌水处理的指标测定值。

$$DC = \frac{T_i}{CK_i} \quad (1)$$

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC \quad (2)$$

针对各指标  $DC$  值, 进行简单相关分析、连续变数次数分布统计分析和主成分分析。按公式(3)、(4)和(5)分别计算因子权重系数( $\omega_i$ )、各基因型各综合指标的隶属函数值 $[\mu(x_i)]$ 和抗旱性度量值( $D$ )。式中  $P_i$  为第  $i$  个综合指标贡献率, 表示第  $i$  个指标在所有指标中的重要程度,  $x_i$ 、 $x_{imax}$  和  $x_{imin}$  分别表示第  $i$  个综合指标及第  $i$  个综合指标的最大值和最小值。

$$\omega_i = P_i \div \sum_i^n P_i \quad (3)$$

$$\mu(x_i) = \frac{x_i - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \quad (4)$$

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(x_i) \times (P_i \div \sum_i^n P_i)] \quad (5)$$

以各指标  $DC$  值为比较序列,  $D$  值为参考序列进行灰色关联度分析, 获得各指标  $DC$  值与  $D$  值间的关联度( $\gamma_D$ ), 按公式(6)和(7)分别计算各指标权重系数 $[\omega_{(\gamma)}]$ 和加权抗旱系数( $WDC$ )。式中  $\gamma_i$  为各指标关联度。

$$\omega_{(\gamma)} = \gamma_i \div \sum_i^n \gamma_i \quad (6)$$

$$WDC = \sum_{i=1}^n [DC \times (\gamma_i \div \sum_{i=1}^n \gamma_i)] \quad (7)$$

以各指标  $DC$  值为比较序列,  $WDC$  值为参考序列进行灰色关联度分析, 获得各

指标  $DC$  值与  $WDC$  值间的关联度( $\gamma_{WDC}$ )。最后针对供试大麦种质  $D$  值, 采用欧氏距离和加权配对算术平均法(WPGMA)进行聚类分析, 划分抗旱级别, 并分别以  $D$  值、 $CDC$  值和  $WDC$  值为参考序列, 对各指标  $DC$  值进行逐步回归分析, 求取回归方程。

## 2 结果与分析

### 2.1 供试种质的代表性及其指标测定值分析

试验结果表明, 干旱胁迫对供试种质各指标测定值均有显著影响, 处理间和种质间差异均达显著水平(表2、表3)。种质间变异系数为 0.066 ~ 0.735, 说明试验所选大麦种质基因类型丰富, 干旱胁迫处理效果好, 所选测定指标对干旱胁迫反应较敏感, 具有较好的代表性。此外, 供试种质各指标在反复干旱和正常供水处理下的测定值相关系数为 0.467 ~ 0.887, 进一步说明各测定指标对干旱胁迫反应的敏感性存在差异, 采用各指标测定值很难直接鉴定大麦种质资源的抗旱性。

### 2.2 单项指标分析

与正常供水处理相比, 在反复干旱胁迫处理后, 供试种质资源各指标均发生不同程度变化(表4)。同一指标各种质的  $DC$  值差异明显, 变异系数在 0.108 ~ 0.492, 但不同种质间  $DC$  值所反映的抗旱性不同, 且同一种质各指标的  $DC$  值存在较大差异, 说明各指标对干旱胁迫反应的敏感性各异。频次分析表明, 同一区间各指标  $DC$  值分布次数和频率相差较大(表5)。 $DC > 0.6$  的株高、根长、叶长、地上鲜重、根鲜重、地上干重、根干重、总干重的分布频率分别为 93%、97%、93%、40%、87%、94%、43%、84%, 即各指标对干旱胁迫反应的敏感性依次为地上鲜重、根干重、总干重、根鲜重、株高、叶长、地上干重和根长。相关分析表

表2 反复干旱胁迫和正常灌水条件下供试大麦种质各指标测定值及其平均值差异分析<sup>①</sup>

编号	株高/cm		根长/cm		叶长/cm		地上鲜重/g		根鲜重/g		地上干重/g		根干重/g		总干重/g	
	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK
DM1	22.20	32.36	11.61	13.71	17.11	22.66	2.54	5.80	0.34	0.37	0.41	0.59	0.06	0.06	0.47	0.65
DM2	20.44	32.55	9.15	10.26	15.90	23.37	2.59	6.76	0.32	0.44	0.41	0.67	0.06	0.12	0.53	0.73
DM3	23.25	28.29	10.29	10.73	17.33	19.56	3.76	5.11	0.36	0.67	0.38	0.48	0.05	0.07	0.44	0.52
DM4	20.03	28.16	11.45	13.36	15.80	19.72	4.03	5.44	0.47	0.61	0.41	0.53	0.08	0.14	0.53	0.61
DM5	18.71	27.44	9.43	10.92	14.40	19.51	3.18	4.89	0.32	0.43	0.39	0.48	0.06	0.09	0.49	0.53
DM6	16.27	27.12	8.12	9.63	12.06	19.28	2.12	4.76	0.23	0.42	0.32	0.46	0.02	0.03	0.41	0.50
DM7	18.15	29.33	9.04	10.86	14.29	20.68	2.58	5.66	0.27	0.39	0.36	0.55	0.04	0.07	0.44	0.60
DM8	18.61	28.26	7.02	8.98	12.06	18.93	2.57	4.92	0.19	0.25	0.33	0.49	0.05	0.07	0.40	0.52
DM9	20.69	28.71	10.04	11.67	14.73	19.52	3.54	5.37	0.31	0.42	0.40	0.53	0.07	0.12	0.52	0.58
DM10	21.97	29.18	9.70	10.01	17.00	25.11	3.24	5.56	0.26	0.38	0.45	0.51	0.05	0.09	0.54	0.56
DM11	21.97	28.19	9.05	11.01	16.99	19.85	3.25	6.00	0.24	0.38	0.46	0.53	0.06	0.09	0.55	0.55
DM12	23.61	28.11	9.70	10.54	18.41	19.76	3.45	5.12	0.21	0.30	0.42	0.48	0.04	0.06	0.47	0.51
DM13	23.34	28.35	10.42	11.26	18.65	19.60	3.62	4.75	0.28	0.31	0.46	0.47	0.05	0.06	0.50	0.84
DM14	21.22	29.21	9.61	10.02	16.82	25.31	3.31	5.52	0.25	0.37	0.43	0.52	0.04	0.09	0.52	0.56
DM15	23.06	31.13	8.88	11.88	16.77	21.85	3.92	6.63	0.20	0.28	0.52	0.63	0.04	0.07	0.59	0.67
DM16	12.92	26.83	6.79	9.13	10.79	18.24	2.03	3.56	0.19	0.31	0.21	0.40	0.01	0.03	0.30	0.61
DM17	21.31	29.37	9.58	10.04	16.84	25.41	3.30	5.60	0.24	0.38	0.44	0.51	0.04	0.10	0.54	0.55
DM18	20.31	33.00	9.17	10.21	17.84	23.38	4.60	6.81	0.33	0.44	0.42	0.70	0.06	0.11	0.53	0.76
DM19	20.84	29.20	8.68	10.00	16.88	25.10	3.23	5.54	0.24	0.37	0.42	0.50	0.05	0.08	0.52	0.55
DM20	19.92	29.19	9.30	9.99	16.94	25.10	3.23	5.55	0.25	0.39	0.41	0.50	0.04	0.08	0.45	0.54
DM21	20.13	29.13	1.10	10.71	15.20	20.43	2.61	5.54	0.32	0.38	0.34	0.54	0.03	0.06	0.40	0.57
DM22	20.10	28.79	8.84	10.63	15.07	20.10	2.58	5.13	0.27	0.36	0.34	0.51	0.03	0.05	0.39	0.54
DM23	15.79	25.41	7.02	8.67	11.23	17.54	1.64	2.41	0.14	0.24	0.21	0.34	0.01	0.04	0.30	0.53
DM24	24.89	32.14	11.41	13.14	17.05	22.13	3.48	5.42	0.06	0.07	0.05	0.51	0.04	0.05	0.09	0.56
DM25	22.87	31.01	9.07	9.88	17.41	23.03	3.44	6.21	0.30	0.40	0.39	0.58	0.04	0.10	0.49	0.62
DM26	24.58	31.86	9.03	10.17	19.36	22.97	4.26	6.54	0.31	0.43	0.41	0.61	0.07	0.10	0.49	0.66
DM27	24.37	33.02	9.21	10.37	17.93	23.78	4.61	6.84	0.35	0.45	0.50	0.71	0.09	0.14	0.61	0.78
DM28	22.01	29.21	9.68	10.00	16.87	25.41	3.31	5.58	0.27	0.39	0.41	0.50	0.05	0.09	0.50	0.55
DM29	20.87	29.68	9.67	9.97	17.13	25.37	3.33	6.01	0.25	0.40	0.44	0.51	0.05	0.08	0.52	0.56
DM30	12.64	23.16	4.99	7.85	8.42	16.43	1.46	2.40	0.10	0.20	0.19	0.21	0.01	0.04	0.20	0.38
平均值	20.57	29.25	8.90	10.52	15.78	21.64	3.16	5.38	0.26	0.37	0.38	0.52	0.05	0.08	0.46	0.59

①数据为2018和2019两年的平均值；CK为正常供水处理；T为反复干旱处理(下表同)。

表3 供试大麦种质各指标的差异显著性分析<sup>①</sup>

指标	CV/%		标准误 (SE)	t	P	r
	T	CK				
株高	0.130	0.066	0.559	22.029	0.000 1**	0.710
根长	0.212	0.313	0.369	5.282	0.000 1**	0.561
叶长	0.371	0.116	0.468	14.834	0.000 1**	0.660
地上鲜重	0.223	0.169	0.141	16.846	0.000 1**	0.740
根鲜重	0.284	0.281	0.148	11.503	0.000 1**	0.887
地上干重	0.244	0.512	0.181	8.570	0.000 1**	0.583
根干重	0.384	0.735	0.003	11.000	0.000 1**	0.852
总干重	0.221	0.144	0.021	6.718	0.000 1**	0.467

①\*\*表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

表 4 供试大麦种质各指标的抗旱系数

编号	株高	根长	叶长	地上鲜重	根鲜重	地上干重	根干重	总干重
DM1	0.686	0.847	0.755	0.438	0.919	0.695	0.947	0.719
DM2	0.628	0.892	0.680	0.384	0.727	0.609	0.500	0.723
DM3	0.822	0.960	0.886	0.735	0.535	0.785	0.714	0.847
DM4	0.711	0.857	0.801	0.740	0.766	0.778	0.571	0.868
DM5	0.682	0.864	0.738	0.650	0.744	0.814	0.667	0.913
DM6	0.600	0.843	0.626	0.445	0.548	0.701	0.667	0.820
DM7	0.619	0.832	0.691	0.456	0.686	0.657	0.571	0.732
DM8	0.659	0.781	0.637	0.522	0.750	0.678	0.714	0.764
DM9	0.721	0.860	0.755	0.659	0.738	0.761	0.583	0.902
DM10	0.753	0.969	0.677	0.583	0.687	0.882	0.556	0.970
DM11	0.779	0.822	0.856	0.542	0.637	0.867	0.667	0.988
DM12	0.840	0.920	0.932	0.673	0.719	0.868	0.667	0.922
DM13	0.823	0.925	0.952	0.763	0.903	0.965	0.833	0.595
DM14	0.726	0.959	0.665	0.600	0.676	0.827	0.444	0.929
DM15	0.741	0.748	0.768	0.592	0.706	0.830	0.571	0.881
DM16	0.482	0.744	0.592	0.570	0.613	0.525	0.333	0.492
DM17	0.726	0.954	0.663	0.589	0.632	0.863	0.400	0.982
DM18	0.615	0.898	0.763	0.675	0.750	0.600	0.545	0.697
DM19	0.714	0.868	0.673	0.583	0.649	0.840	0.625	0.945
DM20	0.682	0.931	0.675	0.582	0.641	0.820	0.500	0.833
DM21	0.691	0.103	0.744	0.471	0.842	0.630	0.500	0.702
DM22	0.698	0.832	0.750	0.503	0.750	0.667	0.600	0.722
DM23	0.621	0.810	0.640	0.680	0.583	0.618	0.250	0.566
DM24	0.774	0.868	0.770	0.642	0.857	0.098	0.800	0.161
DM25	0.738	0.918	0.756	0.554	0.750	0.672	0.400	0.790
DM26	0.772	0.888	0.843	0.651	0.721	0.672	0.700	0.742
DM27	0.738	0.888	0.754	0.674	0.778	0.704	0.643	0.782
DM28	0.754	0.968	0.664	0.593	0.692	0.820	0.556	0.909
DM29	0.703	0.970	0.675	0.554	0.625	0.863	0.625	0.929
DM30	0.546	0.636	0.512	0.608	0.340	0.905	0.250	0.526
平均值	0.701	0.845	0.730	0.590	0.699	0.734	0.580	0.778
变异系数/%	0.108	0.185	0.123	0.261	0.331	0.222	0.492	0.223

表 5 供试大麦种质各指标抗旱系数在不同区间的分布

指标	0<DC<0.2		0.2<DC<0.4		0.4<DC<0.6		0.6<DC<0.8		0.8<DC<1	
	次数 /次	频率 /%	次数 /次	频率 /%	次数 /次	频率 /%	次数 /次	频率 /%	次数 /次	频率 /%
株高	0	0	0	0	2	7	25	83	3	10
根长	1	3	0	0	0	0	4	14	25	83
叶长	0	0	0	0	2	7	22	73	6	20
地上鲜重	0	0	1	3	17	57	12	40	0	0
根鲜重	0	0	1	3	3	10	22	74	4	13
地上干重	1	3	0	0	1	3	15	50	13	44
根干重	0	0	5	17	12	40	10	33	3	10
总干重	1	3	0	0	4	13	10	34	15	50

表 6 供试大麦种质各指标抗旱系数的相关性<sup>①</sup>

指标	株高	根长	叶长	地上鲜重	根鲜重	地上干重	根干重	总干重
株高								
根长	0.310							
叶长	0.782**	0.155						
地上鲜重	0.423*	0.293	0.452*					
根鲜重	0.394*	0.509**	0.528**	0.006				
地上干重	0.247	0.187	0.691**	0.714**	0.303			
根干重	0.538**	0.409*	0.611**	0.301	0.601**	0.608**		
总干重	0.334	0.725**	0.713**	0.410*	0.316	0.749**	0.529**	

①\* 和 \*\* 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平显著相关。

明(表6), 各指标都至少与 1 个其他指标呈显著或极显著相关, 说明各指标间存在一定程度的相关性。其中, 总干重与地上干重、根长、叶长和根干重呈极显著正相关, 与地上鲜重呈显著正相关, 与株高和根鲜重呈不显著正相关。因此, 直接采用这些指标由于指标间信息的重叠, 很难客观、准确、有效地评价各种质的抗旱性, 进而影响抗旱鉴定结果。

### 2.3 主成分分析

各因子特征值中的前 4 个因子的累计贡献率达 83.583%, 其特征根  $\lambda > 1.074$ (表7)。因此抽取前 4 个因子, 将具有相同本质的变

表 7 供试大麦种质各指标主成分的特征向量及贡献率

指标	因子载荷			
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
株高	0.672	0.302	0.431	0.187
根长	0.026	0.135	0.169	0.973
叶长	0.751	0.109	0.502	0.021
地上鲜重	0.094	0.01	0.918	0.158
根鲜重	0.878	-0.223	-0.073	-0.07
地上干重	-0.187	0.917	0.238	0.001
根干重	0.688	-0.018	-0.067	0.169
总干重	0.14	0.937	-0.146	0.197
特征根	2.324	1.892	1.397	1.074
贡献率 /%	29.046	23.648	17.463	13.423
累计贡献率 /%	29.046	52.695	70.158	83.583
因子权重	0.348	0.283	0.209	0.161

量归为一类, 可将原来各单项指标转换成 4 个新的相互独立的综合指标(分别用  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  表示)。 $F_1$  在株高、根鲜重、根干重和叶长上有较高载荷量,  $F_2$  在地上干重和总干重上有较高载荷量,  $F_3$  在地上鲜重上有较高载荷量,  $F_4$  在根长上有较高载荷量。

### 2.4 供试种质的综合抗旱性评价

从表 8 可知, 供试种质  $CDC$  值和  $WDC$  值分别在 0.540 ~ 0.845、0.543 ~ 0.845, 平均值分别为 0.707、0.708, 变异系数均为 0.105。根据  $CDC$  值和  $WDC$  值的大小对供试种质进行抗旱性排序, 其结果基本相同。其中, 抗旱性强的种质有 DM12(西藏25)和 DM13(NEVADA), 抗旱性弱的种质有 DM16(0420-7)和 DM30(Aspen), 其余种质介于两者之间。供试种质  $D$  值在 0.476 ~ 0.846, 平均值为 0.698, 变异系数为 0.127, 根据  $D$  值的大小对供试种质进行抗旱性排序, 其抗旱性强的种质有 DM12(西藏 25)和 DM13(NEVADA), 抗旱性弱的种质有 DM16(0420-7)和 DM30(Aspen), 其余种质介于两者之间。这与基于  $CDC$  值和  $WDC$  值的供试种质抗旱性强弱评价结果基本一致。

### 2.5 灰色关联度分析

各指标  $DC$  值与  $D$  值间的关联度大小依次为株高、地上干重、总干重、叶长、地上鲜重、根长、根干重和根鲜重(表9), 反映



表8 供试大麦种质抗旱性评价的CDC值、WDC值及D值

编号	隶属函数 <sup>①</sup>				CDC值	排序	D值	排序	WDC值	排序
	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$						
DM1	0.964	0.715	0.000	0.865	0.751	8	0.676	20	0.748	8
DM2	0.741	0.658	0.087	0.956	0.643	25	0.616	25	0.643	23
DM3	0.722	0.840	0.646	0.972	0.785	3	0.779	4	0.788	3
DM4	0.876	0.846	0.566	0.853	0.762	5	0.799	3	0.762	5
DM5	0.840	0.899	0.333	0.871	0.759	7	0.756	7	0.759	6
DM6	0.602	0.789	0.021	0.900	0.656	23	0.581	27	0.656	21
DM7	0.707	0.700	0.172	0.871	0.656	24	0.620	23	0.655	22
DM8	0.792	0.740	0.117	0.812	0.688	22	0.639	22	0.687	20
DM9	0.869	0.863	0.387	0.878	0.747	10	0.768	6	0.748	8
DM10	0.747	0.964	0.307	0.990	0.760	6	0.755	8	0.762	5
DM11	0.845	1.000	0.299	0.812	0.770	4	0.770	5	0.773	4
DM12	0.903	0.937	0.588	0.898	0.818	2	0.846	1	0.820	2
DM13	0.785	0.764	1.000	0.809	0.845	1	0.828	2	0.845	1
DM14	0.718	0.903	0.376	0.988	0.728	16	0.742	12	0.730	14
DM15	0.806	0.908	0.410	0.722	0.729	15	0.739	13	0.731	13
DM16	0.464	0.465	0.493	0.776	0.544	29	0.521	29	0.543	28
DM17	0.689	0.960	0.368	0.981	0.726	17	0.746	11	0.729	15
DM18	0.798	0.625	0.482	0.941	0.693	20	0.706	18	0.691	18
DM19	0.737	0.941	0.247	0.885	0.737	14	0.716	16	0.739	12
DM20	0.625	0.842	0.414	0.945	0.708	18	0.694	19	0.710	16
DM21	1.000	0.765	0.261	0.000	0.585	28	0.618	24	0.587	25
DM22	0.800	0.699	0.288	0.854	0.690	21	0.673	21	0.690	19
DM23	0.473	0.557	0.762	0.823	0.596	27	0.613	26	0.598	26
DM24	0.906	0.000	0.496	0.985	0.621	26	0.577	28	0.618	24
DM25	0.821	0.730	0.419	0.956	0.697	19	0.733	15	0.699	17
DM26	0.854	0.710	0.488	0.908	0.749	9	0.746	10	0.749	7
DM27	0.860	0.747	0.450	0.909	0.745	11	0.750	9	0.745	10
DM28	0.742	0.888	0.324	1.000	0.744	12	0.737	14	0.746	9
DM29	0.668	0.929	0.253	0.997	0.743	13	0.708	17	0.744	11
DM30	0.000	0.724	0.878	0.545	0.540	30	0.476	30	0.544	27
平均值					0.707		0.698		0.701	
变异系数/%					0.105		0.127		0.105	

<sup>①</sup> $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$ 和 $\mu_4$ 分别表示4个因子的隶属函数值。

了各指标DC值与D值的密切程度，与各指标对于旱胁迫反应的敏感性基本吻合。此外，各指标DC值与WDC值间的关联度大小依次为株高、地上干重、总干重、地上鲜重、叶长、根长、根鲜重和根干重(表9)，与各指标DC值与D值的密切程度基本吻

合。

## 2.6 聚类分析及抗旱级别的划分

在 $\lambda=10$ 处将30份供试大麦种质资源分为5类(图1)。其中第1类为高度抗旱型种质，有DM12(西藏25)和DM13(NEVADA)共2份，占总数的7%；第2类为抗旱型种质，

表 9 供试大麦种质各指标 DC 值与 D 值和 WDC 值的关联度及各指标权重系数

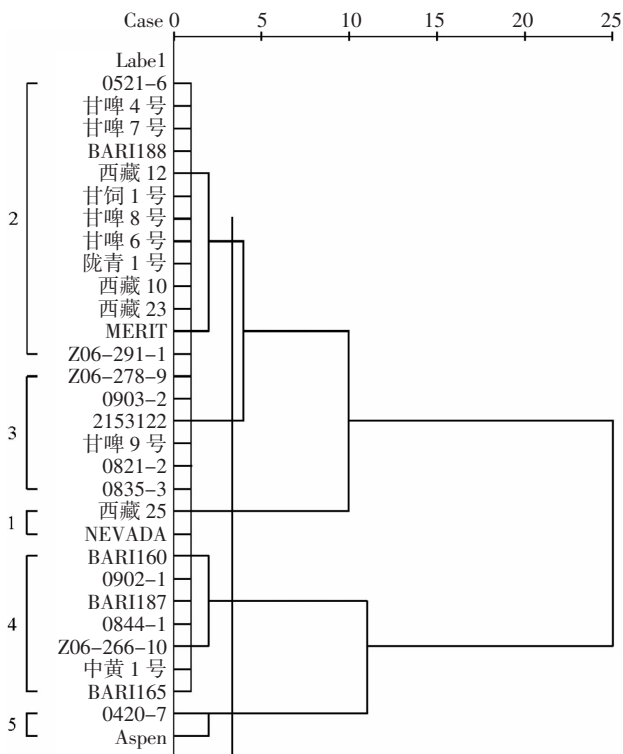
指标	关联度 $\gamma_D$	关联度 $\gamma_D$ 排序	权重系数	关联度 $\gamma_{WDC}$	关联度 $\gamma_{WDC}$ 排序
株高	0.864	1	0.148	0.806	1
根长	0.754	6	0.120	0.731	6
叶长	0.773	4	0.124	0.733	5
地上鲜重	0.756	5	0.121	0.743	4
根鲜重	0.725	8	0.114	0.729	7
地上干重	0.795	2	0.131	0.795	2
根干重	0.739	7	0.116	0.716	8
总干重	0.779	3	0.128	0.771	3

共 13 份，占总数的 43%；第 3 类为中等抗旱型种质，共 6 份，占总数的 20%；第 4 类为敏感型种质，共 7 份，占总数的 23%；第 5 类为高度敏感型种质，有 DM16(0420-7)和 DM30(Aspen)共 2 份，占总数的 7%。根据供试种质的抗旱性聚类分析及抗旱级别划分的结果，对供试种质抗旱性评价指标进行分级统计(表10)，除根鲜重、地上干重、根干重和总干重外，其余指标的隶属函数值、CDC 值、D 值和 WDC 值均随抗旱级别的升

高而增大。此外，CDC 值、D 值和 WDC 值在不同抗旱级别上的差异较大，可为其他大麦种质抗旱级别的划分提供依据。

表 10 供试大麦种质抗旱性评价指标的分级

指标	隶属函数				
	1	2	3	4	5
株高	0.977	0.730	0.563	0.487	0.090
根长	0.946	0.915	0.909	0.727	0.677
叶长	0.977	0.554	0.461	0.391	0.090
地上鲜重	0.881	0.643	0.453	0.344	0.541
根鲜重	0.814	0.617	0.660	0.645	0.236
地上干重	0.944	0.799	0.749	0.544	0.712
根干重	0.717	0.466	0.560	0.461	0.060
总干重	0.723	0.875	0.782	0.577	0.421
CDC 值	0.844	0.799	0.765	0.746	0.232
D 值	0.955	0.676	0.591	0.311	0.005
WDC 值	0.976	0.755	0.594	0.361	0.061



(图中 1、2、3、4、5 表示不同抗旱级别)

图 1 基于 D 值的供试大麦材料抗旱性系统聚类

### 2.7 抗旱指标的筛选

分别以 D 值、CDC 值和 WDC 值为参考序列，对各指标 DC 值进行逐步回归分析，得到的 3 个回归方程的决定系数  $R^2 \approx 1$ ，F 检验均达极显著水平(表11)。说明模型拟合度好，回归方程最优，其解释能力强，预测精度高，用这 3 个方程进行大麦种质资源苗期抗旱性评价效果好。根据 D 值与各指标 DC 值的回归方程可知，在大麦种质资源苗期抗旱性鉴定中，有选择性地测定与 D 值密切相关的指标，如株高和总干重，可有效

表 11 供试大麦种质抗旱性模型预测

因变量	多元逐步回归方程	决定系数 ( $R^2$ )	$F$	$P$
CDC 值	$y=0.146+0.617x_1+0.164x_8$	0.776	46.679	$P<0.001$
$D$ 值	$y=0.019+0.737x_1+0.208x_8$	0.803	60.145	$P<0.001$
WDC 值	$y=0.143+0.619x_1+0.169x_8$	0.788	50.281	$P<0.001$

鉴定大麦种质资源的抗旱性,从而使鉴定工作简化。

### 3 结论与讨论

干旱胁迫对大麦种质资源苗期各指标均有极显著影响。在供试材料中,苗期抗旱性强的大麦种质为西藏 25 和 NEVADA,可为大麦抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究提供基础材料。株高和总干重可作为评价大麦种质资源苗期抗旱性的指标。

作物抗旱性的综合评价需要将适宜的评价指标和评价方法有机结合起来其评价结果才更加准确。大多数作物的抗旱性评价方法均是采用等权重的评价方法,却忽视了各项指标的不同重要程度。本研究在大麦苗期抗旱性评价方法的选择时,采用  $D$  值、CDC 值和 WDC 值等综合评价指标,结合单项指标抗旱系数、频次分析、相关分析、主成分分析、灰色关联度分析、隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析对大麦种质资源苗期的抗旱性综合评价值做出评判,这样不但消除了各指标单位不同带来的差异,而且还可以结合指标变异系数来确定每一个指标在抗旱性评价体系中的权重,同时还对与抗旱性相关密切的指标分配较高的比重。以  $D$  值为主要综合评价指标,以 CDC 值和 WDC 值作为辅助综合评价指标的评价方法,既考虑了各指标间的相互关系,又考虑到各指标的重要性,其评价结果客观、可靠。

对作物抗旱性鉴定的最终目的是将供试的种质资源进行抗旱等级划分,以此来判定其抗旱能力的强弱。本研究在对大麦种质资源苗期的抗旱性鉴定时基于  $D$  值将供试的

30 份大麦种质资源划分为高度抗旱型种质、抗旱型种质、中等抗旱型种质、敏感型种质和高度敏感型种质 5 类,这与汪军成等<sup>[20]</sup>在大麦、罗俊杰等<sup>[27]</sup>在胡麻、汪灿等<sup>[21-22]</sup>在高粱和薏苡上的研究结果一致。本研究通过综合鉴定评价筛选出强抗旱性种质有西藏 25 和 NEVADA,高度敏感型种质有 0420-7 和 Aspen,其余种质材料介于两者之间;筛选出苗期抗旱性强的大麦种质分别为西藏 25 和 NEVADA,可为大麦抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究提供基础材料。

植物抵御或忍耐干旱胁迫是一个非常复杂的生理过程,受各种抗旱性指标共同制约,且各种抗旱性指标互相影响它们之间存在一定的相关性,其最终通过各种指标在不同生育时期的一系列变化表现出来<sup>[24]</sup>。为此,合理选择作物抗旱性鉴定指标就显得尤为关键。目前,国内外学者在作物苗期抗旱指标筛选方面开展了大量研究工作,针对不同的作物筛选出了不同的抗旱指标<sup>[8-14]</sup>。本研究在大麦种质资源苗期抗旱指标的筛选时,由于各指标受干旱胁迫影响的程度不同,且各指标间存在一定程度的相关性。因此,直接利用这些指标很难客观、准确地评价各种质的抗旱性,从而影响抗旱鉴定结果。各指标与  $D$  值的密切程度与各指标对干旱胁迫反应的敏感性及各指标与 WDC 值的密切程度吻合。通过逐步回归分析,得到与  $D$  值密切相关的指标有株高和总干重,因此,株高和总干重可作为大麦种质资源苗期鉴定、直观抗旱性评价的指

标。

### 参考文献:

- [1] 赵 锋, 潘永东, 包奇军, 等. 甘肃省大麦产业发展现状及发展对策[J]. 甘肃农业科技, 2020(11): 78-84.
- [2] 徐银萍, 潘永东, 任 诚, 等. 干旱胁迫和复水对啤酒大麦产量品质及叶绿素含量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2019(6): 19-24.
- [3] 李淑洁. 一种改进的大麦根尖染色体压片法及其应用[J]. 甘肃农业科技, 2020(5): 32-35.
- [4] 李静雯, 张正英, 王立光, 等. 大群体转基因大麦后代快速筛选研究[J]. 甘肃农业科技, 2019(8): 12-17.
- [5] 张木清, 陈如凯. 作物抗旱分子生理与遗传改良[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 22-23.
- [6] 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.
- [7] 龚 明. 作物抗旱性鉴定方法与指标及其综合评价[J]. 云南农业大学学报, 1989, 4(1): 73-81.
- [8] 武 斌, 李新海, 肖木辑, 等. 53份玉米自交系的苗期耐旱性分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 665-676.
- [9] 邹成林, 谭 华, 黄开建, 等. 广西玉米品种苗期生理生化指标与其抗旱性的综合评价[J]. 南方农业学报, 2015, 46(3): 408-414.
- [10] 李 真, 梅淑芳, 梅 忠, 等. 甘蓝型油菜DH群体苗期抗旱性的评价[J]. 作物学报, 2012, 38(11): 2108-2114.
- [11] 袁哲明, 谭显胜. 基于支持向量机非线性筛选水稻苗期抗旱性指标[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1176-1182.
- [12] 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.
- [13] 李 龙, 王兰芬, 武 晶, 等. 普通菜豆品种苗期抗旱性鉴定[J]. 作物学报, 2015, 41(6): 963-971.
- [14] 汪 灿, 周棱波, 张国兵, 等. 薏苡种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2872-2887.
- [15] 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.
- [16] 鞠 乐, 齐军仓, 成禄艳, 等. 大麦种子萌发期对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价[J]. 西南农业学报, 2013, 26(1): 93-98.
- [17] 鞠 乐, 齐军仓, 贺 雪, 等. 大麦种子萌发期抗旱性鉴定指标的筛选及抗旱性评价[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(11): 2008-2014.
- [18] 蒋 花. 大麦生长初期的抗旱生理特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [19] 惠宏斌. 干旱胁迫对大麦幼苗根系的影响及其与抗旱性关系的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
- [20] 汪军成, 孟亚雄, 徐先良, 等. 大麦苗期抗旱性鉴定及评价[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 135-143.
- [21] 汪 灿, 周棱波, 张国兵, 等. 酒用糯高粱资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1388-1402.
- [22] 汪 灿, 周棱波, 张国兵, 等. 薏苡种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报, 2017, 43(9): 1381-1394.
- [23] 兰巨生. 农作物综合抗旱性评价方法的研究[J]. 西北农业学报, 1998, 7(3): 85-87.
- [24] 祁旭升, 王兴荣, 许 军, 等. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3076-3087.
- [25] 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 等. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 665-674.
- [26] 张彦军, 苟作旺, 王兴荣, 等. 胡麻种质萌发期抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(3): 520-527.
- [27] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 等. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1259-1273.

(本文责编: 郑立龙)