

# PEG 模拟干旱胁迫下 12 份新疆野生无芒雀麦种质萌发期抗旱性评价

孙可蒙, 隋晓青, 王玉祥, 陈爱萍, 张博

(新疆农业大学 草业与环境科学学院/西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室/  
新疆草地资源与生态实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**以 15% 聚乙二醇(PEG-6000) 模拟干旱胁迫, 对采自新疆天山北坡不同区域的 12 份野生无芒雀麦种质材料的发芽率、发芽势、发芽指数及幼苗生长指标进行测定, 并以各个指标的相对值作为抗旱性评价指标, 采用隶属函数法对供试无芒雀麦种质的抗旱性进行综合评价。结果表明: 15% PEG 胁迫降低了发芽率、发芽势和发芽指数, 抑制胚芽和胚根的生长。通过隶属函数法综合评价, 筛选出萌发期抗旱性强的种质为 B10、B11 和 B12, B01、B02、B04、B05、B06、B07、B08 和 B09 抗旱性中等, B03 抗旱性弱。

**关键词:**无芒雀麦; 种子; PEG 胁迫; 抗旱性

**中图分类号:**S543; Q948.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2020)06-0102-07

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyyep.2020.06.016

水是自然界中至关重要的物质, 作物的生长、发育和繁殖都需要水。由于全球气候变暖, 导致许多地区的降水格局发生了改变<sup>[1]</sup>。目前全球干旱和半干旱地区的面积约占陆地面积的三分之二, 这些地区因经常出现不可预测的干旱, 对作物生长造成了严重的影响, 加之世界人口数量不断增加, 进一步加剧了水资源的短缺, 干旱已成为影响作物产量的主要原因之一<sup>[2]</sup>。因此, 在水资源短缺的情况下, 筛选抗旱材料, 培养抗旱品种已成为众多学者研究的热点。

作物能否正常生长很大程度上取决于种子的萌发能力, 而种子在萌发期易受水分胁迫的影响<sup>[3-4]</sup>。不同作物种子对水分胁迫具有不同的抗性<sup>[5-6]</sup>, 种子萌发能力的强弱在一定程度上可以反映作物苗期对逆境胁迫的忍耐能力<sup>[7]</sup>, 因此种子萌发期是对作物抗旱性进行评价的重要时期。国内外众多学者对种子在水分

胁迫下的萌发能力进行了广泛的研究<sup>[8-10]</sup>。聚乙二醇(PEG)是一种亲水性物质, 因不能透过细胞壁, 对种子无伤害作用, 常被用作模拟作物萌发和生长过程中的水分胁迫。

无芒雀麦(*Bromus inermis*)为禾本科雀麦属多年生草本植物<sup>[11]</sup>, 原产欧洲, 其野生类型广布于亚洲和北美洲等地区。中国北方已有 60 多年的栽培历史, 东北、内蒙古和新疆等地均有野生种<sup>[12]</sup>。无芒雀麦由于营养价值高, 适口性好, 为各类家畜喜食<sup>[13]</sup>, 是农牧民喜为种植的牧草品种之一, 还可用做青贮及干草饲料, 因此被称为“禾草饲料之王”。无芒雀麦也可改良天然草地, 是水土保持, 改土培肥, 治理荒山、荒坡、建植混播草地的理想草种<sup>[14]</sup>。新疆拥有我国最大的荒漠面积, 干旱、半干旱地区面积广大, 干旱生境孕育了丰富而独特的植物资源。在新疆, 野生无芒雀麦主要分布于天山北坡, 海拔在 1 500~2 400 m, 地理位置 E 92.986°~80.766°, N 43.074°~48.701°<sup>[15]</sup>。目前, 有关无芒雀麦种质抗旱性的研究主要集中在苗期<sup>[12, 16-17]</sup>, 而对不同来源或不同生境下的野生无芒雀麦种质资源在萌发期对干旱的响应报道较少。

本试验以采自新疆天山北坡不同区域的 12 份野生无芒雀麦种质为材料, 采用 15% 的 PEG-6000 为渗

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-04-07

基金项目: 国家牧草现代产业技术体系项目(CARS34)

作者简介: 孙可蒙(1996-), 女, 河北省唐山市人, 硕士。

E-mail: 573733578@qq.com

陈爱萍为通讯作者。

E-mail: xjauchenaiping@sina.com

透调节剂,对无芒雀麦种子的发芽率、发芽势、萌发指数、萌芽抗旱指数、抗旱指数等指标进行检测,对抗旱性进行评价,旨在探讨无芒雀麦种质萌发对干旱胁迫的适应性和耐受性,为无芒雀麦抗旱种质的筛选提供参考。

表 1 12 份无芒雀麦种质材料

Table 1 12 germplasm materials of *Bromus inermis*

编号	采集地或引种地	纬度	经度	海拔/m
B01	博州温泉县	N 44°58'23"	E 81°2'13"	1 330
B02	特克斯坎土曼托别村	N 43°7'33"	E 81°44'6"	1 280
B03	阿勒泰吉木乃县恰其海	N 47°30'52"	E 86°12'10"	—
B04	乌鲁木齐乌鲁木齐县	N 43°28'59"	E 87°2'34"	1 960
B05	昌吉吉木萨尔县花儿沟	N 43°57'52"	E 88°4'12"	—
B06	奇台宽沟村	N 43°39'43"	E 89°37'44"	1 529
B07	昌吉吉木萨尔县泉子街镇	N 43°46'23"	E 89°9'17"	1 390
B08	呼图壁康家石门子村	N 43°50'10"	E 89°18'00"	1 616
B09	阿勒泰青河县克孜勒萨依村	N 46°33'59"	E 90°20'1"	1 200
B10	哈密巴里坤兰州湾	N 43°34'27"	E 92°58'28"	1 650
B11	哈密白石头沟	N 43°22'19"	E 92°45'18"	2 221
B12	哈密巴里坤县	N 43°35'5"	E 93°40'13"	1 640

## 1.2 试验设计

发芽试验依据《农作物种子检验规程—发芽试验》(1995 年 8 月发布)。选择大小一致、籽粒饱满、无破损的种子 50 粒,用 5% 的次氯酸钠溶液表面灭菌 15 min,之后用蒸馏水反复冲洗 5 遍,置于直径为 12 cm 并铺有双层滤纸的培养皿中。每皿加入 15% PEG-6000 溶液 8 mL,对照为等量蒸馏水,每处理重复 3 次,培养皿用封口膜封口,于变温光照培养箱进行种子发芽实验,每 2 d 更换一次 PEG 溶液。培养条件为:昼夜温度为 25℃/15℃,光照周期 16 h/8 h(光照/黑暗),光照强度为 4 000 lx。其中,浓度为 15% PEG-6000 溶液的渗透势为 -0.388 MPa<sup>[18]</sup>。

以胚根突破种皮作为发芽标准<sup>[19]</sup>,每天记录发芽种子数量,连续 3 d 未发现有种子萌发视为萌发结束。于第 3 d 统计发芽势,第 10 d 统计发芽率、发芽指数等。试验结束后,每皿随机选取 10 株幼苗用游标卡尺(精度 0.01 cm)测量胚根长、胚芽长。

## 1.3 测定内容及方法

1.3.1 种子发芽率、发芽势和发芽指数 计算发芽率(GR)、发芽势(GE)、发芽指数(GI)<sup>[20]</sup>,计算公式如下:

$$\text{发芽势}(\%) = \frac{Nm}{N} \times 100\%$$

$$\text{发芽率}(\%) = \frac{n}{N} \times 100\%$$

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试无芒雀麦种质材料共计 12 份,具体采集信息见表 1。

$$\text{发芽指数} = \sum(DG/DT)$$

式中, $Nm$  为前 3 天正常发芽的种子数, $n$  为前 10 d 正常发芽的种子, $N$  为培养皿中种子总数, $DG$  为逐日发芽数, $DT$  为相应  $DG$  的发芽天数。

1.3.2 种子萌发特性 计算相对发芽势(RGE)、相对发芽率(RGR)、相对胚芽长(RGL)、相对胚根长(RERL):

$$\text{相对性状指标}(\%) = \frac{\text{处理下各性状测定值}}{\text{对照各性状测定值}} \times 100\%$$

1.3.3 萌发抗旱指数和胁迫指数 将渗透胁迫下性状测定值与对照测定值的相对比值作为干旱胁迫反应指数<sup>[21-22]</sup>。公式如下:

$$\text{萌发抗旱指数(GDRI)} = \frac{\text{渗透胁迫下测定值}}{\text{对照测定值}}$$

$$\text{种子萌发指数} = (1.00) \times nd_2 + (0.75) \times nd_4 + (0.50) \times nd_6 + (0.25) \times nd_8$$

其中  $nd_2$ 、 $nd_4$ 、 $nd_6$ 、 $nd_8$  分别为第 2、4、6、8 d 的种子发芽率,1.00、0.75、0.50、0.25 分别为相应萌发天数的抗旱系数。

萌发胁迫指数(GSI) = 渗透胁迫下种子萌发指数/对照种子萌发指数

1.3.4 隶属函数值 用隶属函数法对不同无芒雀麦种质的抗旱性进行综合评价,隶属函数值越大,表示其抗旱性越强。在进行抗旱性隶属值计算时,需首先按

照公式(1)进行数据标准化处理,然后按照公式(2)计算标准差系数  $V_j$ ,按照公式(3)计算权重系数  $W_j$ ;按照公式(4)计算隶属函数值( $D$ )。

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$V_j = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X}_j)^2}}{(\sum_{j=1}^n V_j)^2} \quad (2)$$

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (3)$$

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j] \quad (4)$$

式中,  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $X_j$  表示第  $j$  个指标值,  $X_{\min}$  表示第  $j$  个指标的最小值,  $X_{\max}$  表示第  $j$  个指标的最大值。

#### 1.4 数据处理

运用 Excel 2016 进行相关指标统计分析,用 SPSS Statistics17.0 进行无芒雀麦种质材料间各指标的差异性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 PEG 胁迫对发芽率、发芽势及发芽指数的影响

发芽率反映种子发芽能力的大小,发芽势反映种子发芽速度的快慢,发芽指数反映幼苗生长情况,三者均为衡量种子发芽能力的重要指标。从发芽率看, B11 在干旱处理下发芽率最高,为 89.33%,而 B03 发

芽率最低,为 52.67%,两种质间差异显著,其余种质介于 68.67%~88.00%, B02 对照发芽率最高,为 100%,而 B01 对照发芽率最低,为 84.67%,两种质间差异显著,其余种质介于 85.33%~98.00%;从发芽势看, B11 在干旱处理下发芽势最高,为 43.33%,而 B03 发芽势最低,为 12.67%,两种质间差异显著,其余种质介于 14.00%~33.33%, B04 对照发芽势最高,为 60.67%,而 B01 对照发芽势最低,为 25.33%,两种质间差异显著,其余种质介于 34.00%~58.67%;从发芽指数看, B11 在干旱处理下发芽指数最高,为 13.24,而 B03 发芽指数最低,为 5.94,两种质间差异显著,其余种质介于 7.11~12.63, B02 对照发芽指数最高,为 16.72,而 B01 对照发芽指数最低,为 11.08,两种质间差异显著,其余种质介于 12.25~16.66%(表 2)。与对照相比, PEG 胁迫下 12 份无芒雀麦种质的发芽率、发芽势、发芽指数大多呈降低趋势,但降低幅度有所不同。从发芽率看, B03 降低幅度最大,比对照降低了 45.52%, B11 降低幅度最小,比对照降低了 6.29%,而 B10 在 PEG 胁迫下发芽率不但没有降低,反而有促进作用,比对照提高了 8.33%;从发芽势看, B03 的降低幅度最大,与对照相比降低了 72.05%, B08 的降低幅度最小,与对照相比降低了 23.64%, B11 处理后的发芽势比对照提高了 1.55%;从发芽指数分析, B03、B04 降低幅度较大,与对照相比均在 40.00% 以上,而 B10、B11、B12 与对照相比降低幅度较小,均在 20.00% 以下。

表 2 PEG 胁迫下无芒雀麦的发芽率、发芽势及发芽指数

Table 2 Germination rate, germination energy and germination index of *Bromus inermis* under PEG stress

编号	发芽率/%			发芽势/%			发芽指数		
	处理	对照	降低率/%	处理	对照	降低率/%	处理	对照	降低率/%
B01	68.67 <sup>g</sup>	84.67 <sup>def</sup>	18.90	14.00 <sup>i</sup>	25.33 <sup>ghij</sup>	44.73	7.11 <sup>j</sup>	11.08 <sup>efgh</sup>	35.83
B02	88.00 <sup>abcdef</sup>	100.00 <sup>a</sup>	12.00	32.00 <sup>efgh</sup>	58.00 <sup>ab</sup>	44.83	12.63 <sup>def</sup>	16.72 <sup>a</sup>	24.46
B03	52.67 <sup>h</sup>	96.67 <sup>abcd</sup>	45.52	12.67 <sup>j</sup>	45.33 <sup>cde</sup>	72.05	5.94 <sup>j</sup>	13.98 <sup>bcd</sup>	57.51
B04	78.00 <sup>fg</sup>	96.00 <sup>abcd</sup>	18.75	20.67 <sup>hij</sup>	60.67 <sup>a</sup>	65.93	9.52 <sup>gh</sup>	16.66 <sup>a</sup>	42.86
B05	85.33 <sup>cdef</sup>	97.33 <sup>abc</sup>	12.33	28.67 <sup>fgh</sup>	42.67 <sup>cde</sup>	32.81	11.62 <sup>defg</sup>	14.79 <sup>bcd</sup>	21.43
B06	79.33 <sup>fg</sup>	88.67 <sup>abcdef</sup>	10.53	20.67 <sup>hij</sup>	34.00 <sup>defgh</sup>	39.21	9.13 <sup>hi</sup>	12.25 <sup>def</sup>	25.47
B07	85.33 <sup>cdef</sup>	92.00 <sup>abcde</sup>	7.25	26.00 <sup>ghi</sup>	46.67 <sup>bcd</sup>	44.29	10.42 <sup>efg</sup>	13.60 <sup>cd</sup>	23.38
B08	77.33 <sup>fg</sup>	98.00 <sup>ab</sup>	21.09	28.00 <sup>fgh</sup>	36.67 <sup>cdefg</sup>	23.64	10.79 <sup>fgh</sup>	14.11 <sup>bcd</sup>	23.53
B09	86.00 <sup>bcdef</sup>	96.00 <sup>abcd</sup>	10.42	33.33 <sup>defgh</sup>	58.67 <sup>ab</sup>	43.19	11.98 <sup>def</sup>	16.28 <sup>ab</sup>	26.41
B10	86.67 <sup>bcdef</sup>	80.00 <sup>efg</sup>	-8.33	23.33 <sup>ghij</sup>	40.67 <sup>cdef</sup>	42.64	11.15 <sup>efgh</sup>	12.43 <sup>def</sup>	10.30
B11	89.33 <sup>abcdef</sup>	95.33 <sup>abcd</sup>	6.29	43.33 <sup>cde</sup>	42.67 <sup>cde</sup>	-1.55	13.24 <sup>cde</sup>	14.05 <sup>bcd</sup>	5.77
B12	85.33 <sup>cdef</sup>	85.33 <sup>cdef</sup>	0.00	32.00 <sup>efgh</sup>	48.67 <sup>abc</sup>	34.25	11.68 <sup>defg</sup>	14.04 <sup>bcd</sup>	16.81

注: 同列不同字母表示在 5% 水平差异显著, 下同

## 2.2 PEG胁迫对种子萌发特性的影响

相对发芽率、相对发芽势、相对胚芽长以及相对胚根长的高低可以表示PEG胁迫对种子萌发的抑制程度,相对值越低其受抑制程度越高。B10相对发芽率最高,为108.33%,其次是B12和B11,分别为100%和93.71%,B03最低,为55.48%,其余8份种质无显著差异,分布在75%~95%。B11相对发芽势最高,为101.56%,B03、B04最低,分别为27.94%和37.36%,其余种质的相对发芽势集中在50%~70%。不同种质材料的相对胚芽长均呈降低趋势,B10(71.71%)、B12(74.33%)和B11(77.15%)的相对胚芽长显著高于B02(42.29%)。从相对胚根长来看,抗旱性较强的是B10、B12,分别为85.12%和83.82%,其他种质分布在40%~70%,说明在PEG胁迫下,12份种质的胚根发育均受到一定的抑制(表3)。

表3 PEG胁迫下无芒雀麦种质萌发特性

Table 3 Germination character of *Bromus inermis* germplasms under PEG stress %

编号	相对发芽率	相对发芽势	相对胚芽长	相对胚根长
B01	81.09 <sup>c</sup>	55.26 <sup>bc</sup>	46.94 <sup>bc</sup>	49.54 <sup>b</sup>
B02	88.00 <sup>bc</sup>	55.17 <sup>bc</sup>	42.29 <sup>c</sup>	50.34 <sup>b</sup>
B03	54.48 <sup>d</sup>	27.94 <sup>d</sup>	49.58 <sup>bc</sup>	42.73 <sup>b</sup>
B04	81.25 <sup>c</sup>	37.36 <sup>cd</sup>	62.16 <sup>abc</sup>	65.75 <sup>ab</sup>
B05	87.67 <sup>bc</sup>	67.19 <sup>b</sup>	58.47 <sup>abc</sup>	63.63 <sup>ab</sup>
B06	89.47 <sup>bc</sup>	60.78 <sup>b</sup>	62.22 <sup>abc</sup>	51.40 <sup>b</sup>
B07	92.74 <sup>bc</sup>	55.71 <sup>b</sup>	65.95 <sup>ab</sup>	68.48 <sup>ab</sup>
B08	78.90 <sup>c</sup>	76.36 <sup>b</sup>	58.09 <sup>ab</sup>	51.09 <sup>b</sup>
B09	89.58 <sup>bc</sup>	56.82 <sup>bc</sup>	63.69 <sup>abc</sup>	63.59 <sup>ab</sup>
B10	108.33 <sup>a</sup>	57.38 <sup>bc</sup>	71.71 <sup>a</sup>	85.12 <sup>a</sup>
B11	93.71 <sup>abc</sup>	101.56 <sup>a</sup>	77.15 <sup>a</sup>	67.79 <sup>ab</sup>
B12	100.00 <sup>ab</sup>	65.75 <sup>b</sup>	74.33 <sup>a</sup>	83.82 <sup>a</sup>

## 2.3 PEG胁迫对抗旱指数及胁迫指数的影响

植物的萌发抗旱指数与胁迫指数在一定程度上反映了种质间抗旱性差异,萌发抗旱指数高表明其具有较强的抗旱能力。萌发抗旱指数较高的是B10(1.11),B03(0.4252)萌发抗旱指数最小,两种种质间差异显著;B11(0.9423)胁迫指数相对较高,且显著高于B03(0.4249),其他种质介于两者之间(表4)。

## 2.4 不同无芒雀麦种质萌发期抗旱性综合评价

以相对发芽率、相对发芽势、相对胚芽长、相对胚

表4 PEG胁迫下无芒雀麦种质萌发抗旱指数及胁迫指数

Table 4 Seed germination drought resistance index and germination stress index of *Bromus inermis* under PEG stress

编号	萌发抗旱指数	胁迫指数
B01	0.579 8 <sup>cde</sup>	0.641 7 <sup>de</sup>
B02	0.865 0 <sup>b</sup>	0.755 4 <sup>bcd</sup>
B03	0.425 2 <sup>e</sup>	0.424 9 <sup>f</sup>
B04	0.514 8 <sup>de</sup>	0.571 4 <sup>e</sup>
B05	0.787 5 <sup>bc</sup>	0.785 7 <sup>abcd</sup>
B06	0.763 5 <sup>bc</sup>	0.745 3 <sup>bcd</sup>
B07	0.735 8 <sup>bc</sup>	0.766 2 <sup>bcd</sup>
B08	0.649 4 <sup>bcd</sup>	0.764 7 <sup>bcd</sup>
B09	0.664 4 <sup>bcd</sup>	0.735 9 <sup>cd</sup>
B10	1.110 0 <sup>a</sup>	0.897 0 <sup>ab</sup>
B11	0.783 5 <sup>bc</sup>	0.942 3 <sup>a</sup>
B12	0.812 0 <sup>b</sup>	0.831 9 <sup>abc</sup>

根长、胁迫指数和萌发抗旱指数6个指标为依据,采用隶属函数法对不同无芒雀麦种质萌发期抗旱性进行综合评价。一般而言,综合评价值(CEV)越大,表明其抗旱能力越强。12份无芒雀麦种质间的综合评价值差异较大,其中萌发期抗旱性强的种质为B10、B11和B12,CEV值分别为0.86、0.81、0.77,抗旱性中等的种质为B01、B02、B04、B05、B06、B07、B08和B09,CEV值介于0.58~0.30,B03抗旱性最弱,综合评价值为0.04(表5)。

## 3 讨论

植物在生长过程中会遭遇多种非生物胁迫,不同植物对非生物胁迫的耐受性不同,这与植物的种类,年龄及胁迫的持续时间和胁迫程度有关。植物种子的萌发特性与生境条件和其自然分布地区的气候密切相关,是植物对分布地区自然生长环境的一个长期适应的结果<sup>[20]</sup>。在种子萌发过程中,种子通过提高保护酶的活性和体内渗透调节物质来适应干旱胁迫,可以最大限度地减轻干旱胁迫对萌发过程造成的伤害<sup>[23]</sup>,分布在干旱半干旱地区植物的种子在萌发过程中抵抗干旱胁迫的能力可能更强,甚至部分植物的种子在土壤含水量为1%~2%时即能进行萌发<sup>[24-25]</sup>。有研究表明,随着干旱胁迫程度的增强,萌发率、萌发指数和活

表 5 PEG 胁迫下无芒雀麦种质各指标隶属函数值及综合评价

Table 5 Subordinate function value of various indexes and comprehensive evaluation value of

*Bromus inermis* under PEG stress

编号	隶属函数值						综合评价 价值	排序
	相对发 芽率	相对发 芽势	相对胚 根长	相对胚 芽长	胁迫指数	萌发抗 旱指数		
B01	0.49	0.37	0.16	0.13	0.23	0.42	0.30	11
B02	0.62	0.37	0.18	0.00	0.64	0.64	0.41	9
B03	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.04	12
B04	0.50	0.13	0.54	0.57	0.13	0.28	0.36	10
B05	0.62	0.53	0.49	0.46	0.53	0.70	0.56	5
B06	0.65	0.45	0.20	0.57	0.49	0.62	0.50	7
B07	0.71	0.38	0.61	0.68	0.45	0.66	0.58	4
B08	0.45	0.66	0.20	0.45	0.33	0.66	0.46	8
B09	0.65	0.39	0.49	0.61	0.35	0.60	0.52	6
B10	1.00	0.40	1.00	0.84	1.00	0.91	0.86	1
B11	0.73	1.00	0.59	1.00	0.52	1.00	0.81	2
B12	0.85	0.51	0.97	0.92	0.56	0.79	0.77	3

力指数等均呈下降趋势<sup>[18,26]</sup>,本研究得到的结论与他人研究基本一致。也有报道指出,干旱胁迫不但没有对种子萌发产生抑制作用,反而促进其萌发<sup>[27-28]</sup>,本研究中,PEG 胁迫下 B10 的发芽率比对照提高了 8.33%,B11 的发芽势比对照高 1.55%,这可能是 PEG 处理后,提高了种子酶活性及 RNA 含量,促进了蛋白质的合成,对种子萌发起到了一定程度的“引发”作用,从而提高了种子的萌发能力<sup>[22,29]</sup>。这是物种在长期繁衍过程中对环境变化的一种适应性反应<sup>[30]</sup>。

植物的抗旱性受多种因素的影响,由单一指标评价种子萌发期的抗旱性具有片面性,通过模糊数学隶属函数法将多项指标进行综合评价,既消除了由单一指标评价的抗旱性带来的片面性,又由于平均值是(0,1)区间上的纯数,使各种质各指标的抗旱性差异具有可比性,使鉴定结果更为准确。本研究通过模糊数学隶属函数法,筛选出 B10、B11 和 B12 3 份抗旱性较强的无芒雀麦种质,3 份种质均采自哈密地区。根据水文监测和调查资料显示,该地区属缺水较严重的区域,因此,生长在该地区的植物长期面对干旱环境,具有较强的抗旱性。

## 4 结论

15% PEG 模拟干旱胁迫可降低无芒雀麦种质的

发芽率、发芽势和发芽指数,抑制了胚芽和胚根的生长。采用模糊数学隶属函数法对 12 份无芒雀麦种质抗旱性进行综合评价,抗旱能力由强到弱依次为 B10、B11、B12、B07、B05、B09、B06、B08、B02、B04、B01、B03。其中,抗旱性强的种质为 B10、B11、B12;抗旱性中等的为 B01、B02、B04、B05、B06、B07、B08、B09;B03 抗旱性弱。研究结果可为无芒雀麦耐旱性品系的选育和培育耐旱品种提供参考。

### 参考文献:

- [1] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nat Clim Change,2012,3(2):52-58.
- [2] Trenberth K E,Dai A,Schrier G,*et al.* Global warming and changes in drought[J]. Nat Clim Change,2014,4(1):17-22.
- [3] Hellal F A,El-Shabrawi H M,El-Hady M,*et al.* Influence of PEG induced drought stress on molecular and biochemical constituents and seedling growth of Egyptian barley cultivars[J]. Biotechnol, Genet Eng,2018,16(1):203-212.
- [4] Li R,Zeng Y,Xu J,*et al.* Genetic variation for maize root architecture in response to drought stress at the seedling stage[J]. Breed Sci,2015,65(4):298-307.
- [5] Nascimento J P B,Meiado M V,Siqueira-Filho J A. Seed

- germination of three endangered subspecies of *Discocactus Pfeiff.* (Cactaceae) in response to environmental factors[J]. *Seed Sci.*, 2018, 40(3):253-262.
- [6] Lai L M, Chen L J, Zheng M Q, *et al.* Seed germination and seedling growth of five desert plants and their relevance to vegetation restoration[J]. *Ecol Evol.* 2019, 9: 2160-2170.
- [7] 唐伟,南志标. 不同温度下 PEG-6000 渗透胁迫对歪头菜种子发芽的影响[J]. *草业科学*, 2019, 36(5):1323-1332.
- [8] Ravelombola W S, Shi A, Weng Y, *et al.* Evaluation of salt tolerance at germination stage in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] [J]. *Hort Science*, 2017, 52(9), 1168-1176.
- [9] Attiat E, Ali E, Kareem A, *et al.* Drought tolerance during germination depends on light and temperature of incubation in *Salsola imbricata*, a desert shrub of Arabian deserts[J]. *Flora*, 2018, 249:156-163.
- [10] 孙艳茹,石屹,陈国军,等. PEG 模拟干旱胁迫下 8 种绿肥作物萌发特性与抗旱性评价[J]. *草业学报*, 2015, 24(3):89-98.
- [11] 石凡涛,拉夫旦,王金山,等. 无芒雀麦引种适应性的观察[J]. *四川草原*, 2004(6):20-21.
- [12] 毛培春,孟林,高洪文,等. 20 份无芒雀麦种质材料苗期抗旱性综合评价及光合特性分析[J]. *草地学报*, 2011, 19(4):619-624, 630.
- [13] 程铭,骆秀梅,扈延成,等. 不同播种组合无芒雀麦产量构成因子的数量特征分析[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(1):44-48.
- [14] 郭孝,郭良兴,刘党标. 无芒雀麦在单播及混播下牧草产量和品质的分析[J]. *中国草食动物科学*, 2018, 38(5):62-65.
- [15] 宫珂,靳瑰丽,李陈建,等. 天山北坡野生无芒雀麦的表型性状[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(9):2615-2621.
- [16] 赵德华. 四份无芒雀麦在高寒地区生产性能评价及苗期抗旱性研究[D]. 西宁:青海大学, 2009.
- [17] 王晓龙,李红,杨墨,等. 干旱胁迫下 4 种禾本科牧草根系抗旱性比较[J]. *中国饲料*, 2016(13):22-24.
- [18] 田宏,刘洋,张鹤山,等. PEG-6000 胁迫下 6 份狼尾草萌发期抗旱性研究[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(24):6115-6119.
- [19] Baskin C C, Baskin J M. Biogeography and Evolution of Dormancy and Germination [J]. *Seeds; Ecology*, 2001, 152(2):204-205.
- [20] 李培英,孙宗玖,阿不来提,等. PEG 模拟干旱胁迫下 29 份偃麦草种质种子萌发期抗旱性评价[J]. *中国草地学报*, 2010, 32(1):32-39.
- [21] 王赞,李源,吴欣明,等. PEG 渗透胁迫下鸭茅种子萌发特性及抗旱性鉴定[J]. *中国草地学报*, 2008, 30(1):50-55.
- [22] 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.
- [23] Heydecker W, Higgins J, Gulliver R L. Accelerated germination by osmotic seed treatment [J]. *Nature*, 1973, 246:73-88.
- [24] 张颖娟,王玉山,李青丰. 西鄂尔多斯珍稀濒危植物长叶红砂种子萌发特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12):2572-2576.
- [25] Liu H L, Shi X, Wang J C, *et al.* Effects of sand burial, soil water content and distribution pattern of seeds in sand on seed germination and seedling survival of *Eremosparton songoricum* (Fabaceae), a rare species inhabiting the moving sand dunes of the Gurbantunggut Desert of China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 345(1-2):69-87.
- [26] Gorai M, Aloui W, Yang X J, *et al.* Toward understanding the ecological role of mucilage in seed germination of a desert shrub *Henophyton deserti*: interactive effects of temperature, salinity and osmotic stress [J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1):727-738.
- [27] 史薇,徐海量,赵新风,等. 胀果甘草种子萌发对干旱胁迫的生理响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(8):2112-2117.
- [28] 李志萍,张文辉,崔豫川. PEG 模拟干旱胁迫对栓皮栎种子萌发及生长生理的影响[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(10):2043-2049.
- [29] 王彦荣. 种子引发的研究现状[J]. *草业学报*, 2004, 13(4):7-12.
- [30] 闫兴富,周立彪,思彬彬,等. 不同温度下 PEG-6000 模拟干旱对柠条锦鸡儿种子萌发的胁迫效应[J]. *生态学报*, 2016, 36(7):1989-1996.

(下转 117 页)

180 days of storage, the CP content decreased by 21.99% averagely, and EE decreased from 3.17%–3.39% at baling to 1.47%–2.45%. The treatment A2C2 had the highest moisture content (15.19%), A2C3 had the highest CP content (8.13%), and the highest EE (2.45%) was observed in A1B3 treatment. The crude ash, NDF and ADF increased significantly with the increasing storage time. The treatment A1C1 had the highest crude ash content while A2B1 showed the highest NDF content. The addition of antifungal agent can significantly reduce the nutritional loss of oat hay. The longer the storage time, the more effective of the antifungal agent. Add of 0.4% calcium propionate or 0.1% sodium benzoate to oat hay with 28%–30% moisture content can significantly improve the quality of oat hay.

**Key words:** oat hay; antifungal agent; storage time; nutritional quality

.....  
(上接 107 页)

## Evaluation of drought resistance for 12 *Bromus inermis* germplasms in Xinjiang under PEG stress at germination stage

SUN Ke-meng, SUI Xiao-qing, WANG Yu-xiang, CHEN Ai-ping, ZHANG Bo

(College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Western Arid Region Grassland Resource and Ecology of Ministry of Education, Xinjiang Grassland Resource and Ecology Key Laboratory, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** 15% polyethylene glycol (PEG-6000) was used to simulate drought stress, the germination rate, germination energy, germination index, and seedling growth index of 12 wild *Bromus inermis* germplasms collected from different regions on the northern slope of Tianshan Mountain in Xinjiang were measured. And the relative value of each index was taken as evaluation index of drought resistance, the drought resistance of *B. inermis* germplasms were evaluated with subordinate function method. The results showed that the germination rate, germination energy, and germination index of *B. inermis* germplasms decreased generally under 15% PEG stress, and the growth of germ and radicle was inhibited. According to the comprehensive evaluation of subordinate function method, B10, B11 and B12 showed a strong drought resistance, B01, B02, B04, B05, B06, B07, B08 and B09 showed a medium drought resistance, and B03 showed a weak drought resistance at germination stage.

**Key words:** *Bromus inermis*; seed; PEG stress; drought resistance