

# 青藏高原地区野生老芒麦苗期抗旱种质材料的筛选

杨伟<sup>1</sup>, 刘文辉<sup>2</sup>, 马祥<sup>2</sup>, 贾志锋<sup>2</sup>, 马晖玲<sup>1</sup>, 张永超<sup>2</sup>, 刘敏洁<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学 草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为筛选苗期抗旱性较强的野生老芒麦种质材料, 用于青藏高原人工牧草栽培与育种, 采用砂培和盆栽 2 种培养方式, 对青藏高原不同地区收集的 25 份老芒麦材料进行模拟干旱试验, 并使用隶属函数法评价各材料的抗旱性, 引入干旱变异指数筛选老芒麦抗旱性评价指标。结果表明: 两次筛选结果相似, 其中 10-124、14-250、16-335、09-118、G23 和 09-035 为抗旱材料, 14-234、09-110、川草 1 号、09-089、09-249、09-129、09-150、09-053、G9、13-306、13-360 和 10-005 为中等抗旱材料; 1-1-4-2、09-210、09-149、1-1-5-13、青牧 1 号、13-364 和 14-004 为不抗旱材料; (2) 叶面积、根冠比、根长、丙二醛含量、脯氨酸含量、叶绿素含量、净光合速率、最大光化学效率、光化学淬灭系数和表观电子传递效率的干旱变异系数相对较大, 可作为青藏高原老芒麦抗旱种质材料筛选的依据。综上, 10-124、14-250、16-335、09-118、G23 和 09-035 抗旱性较强, 可作为青藏高原牧草栽培与育种的首选材料; 叶面积、根冠比和根长等指标对干旱胁迫较为敏感, 可作为老芒麦苗期抗旱性评价指标。

**关键词:**老芒麦; 干旱胁迫; 抗旱性筛选; 隶属函数法; 干旱变异指数

**中图分类号:**S543.034 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)04-0074-07

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.04.010



老芒麦(*Elymus sibiricus*)是一种产量高、营养丰富、适口性好的多年生禾本科植物, 有较强的抗逆性, 分布范围广, 因此是应用广泛的牧草, 尤其在青藏高原地区<sup>[1-3]</sup>。此外, 老芒麦也是天然草地修复和人工草地建植的优良材料<sup>[4]</sup>。青藏高原地区老芒麦的播种时间一般在 6 月, 当年只能完成分蘖, 第 2 年的返青期、分蘖期对于老芒麦的生长发育十分重要<sup>[5]</sup>, 然而由于春旱频发(图 1), 严重影响了老芒麦的生长发育。

干旱胁迫限制了植物的生长发育, 甚至破坏了植物的代谢系统<sup>[6]</sup>, 同时植物抗旱性是由多个基因控制的数量性状<sup>[7]</sup>。研究表明, 老芒麦平均生长率下降速度与干旱胁迫成正比, 并且干旱胁迫后期, 由于叶片大量失水导致叶片皱缩, 植株变矮<sup>[8-9]</sup>。此外, 干旱加速了叶片内叶绿素的分解速度, 从而抑制植物的光合作用<sup>[10]</sup>。老芒麦在干旱条件下通过调节渗透物质(脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白)含量达到吸收水分的目的<sup>[8-9]</sup>。在响应干旱胁迫的过程中, 老芒麦体内的抗氧化酶活性和抗氧化物质含量迅速增加, 以便及时清除干旱胁迫产生 ROS, 从而保证细胞膜的完整性<sup>[7]</sup>。可见, 老芒麦的抗旱性需要从多指标多方面进行评价。

本研究对青藏高原不同地方收集的 23 份野生老芒麦以及 2 份审定登记品种进行研究, 使用隶属函数法评价以上材料幼苗期的抗旱性, 并引用干旱变异指数衡量不同材料之间的差异, 以期筛选苗期抗旱材料, 并对老芒麦抗旱性进行评价, 建立老芒麦抗旱性鉴定体系, 为老芒麦抗旱性鉴定、筛选以及饲草生产提供理论依据。

**收稿日期:**2020-08-08; **修回日期:**2021-05-24

**基金项目:**青海省科技厅重点实验室发展专项“青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室”(2020-ZJ-Y03); 青海省科技厅基础科研项目(2018-ZJ-968Q); 高寒区饲草高效种植与精细加工技术集成与示范(2021-QY-208)

**作者简介:**杨伟(1992-), 男, 汉, 甘肃兰州人, 在读博士。

E-mail: 1365054954@qq.com

马晖玲为通讯作者。

E-mail: mahl@gsau.edu.cn

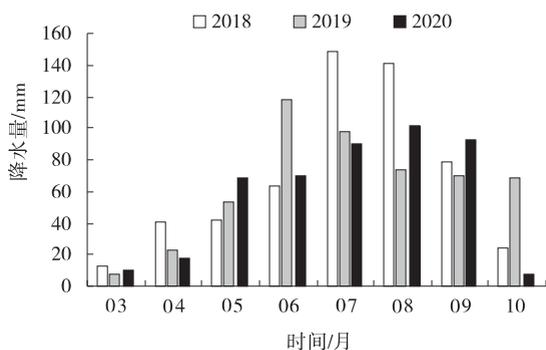


图 1 青海省畜牧兽医科学院多年生牧草种质资源圃降水量

Fig. 1 Rainfall in the perennial forage germplasm resource nursery of Qinghai academy of animal husbandry and veterinary sciences

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

试验材料由青海省畜牧兽医科学院草原所提供，

详见表 1。

### 1.2 试验设计及处理

1.2.1 第 1 次砂培试验 选择均匀一致、饱满的老芒麦材料的种子种植于装有适量沙子的育苗钵(直径 8.5 cm, 高度 11 cm), 将育苗钵放入装有 1 L 蒸馏水的培养盒中(每盒 6 个育苗钵), 每份材料种植 4 盒, 在光照强度为 6 000 lx, 光周期为 16 h/8 h(光照/黑暗), 温度为 22℃/18℃的培养室中进行培养。出苗 7 d 后进行间苗, 每个育苗钵留 20 株幼苗, 然后每盒加 1 L 1/2 Hoagland 营养液进行培养, 每天补水使溶液总量保持在 1 L, 每 4 d 换 1 次营养液。老芒麦幼苗长到 2 叶 1 心时, 将每份材料分为两组, 一组材料继续用 1/2 Hoagland 营养液培养; 另一组用含有 20% (W/V) PEG 6000(水势: -0.60 Mpa)的 1/2 Hoagland 营养液进行胁迫处理。胁迫第 20 d 进行各指标的测定。

1.2.2 第 2 次盆栽试验 为验证第 1 次砂培试验结

表 1 供试材料信息

Table 1 Information of test materials

材料编号	来源	经度	纬度	海拔/m	收种地
09-035	青海省平安县巴藏沟上郭图尔村	102° 06' 214"	36°20'021"	3 129	海北州西海镇
09-053	青海省平安县巴藏沟上郭图尔村	102° 06' 348"	36°20'508"	2 994	海北州西海镇
09-089	青海省平安县沙沟乡	102° 04' 060"	36°19'354"	2 863	海北州西海镇
09-110	青海省平安县三合镇	101° 58' 846"	36°17'059"	2 865	海北州西海镇
09-118	青海省平安县三合镇	101° 57' 296"	36°19'580"	2 865	海北州西海镇
09-129	青海省平安县三合镇	101° 57' 437"	36°20'047"	2 741	海北州西海镇
09-149	青海省湟源县日月乡	101° 08' 821"	36°29'629"	3 070	海北州西海镇
09-150	青海省湟源县日月乡	101° 08' 821"	36°29'629"	3 070	海北州西海镇
09-210	青海省天峻县新源镇	98° 52' 055"	37°07'705"	3 600	海北州西海镇
09-249	青海省德令哈	96° 13' 315"	37°26'143"	3 775	海北州西海镇
10-124	青海省互助县南门峡镇	101° 51' 082"	36°57'789"	2 993	海北州西海镇
10-005	青海省互助县威远镇	102°02' 105"	36°52'141"	2 610	海北州西海镇
1-1-4-2	青海省同德县唐干乡	100°23' 040"	35°13'006"	3 263	海北州西海镇
1-1-5-13	青海省刚察县哈尔盖乡	100°25' 007"	37°14'012"	3 228	海北州西海镇
13-306	四川省阿坝县麦尔玛乡	102°00' 002"	32°52'001"	3 715	海北州西海镇
13-360	四川省若尔盖县达扎寺镇	102°57' 023"	33°35'047"	3 614	海北州西海镇
13-364	四川省若尔盖县达扎寺镇	102°57' 023"	33°35'047"	3 614	海北州西海镇
14-004	四川省红原县江茸乡	102° 20' 133"	32°31'514"	3 543	海北州西海镇
14-234	四川省松潘县川主寺	103° 33' 358"	32° 51' 556"	3 133	海北州西海镇
14-250	四川省若尔盖县红星乡	102° 46' 777"	34° 06' 746"	3 139	海北州西海镇
16-335	青海省大通县鸾沟乡上东至沟村	101° 49' 039"	36° 58' 048"	2 980	海北州西海镇
G23	青海省刚察县哈尔盖乡	100°25' 007"	37°14'012"	3 228	海北州西海镇
G9	青海省刚察县伊克乌兰乡	100°5' 025"	37°19'010"	3 365	海北州西海镇
青牧 1 号	青海省畜牧兽医科学院	—	—	审定登记品种	海北州西海镇
川草 1 号	四川省草业科学研究院	—	—	审定登记品种	海北州西海镇

果,从第1次结果的3个分组中各随机筛选2份材料进行盆栽验证。采用2因素随机区组设计,A因素为6份材料,B因素为干旱胁迫,对照为正常浇水,重复3次,共计36盆。在花盆中装入混合均匀的大田土和营养土(3:1),大田土速效N含量24.2 mg/kg,速效P( $P_2O_5$ )13.43 mg/kg,速效钾( $K_2O$ )110.32 mg/kg,pH为8.4;营养土 $N+P_2O_5+K_2O \geq 5\%$ ,有机质大于等于45%。在温室大棚中进行培养,出苗10 d后进行间苗,每盆留10株幼苗,对照组正常浇水,相对含水量控制在60%~70%;处理组停止浇水。处理14 d后进行各指标的测定。

### 1.3 测定指标

株高测定植株自然高度。叶片相对含水量采用饱和称重法<sup>[11]</sup>,干物质积累量:杀青后80℃烘干称重<sup>[12]</sup>,叶面积用叶面积成像仪测定,根长用根系扫描仪测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法、游离脯氨酸(Pro)含量采用酸性茚三酮比色法、可溶性糖(SS)含量采用蒽酮比色法、叶绿素含量用SPAD502叶绿素含量测定仪、过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法、超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法<sup>[13]</sup>测定。根冠比=(根系干重/地上部分干重)×100%。叶绿素荧光指标用LI-6800便携式光合仪测定,具体如下: $F_v/F_m$ 测定,植物暗适应一晚上后,选择长势一致的植株进行测定,每个处理3次重复,饱和脉冲光设为8000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,等荧光参数稳定后读取数值; $F_v'/F_m'$ 测定,之后将同一叶片在目标光强下适应30 min后,采用多项饱和闪光测量光适应叶片的荧光参数。然后计算最大光化学效率,非光化学淬灭系数,光化学淬灭系数和表观电子传递效率。

### 1.4 抗旱性评价指标

抗旱系数: $X=Y_d/Y_c$ ;  $Y_d$ 为某一指标在干旱胁迫下的测定值, $Y_c$ 为对照测定值<sup>[14]</sup>。

$$\text{抗旱隶属值: } A = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$A = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: $A$ 是各材料某一指标抗旱隶属值, $X$ 是各材料某一指标抗旱系数, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 是所有材料中某一指标抗旱系数的最小值和最大值,除丙二醛用(2)式,其余指标均用(1)式。分别求各材料所有指标隶属值的平均值,用其评价各材料的抗旱性<sup>[15]</sup>。

变异系数的大小反映了不同性状不同材料之间的差异,干旱胁迫下,植物的各指标肯定会发生相应变

化,变异系数变化越大的指标对干旱胁迫的敏感性就越强。为权衡各指标的变异系数变化幅度,引入干旱变异指数<sup>[12]</sup>,用处理组的对照组的变异系数差值除以均值进行同度量处理,计算公式如下:

$$\text{干旱变异指数: } VI_d = |CV_d - CV_c| / [(CV_d + CV_c) / 2]$$

式中: $CV_d$ 是干旱胁迫下所有材料某一指标的变异系数, $CV_c$ 对照组所有材料某一指标的变异系数。

## 1.5 统计分析

用Excel 2016进行数据统计与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 抗旱品种筛选

2.1.1 第1次砂培试验 对25份材料进行PEG模拟干旱试验,并对可溶性糖、脯氨酸和丙二醛等指标的抗旱隶属值进行分析(表2)。

所测指标:可溶性糖、脯氨酸、丙二醛、干物质积累、株高、超氧化物歧化酶和过氧化物酶对应抗旱隶属值最大的材料是09-089、14-250、09-249、14-250、09-118、09-035和川草1号。供试材料的抗旱隶属值均值为0.460,将隶属值大于0.560的10-124、14-250、16-335、09-118、G23和09-035归为抗旱材料;将抗旱隶属值在0.360~0.560的14-234、09-110、川草1号、09-089、09-249、09-129、09-150、09-053、G9、13-306、13-360和10-5归为中等抗旱材料;将抗旱隶属值小于0.360的1-1-4-2、09-210、09-149、1-1-5-13、青牧1号、13-364和14-004归为不抗旱材料(表2)。

2.1.2 第2次盆栽试验 对6份材料进行盆栽模拟干旱胁迫试验,并对叶片相对含水量、叶面积和株高等13个指标的抗旱隶属值进行分析(表3)。

14-250叶片相对含水量、叶面积、株高、根长、丙二醛、干物质积累、根冠比、叶绿素、净光合速率、最大光化学效率、非光化学淬灭系数、光化学淬灭系数和表观电子传递效率的抗旱隶属值最大;10-124叶面积、株高、根长、丙二醛、干物质积累、根冠比、叶绿素、净光合速率、最大光化学效率、非光化学淬灭系数、光化学淬灭系数的抗旱隶属值最大。供试材料的抗旱隶属值均值为0.515,将抗旱隶属值大于0.615的10-124和14-250归为抗旱材料;将抗旱隶属值在0.415~0.615的09-129和09-150归为中等抗旱材料;将抗旱隶属值小于0.415的09-149和14-004归为不抗旱材料。两次

表 2 第 1 次砂培试验供试材料抗旱隶属值

Table 2 Drought membership value of the tested materials in the first sand experiment

供试材料	抗旱隶属值							
	可溶性糖含量	脯氨酸含量	丙二醛含量	干物质积累	株高	超氧化物歧化酶含量	过氧化物酶含量	隶属值均值
09-035	0.445	0.536	0.903	0.497	0.657	1.000	0.026	0.581
09-053	0.218	0.098	0.782	0.510	0.861	0.543	0.164	0.454
09-089	1.000	0.151	0.774	0.281	0.484	0.304	0.447	0.492
09-110	0.339	0.561	0.508	0.778	0.978	0.459	0.158	0.540
09-118	0.655	0.058	0.652	0.490	1.000	0.740	0.686	0.612
09-129	0.209	0.335	0.711	0.804	0.329	0.059	0.742	0.456
09-149	0.522	0.000	0.714	0.431	0.291	0.175	0.091	0.318
09-150	0.342	0.412	0.694	0.686	0.095	0.744	0.217	0.456
09-210	0.473	0.120	0.351	0.497	0.598	0.082	0.314	0.348
09-249	0.729	0.279	1.000	0.425	0.330	0.306	0.161	0.461
10-124	0.753	0.591	0.846	0.810	0.753	0.710	0.341	0.686
10-005	0.128	0.246	0.243	0.412	0.471	0.387	0.803	0.384
1-1-4-2	0.244	0.151	0.669	0.314	0.454	0.328	0.305	0.352
1-1-5-13	0.171	0.089	0.745	0.471	0.497	0.238	0.000	0.316
13-306	0.411	0.664	0.650	0.425	0.268	0.247	0.368	0.433
13-360	0.220	0.226	0.808	0.667	0.582	0.288	0.198	0.427
13-364	0.297	0.089	0.021	0.359	0.491	0.000	0.456	0.245
14-004	0.337	0.104	0.310	0.216	0.343	0.060	0.142	0.216
14-234	0.690	0.559	0.723	0.556	0.415	0.799	0.096	0.548
14-250	0.886	1.000	0.369	1.000	0.719	0.506	0.226	0.672
16-335	0.750	0.482	0.898	0.601	0.706	0.649	0.584	0.667
G23	0.696	0.024	0.962	0.647	0.753	0.366	0.657	0.586
G9	0.366	0.024	0.677	0.588	0.783	0.213	0.485	0.448
青牧 1 号	0.256	0.462	0.492	0.275	0.000	0.232	0.217	0.276
川草 1 号	0.000	0.324	0.800	0.667	0.354	0.491	1.000	0.519
平均值	0.445	0.303	0.652	0.536	0.528	0.397	0.355	0.460

表 3 第 2 次盆栽试验供试材料抗旱隶属值

Table 3 Drought membership value of the tested materials in the secondpot experiment

测定指标	抗旱隶属值						
	09-129	09-149	09-150	10-124	14-004	14-250	平均值
叶片相对含水量	0.245	0.234	0.608	0.917	0.000	1.000	0.501
叶面积	0.656	0.401	0.513	1.000	0.000	0.932	0.584
株高	0.368	0.000	0.306	1.000	0.036	0.446	0.359
根长	0.707	0.182	0.806	0.963	0.000	1.000	0.610
丙二醛含量	0.494	0.059	0.622	1.000	0.000	0.908	0.514
干物质积累	0.637	0.000	0.409	1.000	0.435	0.791	0.545
根冠比	0.614	0.198	0.525	0.983	0.000	1.000	0.553
叶绿素含量	0.521	0.445	0.598	0.758	0.423	0.639	0.564
净光合速率	0.289	0.000	0.547	0.673	0.131	1.000	0.440
最大光化学效率	0.263	0.010	0.447	0.910	0.000	1.000	0.438
非光化学猝灭系数	0.616	0.314	0.641	1.000	0.000	0.778	0.558
光化学淬灭系数	0.334	0.270	0.638	1.000	0.000	0.665	0.485
表观电子传递效率	0.822	0.000	0.278	0.660	0.488	1.000	0.541
隶属值均值	0.505	0.163	0.534	0.913	0.116	0.858	0.515

筛选结果一致(表 3)。

## 2.2 抗旱指标筛选和评价

对两次抗旱筛选的形态及生理指标进行分析,发现不同材料各指标的对照组和处理组的变异系数均有变化,为衡量这种变化,引入干旱变异指数(表 4)。将

干旱变异指数大于 30% 的指标定义为干旱敏感指标。第 1 次筛选的敏感指标为脯氨酸和丙二醛,第 2 次筛选的指标为叶面积、根长、丙二醛、根冠比、叶绿素、净光合速率、最大光化学效率、光化学淬灭系数和表观电子传递效率。

表 4 两次干旱模拟试验中供试指标干旱变异指数

Table 4 Drought variability index of test indicators in two drought simulation experiments

试验	供试指标	对照		干旱胁迫		干旱变异指数
		平均值	变异系数/%	平均值	变异系数/%	
第 1 次水培	可溶性糖含量/(mg · g <sup>-1</sup> )	9.403	24.355	13.020	21.978	10.260
	脯氨酸含量/(μg · g <sup>-1</sup> )	84.571	23.056	346.151	47.396	69.098
	丙二醛含量/(μmo · g <sup>-1</sup> )	31.506	11.171	48.060	15.283	31.082
	干物质积累/(g · 钵 <sup>-1</sup> )	1.923	4.172	0.891	4.765	13.270
	株高/cm	14.269	10.488	11.524	12.542	17.834
	超氧化物歧化酶活性/(U · min <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup> )	273.349	7.276	396.236	9.648	28.028
	过氧化物酶活性/(U · min <sup>-1</sup> · g <sup>-1</sup> )	491.305	15.248	644.422	17.173	11.872
第 2 次盆栽	叶片相对含水量/%	90.966	1.565	77.573	1.870	17.736
	叶面积/cm <sup>2</sup>	8.365	6.657	3.988	18.858	95.642
	株高/cm	24.239	11.658	13.672	13.151	12.035
	根长/cm	8.767	6.107	7.133	12.114	65.926
	丙二醛含量/(μmol · g <sup>-1</sup> )	32.653	10.154	46.082	19.618	63.577
	干物质积累/(g · 盆 <sup>-1</sup> )	1.107	10.844	0.483	13.063	18.566
	根冠比/%	19.451	7.052	25.681	11.790	50.300
	叶绿素含量(SPAD)	25.781	10.618	14.322	16.018	40.551
	净光合速率/(μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	9.486	6.908	5.276	34.564	133.370
	最大光化学效率	0.795	1.054	0.665	9.537	160.19
	非光化学淬灭系数	1.191	4.452	0.759	5.214	15.775
	光化学淬灭系数	0.486	3.813	0.359	8.231	73.352
表观电子传递效率	61.474	3.565	35.723	5.638	45.057	

## 3 讨论

### 3.1 抗旱材料筛选

植物抗旱性受到多种外界因素影响以及多种生理机制调控<sup>[16]</sup>,因此评价抗旱性需要综合多种指标进行综合性评价。康桂兰<sup>[17]</sup>通过研究干旱胁迫后 9 种冰草属牧草细胞相对含水量和相对电导率的变化筛选耐旱牧草。李京蓉等<sup>[8]</sup>测定了 6 种高寒牧区牧草干旱胁迫后叶片相对含水量,丙二醛、可溶性糖和叶绿素含量,从而评价它们的抗旱性<sup>[18]</sup>。此外,脯氨酸含量,抗氧化酶活性和叶绿素荧光参数等指标同样被用来评价禾本科牧草的抗旱性<sup>[19-20]</sup>。但是,这些研究基本只进行了一次试验,没有对结果进行进一步的验证。本试验从第 1 次 PEG 6000 模拟干旱胁迫试验筛选的抗旱材料、中等抗旱材料和不抗旱材料中分别选取了两份材料,进行盆栽试验验证,两次试验所用指标存在一定

差异,但试验结果一致,增加了试验的可靠性,同时也进一步说明老芒麦抗旱性是一个复杂的性状,不能用单一指标简单评价。

### 3.2 抗旱指标筛选

从 2 次试验的干旱变异指数可知,形态指标上叶面积、根长和根冠比对于干旱胁迫较为敏感,这可能是由于根系是供给植物水分的器官,对干旱的响应更为敏感,此时地上部分的水分运输受到阻碍,加上蒸腾作用,叶片大量失水,植株体内膨压降低,叶片扩展受阻,甚至萎蔫干枯,导致叶面积、根长和根冠比的干旱变异系数较大<sup>[15]</sup>。对于牧草来说,干物质积累是其产量的直接体现,综合两次试验结果来看,干物质积累的干旱变异指数相对其他指标较小,这可能是由于干物质积累是多性状的综合体现。研究表明,植物抗旱性和产量都是有数量性状位点控制的,在进行抗旱育种时需对两个系统进行综合考虑,筛选抗旱评价指标时更应

该注重指标对干旱的敏感性,而不是侧重于产量潜力<sup>[21-22]</sup>。因此,在进行老芒麦苗期抗旱材料大批量筛选时,选择对干旱更为敏感的根系特征、叶面积和生理指标更有利于试验的开展。

长期干旱胁迫导致植物体内活性氧的产生和清除失衡<sup>[23]</sup>,从而导致植物体内积累大量的活性氧,过多的活性氧会破坏细胞膜的完整性,并使膜蛋白产生二次损伤<sup>[11]</sup>,丙二醛是脂质过氧化产物之一,它的含量可以反映逆境胁迫下植物体内细胞受损程度。抗氧化酶在维持植物体内活性氧的平衡中起决定性作用<sup>[24]</sup>。本研究中,丙二醛的干旱变异指数大于超氧化物歧化酶和过氧化物酶,因此可以用丙二醛来评价老芒麦的抗旱性。

脯氨酸作为渗透调节物质调控细胞的渗透势,使细胞免受活性氧毒害作用保证细胞的正常功能<sup>[25]</sup>,但是干旱胁迫下,不同植物体内脯氨酸的变化趋势并不一致,因此其与植物的抗旱性有无必然联系存在一定争议<sup>[26]</sup>。本研究发现,干旱胁迫下,不同材料叶片内的脯氨酸含量均有所增加,这与前人在老芒麦上的研究一致<sup>[10,14]</sup>,综合来看,需在较强较长时间的干旱胁迫前提下把脯氨酸作为抗旱性评价指标。

干旱胁迫导致植物光合色素含量减少,类囊体膜结构受损,从而降低植物光合能力。因此,选择与植物光合作用相关指标可以有效反应植物的抗旱性。本试验发现,叶绿素、净光合速率、最大光化学效率、光化学淬灭系数和表观电子传递效率的干旱变异指数较大,说明这些指标对干旱较敏感,可以用作老芒麦抗旱性评价指标,这与田山君的研究一致<sup>[12]</sup>。

## 4 结论

10-124、14-250、16-335、09-118、G23 和 09-035 在干旱模拟试验中表现良好,被归为抗旱材料,是青藏高原牧草育种与栽培的首选材料。对多个抗旱指标进行分析,其中叶面积、根冠比、根长、丙二醛、脯氨酸、叶绿素、净光合速率、最大光化学效率、光化学淬灭系数和表观电子传递效率对干旱胁迫较为敏感,可作为老芒麦苗期抗旱性评价指标。

### 参考文献:

[1] 陈焱,南志标.不同储存年限老芒麦种子种带真菌检测及致病性测定[J].草业学报,2015,24(2):96-103.  
[2] 张俊超,谢文刚,赵旭红,等.老芒麦种子离区酶活变化及

组织学分析[J].草业学报,2018,27(7):84-92.

- [3] Wengang Xie, Xuhong Zhao, Jianquan Zhang, et al. Assessment of genetic diversity of Siberian wild rye(*Elymus sibiricus* L.) germplasms with variation of seed shattering and implication for future genetic improvement[J]. Biochemical Systematics & Ecology, 2015, 58: 211-218.  
[4] 王明亚.施氮对老芒麦种子产量及产量因子的作用[D].北京:中国农业大学,2018.  
[5] 闫志勇.青藏高原披碱草属牧草农艺性状及生产性能评价[D].西宁:青海大学,2013.  
[6] Mirza Hasanuzzaman, Masayuki Fujita. Selenium Pretreatment Upregulates the Antioxidant Defense and Methylglyoxal Detoxification System and Confers Enhanced Tolerance to Drought Stress in Rapeseed Seedlings[J]. Biological Trace Element Research, 2011, 143(3): 1758-1776.  
[7] WANG W. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. Planta, 2003, 218.  
[8] 杨伟,刘文辉,马祥,等.干旱胁迫对 2 种不同抗旱性老芒麦幼苗 ROS 积累及抗氧化系统的影响[J].草地学报, 2020, 28(3): 684-693.  
[9] 张卫红,刘大林,苗彦军,等.西藏 3 种野生牧草苗期对干旱胁迫的响应[J].生态学报,2017,37(21):7277-7285.  
[10] 孙清洋.老芒麦萌发和幼苗生长对两种渗透胁迫的不同响应[D].北京:中国农业科学院,2016.  
[11] 牛奎举.外源 5-氨基乙酰丙酸对干旱胁迫下草地早熟禾光合作用的调控机制[D].兰州:甘肃农业大学,2018.  
[12] 田山君,杨世民,孔凡磊,等.西南地区玉米苗期抗旱品种筛选[J].草业学报,2014,23(1):50-57.  
[13] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.  
[14] 祁娟,徐柱,王海清,等.披碱草与老芒麦苗期抗旱性综合评价[J].草地学报,2009,17(1):36-42.  
[15] 王平,王沛,孙万斌,等.8 份披碱草属牧草苗期抗旱性综合评价[J].草地学报,2020,28(2):397-404.  
[16] 李怡,侯向阳,武自念,等.羊草种质资源抗旱性综合评价[J].中国草地学报,2019,41(1):75-82.  
[17] 康桂兰.9 种冰草属牧草抗旱性评价[J].天津农业科学, 2012, 18(5): 153-155.  
[18] 李京蓉,张春辉,马丽,等.6 种高寒牧区禾本科牧草抗旱性研究与评价[J].草地学报,2018,26(3):659-665.  
[19] 张小娇,祁娟,曹文侠,等.干旱胁迫下垂穗披碱草苗期抗旱生理特性的影响[J].草原与草坪,2014,34(5):55-49..

- [20] 曹丽, 回振龙, 魏小红, 等. SNP 对 PEG 模拟干旱胁迫下早熟禾种子萌发及幼苗抗性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(5): 100-106.
- [21] 黎裕, 王天宇, 刘成, 等. 玉米抗旱品种的筛选指标研究[J]. 植物遗传资源学报, 2004, (3): 210-215.
- [22] 黎裕, 王天宇, 石云素, 等. 应用生理学方法和分子手段进行玉米抗旱育种[J]. 玉米科学, 2004, 12(2): 16-20.
- [23] Kamrun Nahar, Mirza Hasanuzzaman, Md. Mahabub Alam, *et al.* Insights into spermine-induced combined high temperature and drought tolerance in mung bean; osmoregulation and roles of antioxidant and glyoxalase system[J]. Protoplasma, 2017, 254(1): 445-460.
- [24] Sarvajeet Singh Gill, Narendra Tuteja. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiol Biochem, 2010, 48(12): 909-930.
- [25] 吴旭红, 冯晶旻. 外源亚精胺对 PEG 胁迫下燕麦幼苗生长及部分生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, (1): 122-129.
- [26] 韩金龙, 王同燕, 徐子利, 等. 玉米抗旱机理及抗旱性鉴定指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 152-156.

## Screening of drought-resistant germplasm at seedling stage of *Elymus sibiricus* originated from Qinghai-Tibet Plateau

YANG Wei<sup>1</sup>, LIU Wen-hui<sup>2</sup>, MA Xiang<sup>2</sup>, JIA Zhi-feng<sup>2</sup>, MA Hui-ling<sup>1</sup>,  
ZHANG Yong-chao<sup>2</sup>, LIU Min-jie<sup>2</sup>

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, China;

2. Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau/Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary medicine, Xining 810016, China)

**Abstract:** The *Elymus sibiricus* with strong drought resistance was selected for forage cultivation and breeding in Qinghai-Tibet Plateau. In this study, 25 *Elymus sibiricus* germplasm collected from different areas of Qinghai-Tibet Plateau were exposed to simulated drought stress in sand culture. The membership function method was used to evaluate the drought resistance of each germplasm, and the drought variation index was introduced to screen the drought resistance evaluation index of *Elymus sibiricus*. The results of two screening experiments were similar, of which 10-124, 14-250, 16-335, 09-118, G23 and 09-035 were classified as drought-resistant materials, 14-234, 09-110, Chuancao1, 09-089, 09-249, 09-129, 09-150, 09-053, G9, 13-306, 13-360 and 10-005 were classified as medium drought-resistant materials, while 1-1-4-2, 09-210, 09-149, 1-1-5-13, Qingmu1, 13-364 and 14-004 were classified as drought-sensitive materials. Leaf area, root:shoot ratio, root length, malondialdehyde, proline, chlorophyll, net photosynthetic rate, maximum photochemical efficiency, photochemical quenching coefficient and apparent electron transfer efficiency had relatively large variation, and they could be used as the basis for the selection of drought-resistant germplasm of *Elymus sibiricus* in the Qinghai-Tibet Plateau. Our study found that six germplasm, including 10-124, 14-250, 16-335, 09-118, G23 and 09-035, had strong drought resistance, which could be used as the preferred materials for forage cultivation and breeding in Qinghai-Tibet Plateau. Furthermore, leaf area, root:shoot ratio and root length were sensitive to drought stress, which could be used as evaluation indexes for drought resistance of *Elymus sibiricus*.

**Key words:** *Elymus sibiricus*; drought stress; drought resistance screening; membership function method; drought variation index