

3 个小黑麦品种苗期抗旱性评价

王伟强, 田新会, 杜文华

(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)

摘要:为筛选适宜于干旱半干旱地区种植的饲用型小黑麦品种,以甘农4号(A₁)、石大1号(A₂)和中饲1048(A₃)为试验材料,采用防雨棚隔雨法,研究了3个品种在不同干旱胁迫天数(7,14,21,28,35和42 d)下的生理生化指标脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)、叶绿素(Chl)、丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。从单因素看,A₁在不同干旱胁迫天数下的平均相对Pro含量显著低于A₃,与A₂无显著差异;相对SP和Chl含量,SOD和CAT活性略低于A₂和A₃;相对SS含量和POD活性高于A₂和A₃,但无显著差异;随着干旱胁迫时间的延长,3个品种的平均相对Pro和SS含量,相对SOD和CAT活性呈先增加后降低的趋势,平均相对SP和MDA含量及POD活性逐渐增加,相对Chl含量呈下降趋势。小黑麦品种×干旱胁迫天数的交互作用表明,A₁在中度干旱(28 d)时,相对SOD活性高于A₂和A₃,相对CAT活性低于A₂和A₃;重度干旱(35 d)时,A₁相对Pro含量显著低于A₃,高于A₂,相对SS含量显著高于A₂;重度干旱(42 d)时,相对SP和MDA含量低于A₂和A₃。综合评价表明,小黑麦品种苗期抗旱性强弱顺序为:A₃>A₂>A₁。

关键词:小黑麦;干旱胁迫;适应性

中图分类号:S512.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)02-0098-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.02.014



干旱是制约中国可持续发展尤其是农业发展的主要障碍之一^[1]。它是影响中国农业最为严重的气象灾害,造成的损失也相当严重^[2]。干旱对植物的危害主要体现在使其水分丧失,导致植物细胞内外渗透失衡,进而影响植物正常的生命活动^[3]。

小黑麦(*×Triticosecale*)为一年生禾本科植物,是黑麦(*Secale*)和小麦(*Triticum*)经属间有性杂交和染色体加倍繁育而成的新物种,它不仅表现出小麦的丰产性和籽粒饱满的优良品质,还保持了黑麦抗逆性强

的特点,是一种性状优良的粮饲兼用型作物^[4]。甘肃地处青藏、蒙新和黄土高原交汇地带,分属黄河、长江、内陆河3大流域,东南远离海洋,西北紧靠世界屋脊,有着特殊的地理位置,地形地貌复杂多样,气候干燥,降水量稀少,农业发展受到严重制约^[5]。因此,筛选抗旱、稳产、高效的饲草作物及品种,是当前农业结构调整中亟待解决的问题。

目前国内有关植物抗旱性的研究主要集中在形态学、产量、农艺性状及生理生化指标方面,如株高、根系、叶片形态、产量、水分生理、光合速率、气孔导度、Pro,SS,SP,Chl,MDA含量、SOD,POD和CAT活性等,生理生化指标的变化可以反映植物对干旱胁迫适应的程度,并最终决定饲草的产量。魏添梅等^[6]研究表明,在旱地条件下,小麦(*Triticum aestivum*)的株高与干旱程度显著相关。顾亚峰等^[7]试验表明,前期的干旱可降低春小麦地上、地下部干重和单株叶面积,影响灌浆期旗叶同化产物的分配。当水分胁迫解除后,根系的干物重累计迅速增加。任丽花等^[8]研究表明,

收稿日期:2021-09-26; **修回日期:**2021-12-27

基金项目:甘肃省草地畜牧业可持续发展创新团队项目(2017C-11);国家重点研发计划(2018YFD0502402-3);西藏饲草产业专项(XZ201801NA02,XZ201901NA03)

作者简介:王伟强(1994-),男,甘肃甘谷人,硕士研究生。

E-mail:1466941912@qq.com

杜文华为通信作者。

E-mail:duwh@gsau.edu.cn

在中度、重度和极度干旱的情况下植物叶片细胞中线粒体内外膜破裂,叶绿体膜断裂。陈彩虹等^[9]研究表明在各生育期,不同程度干旱都会影响水稻的产量。任丽花等^[10]结果表明,随着土壤干旱胁迫梯度的增加,植物叶片相对含水量、叶片失水率、净光合速率以及 Chl 含量均呈下降趋势。王金玲^[11]试验表明,Pro 的积累能力与抗旱性呈正相关,随着胁迫时间的延长,抗旱性强的小黑麦 Pro 含量积累高。常丽等^[12]试验表明,干旱胁迫下可促进 SS、SP 的积累。曾晓琳等^[13]研究表明随着干旱程度增加结缕草(*Zoysia japonica*)的 MDA 含量、SOD、POD 和 CAT 活性显著增强。甘农 4 号小黑麦为 2019 年青海省审定的小黑麦品种,但截至目前,有关其抗旱性研究方面的报道较少。本试验采用防雨棚隔雨法模拟干旱胁迫,研究了不同干旱胁迫天数下不同小黑麦品种叶片的生理生化指标的变化,并结合隶属函数法对其苗期抗旱性进行评价,以确定其抗旱性。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在甘肃农业大学(N 36°03', E 103°53', 海拔 1 580 m)育种温室内进行,年均温 9.0 ℃,年均降水量 350 mm,降水主要集中在 6—8 月,无霜期 153 d,年均降水量 1 665 mm,试验区有灌溉条件,土壤类型为黄绵土。

1.2 试验材料

参试小黑麦品种为甘肃农业大学培育的甘农 4 号,石河子大学培育的石大 1 号,中国农业科学院作物研究所培育的中饲 1048。

1.3 试验设计

本试验采用裂区设计,主区为干旱胁迫时间,设 7 个水平(0, 7, 14, 21, 28, 35 和 42 d);副区为小黑麦品种,设 3 个水平,分别为甘农 4 号(A₁),石大 1 号(A₂),中饲 1048(A₃)。挑选籽粒饱满无痕,大小均匀的小黑麦种子为播种材料,播种前在试验地 0.5 m 深处铺双层防水塑料布,试验小区的面积为 3 m×5 m,每个小黑麦品种分别种 3 行(行长 2 m),点播,株距 5 cm,行距 20 cm,播种深度 4~5 cm。播种前和出苗期施氮 50 kg/hm²,并及时人工清除杂草。出苗期前灌水,在灌水后的 0, 7, 14, 21, 28, 35 和 42 d 采集叶片,测定叶片的生理指标。每个对照品种种于相邻的试验

地,进行正常灌水。试验期间及时人工除草。播种时间为 2020 年 8 月 25 日。

1.4 测定项目与方法

田间持水量采用环刀法测定。土壤含水量采用烘干称重法测定。生理生化指标的测定,脯氨酸(Pro)含量:采用茚三酮比色法测定;可溶性糖(SS)含量:采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白(SP)含量:采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定;叶绿素含量(Chl)含量:采用 95%乙醇法测定;丙二醛(MDA)含量:采用硫代巴比妥酸法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性:采用氮蓝四唑光化还原法测定;过氧化物酶(POD)活性:采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(CAT)活性:采用 KMnO₄ 滴定法测定^[14];以上指标测定均 3 次重复。

1.5 数据统计

运用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理及作图,利用 SPSS 19.0 进行差异显著性分析。如果差异显著,则分别利用 Duncan 法进行多重比较。试验结果以“平均数±标准误”表示。用隶属函数法对各参试的小黑麦品种的抗旱性进行综合评价。

1.6 生理生化指标相对值的计算

由于各项生理生化指标的差异和自身遗传特性带来的影响,本试验将采用各生理生化指标的相对值来计算,计算公式如下:

$$\text{某一指标的相对值} = \frac{X_d}{X_w}$$

式中, X_d 代表干旱处理生理生化值, X_w 代表对照处理生理生化值^[15]。

1.7 综合评价

在模糊的数学当中,1 个评估因子指标的测量值属于某一级别的程度称为隶属度,隶属度是介于 0 和 1 之间的值。数值越接近 1,隶属于这一级别程度越大。每个评估因子指标的测量值对应 1 个隶属度,这种对应关系称为隶属函数。隶属函数值法的计算公式如下:

$$u(X_j) = \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}$$

MDA 的增加,破坏了细胞膜的选择性。通常来讲,MDA 的增加认为是植物不抗旱的表现。所以,相对 MDA 含量的隶属函数值法的计算公式如下:

$$u(X_j) = \frac{X_{j\max} - X_j}{X_{j\max} - X_{j\min}}$$

式中, X_j 表示各品种第 j 个生理生化指标的相对值; $X_{j\min}$ 表示各品种 j 生理生化指标相对值的最小值; $X_{j\max}$ 表示各品种 j 生理生化指标相对值的最大值。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量

本试验测得田间持水量为 25.93%, 土壤体积含水量占田间持水量 80% 以上时为正常水平, 50%~70% 为轻度干旱, 30%~50% 为中度干旱, 低于 30%

为重度干旱^[16](表 1)。

2.2 小黑麦品种间、干旱胁迫天数间及品种×干旱胁迫天数交互作用间生理生化指标相对值的方差分析

除相对 Pro 含量外, 品种间相对 SS, SP, Chl, MDA 含量及相对 SOD, POD 和 CAT 活性均无显著差异($P>0.05$)(表 2)。干旱胁迫天数及品种×干旱胁迫天数间除相对 SP 含量无显著差异外, 其余生理生化指标的相对值均存在极显著差异($P<0.01$), 需对上述存在显著差异的指标进行多重比较。

表 1 不同干旱胁迫天数下土壤相对含水量及干旱程度

Table 1 Relative soil water content and drought degree under different drought stress days

土壤深度/cm	干旱胁迫天数/d						
	0	7	14	21	28	35	42
0~20	83.61%	78.21%	60.43%	43.23%	34.05%	21.37%	16.47%
干旱程度	正常水份	轻度干旱		中度干旱		重度干旱	

2.3 小黑麦品种间生理生化指标相对值的差异

3 个小黑麦品种, A_1 在不同干旱胁迫下叶片的平均相对 SS, SP, Chl 和 MDA 含量及相对 SOD, POD 和

CAT 活性与 A_2 和 A_3 品种无显著差异($P>0.05$); 相对 Pro 含量显著低于 A_3 ($P<0.05$), 与 A_2 无显著差异($P>0.05$)(表 3)。

表 2 干旱胁迫下小黑麦各生理生化指标相对值的方差分析

Table 2 Variance analysis of relative physiological and biochemical indexes of triticale under drought stress

变异来源	F 值							
	相对 Pro 含量	相对 SS 含量	相对 SP 含量	相对 Chl 含量	相对 MDA 含量	相对 SOD 活性	相对 POD 活性	相对 CAT 活性
小黑麦品种间	4.47*	1.03 ^{NS}	1.23 ^{NS}	0.49 ^{NS}	2.21 ^{NS}	0.86 ^{NS}	1.27 ^{NS}	1.19 ^{NS}
干旱胁迫天数间	9.19**	28.61**	3.91**	14.34**	19.42**	6.44**	18.68**	42.98**
小黑麦品种×干旱胁迫天数	17.22**	15.47**	1.91 ^{NS}	7.14**	8.49**	3.47**	10.47**	40.11**

注: * 表示差异显著($P<0.05$); ** 表示差异极显著($P<0.01$); NS 表示差异不显著。下同

表 3 小黑麦品种间生理生化指标相对值

Table 3 The relative physiological biochemical indexes among triticale varieties

生理生化指标相对值	小黑麦品种		
	A_1	A_2	A_3
相对 Pro 含量	1.23±0.05 ^b	1.27±0.07 ^b	1.46±0.06 ^a
相对 SS 含量	1.19±0.06 ^a	1.08±0.05 ^a	1.12±0.06 ^a
相对 SP 含量	1.06±0.02 ^a	1.11±0.02 ^a	1.08±0.03 ^a
相对 Chl 含量	0.94±0.03 ^a	0.98±0.06 ^a	1.00±0.05 ^a
相对 MDA 含量	1.17±0.09 ^a	1.36±0.08 ^a	1.11±0.10 ^a
相对 SOD 活性	1.10±0.04 ^a	1.02±0.04 ^a	1.07±0.04 ^a
相对 POD 活性	1.33±0.10 ^a	1.43±0.10 ^a	1.55±0.10 ^a
相对 CAT 活性	1.01±0.04 ^a	1.11±0.05 ^a	1.02±0.06 ^a

注: 表中同列不同小写字母差异显著($P<0.05$)。

2.4 干旱胁迫天数间小黑麦生理生化指标相对值的差异

随着干旱胁迫时间的增加,3 个小黑麦品种叶片相对 Pro,SS 含量和相对 SOD 活性有上升趋势,重度干旱(35 d)时达到最大,之后开始下降;相对 CAT 活

性有上升趋势,中度干旱(28 d)时达到最大,之后开始下降;相对 SP,MDA 含量和相对 POD 活性均呈上升趋势,干旱胁迫到 42 d(重度干旱)时达到最大;相对 Chl 含量呈下降趋势,干旱胁迫 7 d(轻度干旱)时达到最大(表 4)。

表 4 干旱胁迫天数间小黑麦叶片生理生化指标相对值

Table 4 The relative physiological biochemical indexes of triticale leaves among drought stress days

生理生化指标 相对值	干旱胁迫天数/d					
	7	14	21	28	35	42
相对 Pro 含量	1.10±0.03 ^c	1.33±0.05 ^b	1.47±0.08 ^{ab}	1.39±0.06 ^{ab}	1.57±0.09 ^a	1.05±0.06 ^c
相对 SS 含量	1.05±0.02 ^b	1.06±0.03 ^b	1.12±0.04 ^b	1.17±0.05 ^b	1.52±0.05 ^a	0.87±0.05 ^c
相对 SP 含量	1.01±0.03 ^b	1.05±0.03 ^b	1.06±0.03 ^b	1.04±0.02 ^b	1.15±0.03 ^a	1.16±0.03 ^a
相对 Chl 含量	1.16±0.05 ^a	1.13±0.04 ^{ab}	1.01±0.04 ^{bc}	0.98±0.07 ^c	0.76±0.03 ^d	0.78±0.02 ^d
相对 MDA 含量	0.73±0.08 ^d	1.00±0.07 ^c	1.10±0.07 ^c	1.34±0.09 ^b	1.46±0.06 ^{ab}	1.65±0.08 ^a
相对 SOD 活性	0.99±0.06 ^c	1.08±0.07 ^{ab}	1.07±0.04 ^{ab}	1.20±0.03 ^a	1.16±0.04 ^a	0.88±0.02 ^c
相对 POD 活性	0.98±0.03 ^d	1.37±0.11 ^c	1.33±0.06 ^c	1.18±0.05 ^{cd}	1.72±0.12 ^b	2.02±0.10 ^a
相对 CAT 活性	1.00±0.06 ^c	1.03±0.02 ^c	1.13±0.02 ^b	1.41±0.04 ^a	0.91±0.02 ^d	0.80±0.03 ^e

2.5 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用间生理生化指标相对值的差异

2.5.1 相对 Pro 含量 随着干旱胁迫天数的增长,参试小黑麦材料的相对 Pro 含量呈先上升后下降的趋势。在轻度干旱(7 d)时,A₁的相对 Pro 含量高于 A₂,低于 A₃,但无显著差异($P>0.05$);在轻度干旱(14 d)和中度干旱时,A₁的相对 Pro 含量显著低于 A₂和 A₃($P<0.05$);在重度干旱时,A₁的相对 Pro 含量高于 A₂,显著低于 A₃($P<0.05$)(图 1)。

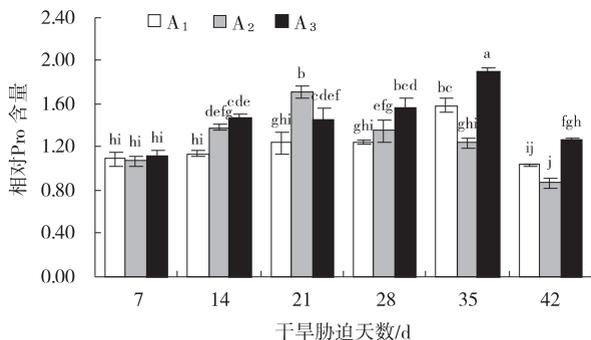


图 1 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用间相对 Pro 含量
Fig. 1 Relative proline between triticale varieties and drought stress days

2.5.2 相对 SS 含量 随着干旱胁迫天数的增长,参试小黑麦品种的相对 SS 含量呈先上升后下降的趋势。在轻度干旱(7 d)时,A₁的相对 SS 含量低于 A₂,高于 A₃,但无显著差异($P>0.05$);在轻度干旱(14 d)和中度干旱时,A₁的相对 SS 含量高于 A₂和 A₃;但无显著

差异($P>0.05$);在重度干旱时,A₁的相对 SS 含量高于 A₂,低于 A₃(图 2)。

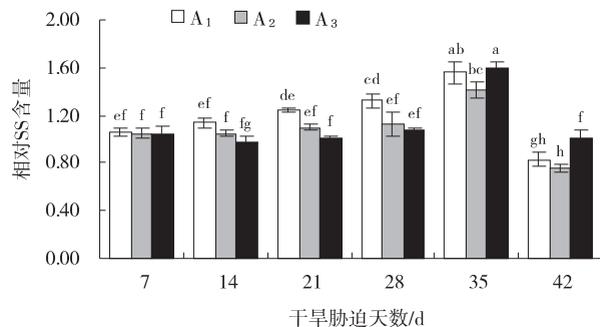


图 2 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用间
相对可溶性糖含量

Fig. 2 Relative soluble sugar between triticale varieties and drought stress days

2.5.3 相对 SP 含量

随着干旱胁迫天数的增长,参试小黑麦材料的相对 SP 含量呈上升趋势。在轻度干旱(7 d)时,A₁的相对 SP 含量低于 A₂和 A₃,但无显著差异($P>0.05$);在轻度干旱(14 d)时,A₁的相对 SP 含量低于 A₂,高于 A₃,但无显著差异($P>0.05$);在中度和重度干旱时,A₁的相对 SP 含量低于 A₂和 A₃,但无显著差异($P>0.05$)(图 3)。

2.5.4 相对 Chl 含量 随着干旱胁迫天数的增长,参试小黑麦材料的相对 Chl 含量呈下降趋势。在轻度干旱(7 d)时,A₁的相对 Chl 含量低于 A₂,高于 A₃,但无

显著差异($P>0.05$);在轻度干旱(14 d)和中度干旱(21 d)时, A_1 的相对 Chl 含量低于 A_2 和 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在中度干旱(28 d)时, A_1 的相对 Chl 含量显著低于 A_3 ($P<0.05$),高于 A_2 ,但无显著差异($P>0.05$);在重度干旱(35 d)时, A_1 的相对 Chl 含量低于 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在重度干旱(42 d)时, A_1 的相对 Chl 含量高于 A_2 和 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$)(图 4)。

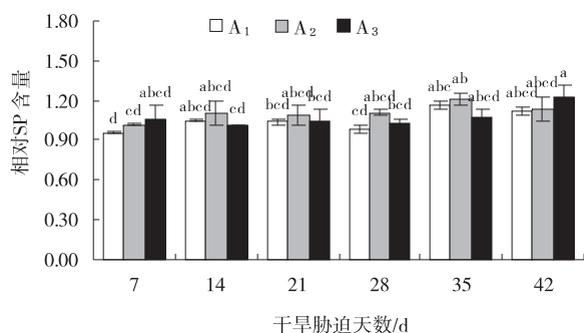


图 3 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用
间相对 SP 含量

Fig. 3 Relative soluble protein between triticale varieties and drought stress days

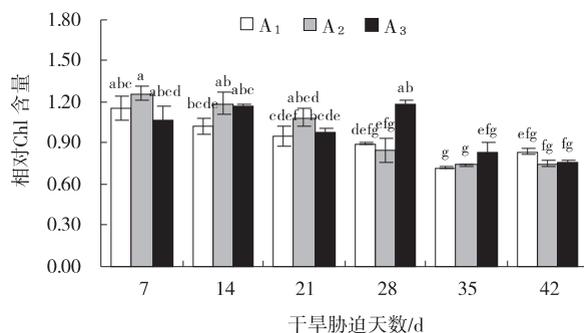


图 4 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用
间相对 Chl 含量

Fig. 4 Relative Chlorophyll between triticale varieties and drought stress days

2.5.5 相对 MDA 含量 随着干旱胁迫天数的增长,参试小黑麦品种相对 MDA 含量呈上升趋势。在轻度干旱(7 d)时, A_1 的相对 MDA 含量低于 A_2 ,高于 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在轻度干旱(14 d)时, A_1 的相对 MDA 含量低于 A_2 和 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在中度干旱(21 d)时, A_1 的相对 MDA 含量低于 A_2 ,高于 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在中度干旱(28 d)时, A_1 的相对 MDA 含量高于 A_2 和 A_3 ,与 A_2 无显著差异($P>0.05$),与 A_3 差异显著($P<0.05$);在重度干旱时, A_1 的相对 MDA 含量低于 A_2 和 A_3 ,但无

显著差异($P>0.05$)(图 5)。

2.5.6 相对 SOD 含活性 随着干旱胁迫天数的增长,参试小黑麦品种的相对 SOD 活性呈先升后降的趋势。在轻度干旱(7 d)时, A_1 的相对 SOD 活性高于 A_2 和 A_3 ,与 A_3 无显著差异($P>0.05$),与 A_2 有显著差异($P<0.05$);在轻度干旱(14 d)时, A_1 的相对 SOD 活性低于 A_2 ,高于 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在中度干旱(21 d)时, A_1 的相对 SOD 活性低于 A_2 和 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在中度干旱(28 d)时, A_1 的相对 SOD 活性高于 A_2 和 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在重度干旱(35d)时, A_1 的相对 SOD 活性高于 A_2 ,低于 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在重度干旱(42 d)时, A_1 的相对 SOD 活性低于 A_2 和 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$)(图 6)。

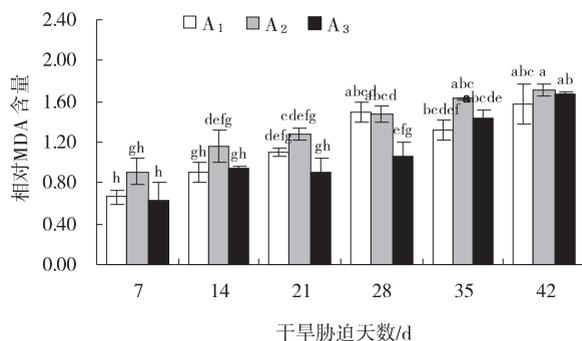


图 5 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用
间相对 MDA 含量

Fig. 5 Relative malondialdehyde between triticale varieties and drought stress days

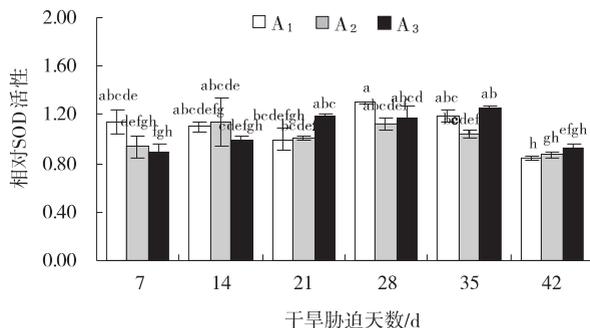


图 6 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用
间相对 SOD 活性

Fig. 6 Differences of relative Superoxide dismutase between triticale varieties and drought stress days

2.5.7 相对 POD 活性 随着干旱胁迫天数的增长,参试小黑麦材料的相对 POD 活性呈上升趋势。在轻度干旱(7 d)时, A_1 的相对 POD 活性高于 A_2 ,低于 A_3 ,但无显著差异($P>0.05$);在轻度干旱(14 d)时,

A₁ 的相对 POD 活性低于 A₂ 和 A₃, 与 A₃ 差异显著 ($P < 0.05$), 与 A₂ 无显著差异 ($P > 0.05$); 在中度干旱时, A₁ 的相对 POD 活性低于 A₂ 和 A₃; 在重度干旱 (35 d) 时, A₁ 的相对 POD 活性低于 A₂ 和 A₃, 与 A₂ 差异显著 ($P < 0.05$), 与 A₃ 无显著差异 ($P > 0.05$); 在重度干旱 (35 d) 时, A₁ 的相对 POD 活性高于 A₂, 低于 A₃, 但无显著差异 ($P > 0.05$) (图 7)。

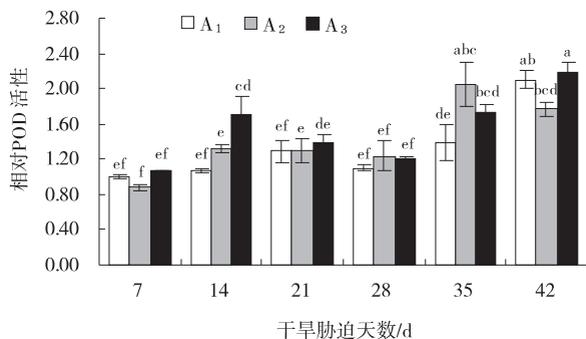


图 7 小黑麦品种 × 干旱胁迫天数交互作用间相对 POD 活性

Fig. 7 Relative peroxidase between triticale varieties and drought stress days

2.5.8 相对 CAT 活性 随着干旱胁迫天数的增长, 参试小黑麦材料的相对 CAT 活性呈先上升后下降的

表 5 不同品种小黑麦隶属函数值及排名

Table 5 Membership function values and rankings of different varieties of triticale

小黑麦品种	$u(X)$								平均隶属值	排名
	Pro	SS	SP	Chl	MDA	SOD	POD	CAT		
A ₁	0.00	1.00	0.00	0.00	0.76	1.00	0.00	0.00	0.35	3
A ₂	0.17	0.00	1.00	0.67	0.00	0.00	0.45	1.00	0.41	2
A ₃	1.00	0.36	0.40	1.00	1.00	0.63	1.00	0.10	0.69	1

3 讨论

3.1 小黑麦品种间抗旱相关性生理生化指标相对值的差异及原因

通过研究不同小黑麦品种在干旱胁迫条件下生理生化指标相对值的变化, 表明环境因子对小黑麦生理特性的影响主要由基因而定。方敏彦等^[17]研究表明, Pro 在植物受到干旱胁迫下会成倍的增加, Pro 在干旱胁迫的积累下能够维持一段时间的植物细胞含水量, 也是植物在干旱胁迫下正常生命活动的一种调控方式。本试验结果表明, A₃ 的相对 Pro 含量较大, 同时, 也表现出较强的抗旱性。小黑麦品种在干旱胁迫 35 d 后相对 Pro 含量有不同程度的下降, 总体表现为 Pro

趋势。在轻度干旱时, A₁ 的相对 CAT 活性低于 A₂, 高于 A₃; 在中度和重度干旱时, A₃ 的相对 CAT 活性低于 A₂ 和 A₃ (图 8)。

2.6 小黑麦苗期抗旱性评价

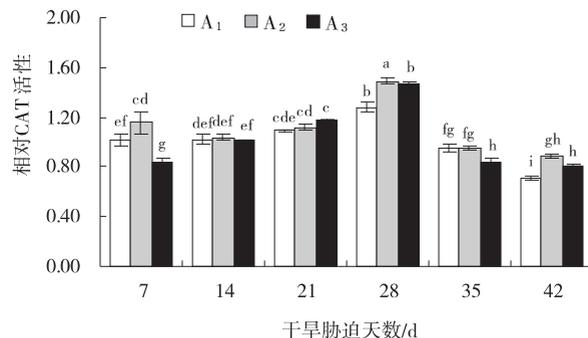


图 8 小黑麦品种 × 干旱胁迫天数交互作用间相对 CAT 活性

Fig. 8 Relative catalase between triticale varieties and drought stress days

采用隶属函数法对 3 个参试小黑麦品种的 8 项生理生化指标的相对值进行隶属函数值的计算, 得出小黑麦品种隶属函数值的大小并对其进行排名, 小黑麦品种苗期抗旱性排名依次为中饲 1048 (A₃) > 石大 1 号 (A₂) > 甘农 4 号 (A₁) (表 5)。

含量与小黑麦品种抗旱性呈正相关。SS 含量可反映植物的抗胁迫能力。SS 含量越高, 渗透调节作用越明显, 植物的抗旱能力越强^[18]。在相同的干旱胁迫环境下, 抗旱性强的品种可能会产生更多的蛋白质, 从而增加了细胞中的应答蛋白, 以抵抗缺水对细胞带来的迫害^[19]。本试验表明, A₁ 的相对 SS 较高, 但与 A₂ 和 A₃ 差异不显著。A₂ 的相对 SP 含量高于 A₁ 和 A₃, 对其抗旱的表达有一定的影响, 所以抗旱性较弱。在干旱胁迫的环境中, Chl 的合成受阻, 分解加快, 致使叶片发黄, 在一定范围内, Chl 的含量直接影响植物的光合作用。所以 Chl 含量对植物的生长发育具有十分重要的意义^[20]。在本试验中, A₃ 的相对 Chl 含量高于 A₁ 和 A₂, 所以, A₃ 的光合能力较强, 生长发育能力迅速, 抗

旱性也较强。植物在遭受干旱胁迫时,MDA 含量将快速升高,同时,自身将积累一些可溶性物质(如 SS 和 Pro)进行渗透调节,以此适应干旱的环境^[21]。在本试验中,A₂相对 MDA 含量高于 A₁和 A₃,似乎与前人结论相悖。但是干旱胁迫使叶片的 MDA 含量升高的同时,也伴随着 SS 和 Pro 含量的上升,所以抗旱性也随之增强。反之,当叶片中 MDA 含量下降时,SS 和 Pro 含量也随之减少,抗旱性也将变弱。SOD,POD 和 CAT 是 3 种关键的抗氧化酶,其活性与植物抗性密切相关^[22]。SOD,POD 共同作用是消除因逆境环境中引起的活性氧对植物生长发育产生的不良影响,以增强植物自身的抗旱能力,为保证植物细胞能够进行正常的生理生化活动,植物体内会通过大量的 SOD 和 POD 进行酶促反应,来消除植物体内多余的活性氧,从而达到植物正常的代谢平衡,所以,牧草品种不同,对活性氧清除能力也有所不同,植物受到胁迫损伤因蛋白合成受阻而导致 SOD 活性的下降,在逆境条件下还能保持 SOD 活性,则该品种具有较高水平的抗逆性^[23-24]。CAT 活性清除植物体内 H₂O₂,将有毒的物质分解为 H₂O 和 O₂,阻止 H₂O₂与氧自由基在铁螯合物作用下生成损害植物细胞的羟自由基。本试验结果表明,A₁的相对 SOD,POD 和 CAT 活性较低,且增幅比 A₂和 A₃小,抗旱性较弱。这与梁新华^[25]等研究结果一致。

3.2 干旱胁迫天数对小黑麦叶片生理生化指标相对值的差异及原因

蒋晋豫等^[26]研究表明,当植物受到干旱胁迫后 Pro 含量整体呈先增加后下降趋势,而 A₂和 A₃的 Pro 含量变化较小。与本试验结果相比,干旱胁迫天数与小黑麦相对 Pro 含量差异极显著,说明其对干旱胁迫比较敏感,能尽快产生 Pro 来调节渗透平衡,与其研究结果基本相符。谭景晨等^[27]研究表明,随着干旱胁迫程度的增加,SS 含量呈先降低后上升的趋势。何耀峰等^[28]研究表明,干旱胁迫下,植物对干旱胁迫条件有一定的限度,超过最大限度,植物叶片中蛋白质合成受阻,分解加强,SP 含量急剧下降,下降幅度越小,抗旱性越强。本试验结果表明,干旱胁迫天数与小黑麦相对 SS 和 SP 含量差异极显著,随着干旱胁迫天数的增加,相对 SS 含量呈先升后降的趋势,相对 SP 含量持续下降。许彩丽等^[29]研究表明,随着干旱胁迫时间的增加,植物的 Chl 含量变化从整体上看,先升后降,说

明干旱胁迫会植物 Chl 含量发生变化,影响其生成。本试验结果表明,随着干旱胁迫时间的增加,小黑麦叶片中的相对 Chl 含量下降,说明在干旱胁迫后期,Chl 含量积累缓慢,植物叶片发黄,甚至枯萎。通常情况下 MDA 含量也作为一种抗旱性指标^[30]。随着干旱胁迫程度的加剧,植物体内 MDA 含量明显上升,表明植物细胞受伤害的程度明显加深^[31]。随着干旱胁迫时间的延长,植物细胞膜结构和功能会发生一定程度地变化,胞间平衡将会被打破,若不能及时清除这些有害物质,会导致植物体内的正常生理生化代谢受阻,MDA 含量就会相应地升高。本试验表明,随着干旱胁迫时间的加剧,相对 MDA 含量相应的上升,说明 MDA 含量在极度干旱环境下,上升迅速,与前人结论一致。通常情况下,SOD 活性与植物体抗氧化能力呈正相关,干旱胁迫的初始,SOD 活性开始升高,当过度干旱或胁迫时间继续延长时,SOD 活性呈下降的趋势^[32]。李瑞姣等^[33]研究发现,干旱胁迫刚开始时,POD 活性比 SOD 活性变化更为明显,说明 POD 对轻度干旱更加敏感,随着干旱胁迫时间的继续延长,SOD 活性逐渐降低而 POD 活性大幅升高。本试验表明,小黑麦相对 POD 活性随着干旱胁迫天数的增加而上升,这是因为在植物遭受极度的干旱时,SOD 活性发挥主要作用。CAT 活性随着干旱胁迫时间的加长,呈先增后降的趋势,这与杨淑红等^[34]研究结果相符。

3.3 小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用间小黑麦叶片生理生化指标相对值的差异及原因

根据小黑麦品种×干旱胁迫天数交互作用间小黑麦抗旱性相关性生理生化指标可知,当干旱胁迫达到第 35 d 时,小黑麦品种相对 Pro、SS 和 SP 含量最大,但各小黑麦品种的变化幅度略有差异,Pro、SS 和 SP 含量变化越大的小黑麦品种抗旱性越强^[35]。这与胡晓健等^[36]研究结论基本相符。干旱胁迫可使植物体内水分大量缺失,蛋白质逐渐降解,为缓解植物体过多的蛋白质的流失,机体将会开启自我防御功能^[37]。当干旱胁迫达到 42 d 时,小黑麦品种相对 MDA 含量最大。当植物正处于干旱胁迫的状态下,细胞膜表面的质膜过氧化作用加强,导致 MDA 含量上升^[38]。当干旱胁迫达到 28 d 时,小黑麦品种相对 SOD 和 CAT 活性最高,有可能是在极度干旱条件下,植物的缺水会激活相应的 SOD 和 CAT 的基因,从而导致其活性继续增强,当达到一定的阈值时,SOD 和 CAT 活性又开始

下降,这也是使自身膜系统免受伤害的生理调节机制^[39]。当干旱胁迫达到 42 d 时,参试小黑麦品种相对 POD 活性最高,这表明在极度干旱情况下,植物可以改变酶活性来抵抗逆境对植物细胞带来的损害^[40]。

4 结论

通过分析 3 个小黑麦品种在不同干旱条件下的生理生化指标变化,并结合隶属函数法,结果表明,3 个参试小黑麦品种苗期抗旱性强弱依次为中饲 1048>石大 1 号>甘农 4 号。甘农 4 号小黑麦的抗旱性在不同干旱情况下均较弱,适宜于气候比较湿润的区域种植。

参考文献:

[1] 朱兴平,李永红. 雨水利用的理论与实践——对干旱半干旱区农业可持续发展之路的探索[J]. 水土保持通报, 1997(4):32—36.

[2] 司翠,吴昊. 干旱灾害对华北地区农业经济影响研究[J]. 科技经济市场,2009(4):68—69.

[3] 杨伟,刘文辉,马祥,等. 青藏高原地区野生老芒麦苗期抗旱种质材料和筛选[J]. 草原与草坪,2021,41(4):74—80.

[4] 张红. 引进 CIMMYT 小黑麦的鉴定及其遗传多样性分析[D]. 泰安:山东农业大学,2005.

[5] 李岩,李淮. 甘肃生物多样性与生态保护[J]. 甘肃林业, 2004(4):18—20.

[6] 魏添梅,昌小平,闵东红,等. 小麦抗旱品种的遗传多样性分析及株高优异等位变异挖掘[J]. 作物学报,2010,36(6):895—904.

[7] 顾亚峰,韩田夫,李文雄,等. 前期干旱对春小麦地上、地下部干物质积累和分配的影响[J]. 河南职技师院学报, 1990(Z1):26—35.

[8] 任丽花,黄敏敏,江枝和,等. 干旱胁迫对圆叶决明叶片超微结构的影响[J]. 中国草地学报,2008,30(1):30—34.

[9] 陈彩虹,张志珠,卢宏琮,等. 不同生育期干旱对水稻生长和产量的影响[J]. 西南农业学报,1993(2):38—43.

[10] 任丽花,王义祥,翁伯琦,等. 土壤水分胁迫对圆叶决明叶片含水量和光合特性的影响[J]. 厦门大学学报(自然版),2005,44(1):28—31.

[11] 王金玲. 小黑麦抗旱生理特性及基因表达差异的研究[D]. 石河子:石河子大学,2006.

[12] 常丽,周昕,汪贵斌. 温度和干旱胁迫对银杏叶代谢物含量的影响[J]. 林业工程学报,2013,27(6):52—55.

[13] 曾晓琳,李莹,刘金平,等. 干旱对细叶结缕草和入侵杂草丝茅的竞争、生长及抗旱性的影响[J]. 草业学报, 2019,28(11):46—59.

[14] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

[15] 张舒芸. 小黑麦和黑麦的抗旱性与抗寒性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2018.

[16] 潘昕,邱权,李吉跃,等. 干旱胁迫对青藏高原 6 种植物生理指标的影响[J]. 生态学报,2014,34(13):3558—3567.

[17] 方敏彦,章明,周猛. 结缕草属植物抗旱性评价[J]. 北方农业学报,2020,48(6):103—107.

[18] 刘晶,赵方媛,杜文华,等. 甘肃省不同生态区高产优质小黑麦种质的筛选[J]. 草原与草坪,2019,39(5):44—52.

[19] 尹启琳,郭丁预,姜倩倩,等. 干旱胁迫对不同小麦品种苗期抗旱生理指标的影响[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版),2020,33(3):289—297.

[20] 姜卫兵,高光林,俞开锦,等. 水分胁迫对果树光合作用及同化代谢的影响研究进展[J]. 果树学报,2002(6):416—420.

[21] Sundar D, Perianayaguy B, Reddy A R. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves[J]. Plant growth regulation,2004(44):157—163.

[22] 赵燕昊,曹跃芬,孙威怡,等. 小麦抗旱研究进展[J]. 植物生理学报,2016,52(12):1795—1803.

[23] 薛盈文,黄寿光,范博文,等. 低温和 UV-B 复合胁迫对小麦幼苗抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(6):834—840.

[24] 覃鹏,刘叶菊,刘飞虎. 干旱处理对烟草叶片 SOD 和 POD 活性的影响[J]. 中国烟草科学,2005(2):28—30.

[25] 梁新华. 干旱胁迫对甘草种子萌发及 CAT 活性的影响[J]. 宁夏农林科技,2004(3):1—3.

[26] 蒋晋豫,施智宝,李云,等. 干旱胁迫对不同种源长柄扁桃生理特性的影响[J]. 陕西林业科技,2020,48(4):5—9.

[27] 谭景晨,赵丽丽,张淑炜,等. 干旱胁迫对葛藤种苗生理特性的影响[J]. 农业与技术,2020,40(22):17—20.

[28] 何耀峰,郝春雷,杨欢,等. 干旱胁迫对不同品种玫瑰生理生化特性的影响[J]. 宁夏农林科技,2020,61(7):12—17.

[29] 许彩丽,周易胤森,谢乔颖,等. 干旱胁迫对箭叶淫羊藿生理生化的影响[J]. 湖南林业科技,2020,47(5):20—24+41.

[30] 薄伟. 鸢尾属种质资源评价及抗旱性研究[D]. 太原:山西农业大学,2018.

- [31] 李文英. 干旱胁迫对百合生长及生理生化的影响[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [32] 何森,高耀辉,徐鹏飞,等. 中国芒幼苗对土壤干旱胁迫的生理响应[J]. 安徽农业科学,2013,41(30):12125-12128+12131.
- [33] 李瑞姣,岳春雷,李贺鹏,等. 干旱胁迫对日本莢蒾幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):56-61+103.
- [34] 杨淑红,宋德才,刘艳萍,等. 土壤干旱胁迫和复水后3个杨树品种叶片部分生理指标变化及抗旱性评价[J]. 植物资源与环境学报,2014,23(3):65-73.
- [35] 包艳丽. 青藏高原东缘沙化区生物结皮中荒漠藻抗旱生理特性的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [36] 胡晓健,杨春霞,谭世才,等. 干旱胁迫对不同种源马尾松幼苗中脯氨酸及内源激素含量的影响[J]. 南方林业科学,2020,48(6):24-28+53.
- [37] 李洁. 干旱胁迫对青稞幼苗可溶性蛋白的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):124-126.
- [38] 秦立刚,李雪,李韦瑶,等. PEG干旱胁迫对3种葱属植物种子萌发期渗透调节物质及酶活性的影响[J]. 草地学报,2021,29(1):72-79.
- [39] 王春雪,纪中华,李纪潮,等. 3个品种剑麻抗旱生理指标比较及抗旱性评价[J]. 热带作物学报,2014,35(10):1912-1919.
- [40] 王彬,李长鼎,马仲泽,等. 4个高羊茅品种幼苗期抗旱性比较研究[J]. 农业科学研究,2011,32(3):22-26.

Evaluation of drought resistance of three triticale varieties at seedling stage

WANG Wei-qiang, TIAN Xin-hui, DU Wen-hua

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to select forage triticale varieties suitable for planting in arid and semi-arid areas, Gan-nong No. 4 (A_1), Shida No. 1 (A_2) and Zhongsi 1048 (A_3) were used as experimental materials. The rain-proof shed was used to isolate the rain. The changes of physiological and biochemical indexes (proline (Pro), soluble sugar (SS), soluble protein (SP), chlorophyll (Chl), malondialdehyde (MDA) content and superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) activity) of three varieties under different drought stress days (7, 14, 21, 28, 35 and 42 d) were studied. The results showed that in terms of single factor, the average relative Pro of A_1 under different days of drought stress was significantly lower than that of A_3 , but there was no significant difference between A_1 and A_2 . Relative SP and Chl, SOD and CAT of A_1 were slightly lower than those of A_2 and A_3 . Relative SS and POD is of A_1 higher than those of A_2 and A_3 , but there is no significant difference. With the extension of the drought stress time, the average relative Pro and SS, relative SOD and CAT of the three triticale varieties increased first and then decreased; while the average relative SP and MDA and POD gradually increased, and the average relative Chl showed a downward trend. The interaction between triticale varieties and drought stress days showed that the relative SOD of A_1 was higher than those of A_2 and A_3 under moderate drought (28 d), and the relative CAT activity of A_1 was lower than those of A_2 and A_3 . But under severe drought (35 d), The relative Pro of A_1 was significantly lower than that of A_3 and higher than A_2 , and the relative SS of A_1 was significantly higher than that of A_2 . During severe drought (42 d), the relative SP and MDA of A_1 were lower than those of A_2 and A_3 . Comprehensive evaluation showed that the order of drought resistance at seedling stage was $A_3 > A_2 > A_1$.

Key words: triticale; drought stress; adaptability