

PEG-6000 模拟干旱胁迫对 15 个小黑麦品系 苗期生理特性的影响

赵方媛,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:为研究 15 个小黑麦品系(Z1,Z3,Z5,Z6,Z9,Z12,Z19,Z21,Z23,Z36,Z41,Z48,Z49,Z50,Z55)苗期的抗旱性,本试验以甘农 1 号小黑麦(CK1)和新小黑麦 5 号(CK2)作为对照,设置正常灌水和干旱胁迫(30% PEG-6000)2 个处理,于处理后 28 d 取样,测定叶片在正常灌水和干旱胁迫下叶绿素(CHL)、脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)、丙二醛(MDA)含量及相对含水量(RWC),同时根据各指标与抗旱系数间的相关性,结合隶属函数,对参试小黑麦材料的抗旱性进行了综合评价。结果表明,小黑麦材料间各生理指标存在显著差异,Z9 的平均 RWC(77.26%)最高,Z49 的平均 CHL 含量($0.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)最高,Z1 的平均 Pro 含量($0.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)最高,CK2 的平均 SS 含量($113.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)最高,Z50 的平均 MDA 含量($4.05 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)最高;干旱胁迫使小黑麦材料的平均 RWC(正常灌水下为 82.73%,干旱胁迫下为 56.11%)显著降低,而干旱胁迫下的平均 CHL(正常灌水下为 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,干旱胁迫下为 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、Pro(正常灌水下为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,干旱胁迫下为 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、SS(正常灌水下为 $28.23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,干旱胁迫下为 $116.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)及 MDA(正常灌水下为 $2.50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,干旱胁迫下为 $4.39 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)含量则显著升高;从小黑麦材料和干旱处理交互作用来看,干旱胁迫使所有参试小黑麦材料的 RWC 降低,其中 Z12 降幅最小,CK1 降幅最大;CHL 含量有升有降;Pro、SS 及 MDA 含量均上升,增幅最小的分别为 Z12、Z19 和 Z9,增幅最大的分别为 CK1、Z3 和 Z50。根据抗旱性综合评价值(D 值),可将供试小黑麦材料分为 5 种类型:Z1、Z5 和 CK1 属于高抗旱型,Z3、Z6、Z36、Z41、Z48、Z49 和 Z50 属于中抗旱型,Z21 属于中间型,Z19、Z23、Z55 和 CK2 属于干旱较敏感型,Z9 和 Z12 属于干旱敏感型,因此说明甘农 1 号小黑麦和小黑麦品系 Z1、Z5 的抗旱性较强,适合在干旱半干旱雨养农业区种植。

关键词:小黑麦;苗期;PEG-6000;生理特性;抗旱性评价

中图分类号:S512.4 **文献标志码:**A

Effects of PEG-6000 simulated drought stress on the physiological characteristics of 15 triticale varieties at the seedling stage

ZHAO Fang-yuan, TIAN Xin-hui, DU Wen-hua

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

Abstract: In order to identify the drought resistance of 15 Triticosecale Wittmack lines (Z1,Z3,Z5,Z6,Z9,Z12,Z19,Z21,Z23,Z36,Z41,Z48,Z49,Z50,Z55) at the seedling stage, two triticale varieties, Gannong No.1 (CK1) and New triticale No.5 (CK2), were used as the controls. Two treatments including the normal irrigation and drought stress were set in this experiment that 30% of PEG-6000 was used to simulate the drought environment. Samples were collected at day 28 after treatment, and contents of chlorophyll (CHL), proline (Pro), soluble sugar (SS), malondialdehyde (MDA) and relative water content (RWC) in leaves of triticale materials were determined. In the meantime, according to the correlation between each index and drought-resistance coefficient,

收稿日期:2019-01-07

修回日期:2019-08-13

基金项目:青海省青藏高原优良牧草品系资源利用重点实验室开放课题(2017-ZJ-Y12);西藏饲草产业专项(XZ201801NA02);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)

作者简介:赵方媛(1992-),女,甘肃天水人,在读博士,研究方向为草种质资源及育种栽培研究。E-mail:1006997460@qq.com

通信作者:杜文华(1968-),女,博导,教授,主要从事草种质资源及育种栽培研究。E-mail:duwh@gsau.edu.cn

the drought resistance of triticale materials was evaluated comprehensively combined with the subordinate function. Results showed that significant differences existed in physiological parameters of triticale materials, which Z9 had the highest average RWC (77.26%), Z49 had the highest average CHL content ($0.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), Z1 had the highest average Pro content ($0.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), CK2 had the highest average SS content ($113.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), and Z50 had the highest average MDA content ($4.05 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$). The average RWC decreased significantly, while the average contents of CHL, Pro, SS and MDA increased significantly under the drought stress. The values of the physiological index under normal irrigation and drought stress were 82.73% and 56.11% (RWC), $0.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (CHL), $0.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.47 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (Pro), $28.23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $116.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (SS), $2.50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ and $4.39 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ (MDA), respectively. The interaction of triticale materials and drought stress indicated that RWC decreased with that Z12 had the smallest decrease, CK1 had the largest decrease, CHL content changed inconsistently, and the contents of Pro, SS and MDA increased under the drought stress, Z12, Z19 and Z9 had the smallest increase, respectively, and CK1, Z3 and Z50 had the largest increase, respectively. Based on the comprehensive evaluation results, 17 triticale materials were divided into 5 groups according to the comprehensive evaluation value of drought resistance (D value), among which Z1, Z5, and CK1 belonged to the high drought resistance type, Z3, Z6, Z36, Z41, Z48, Z49 and Z50 belonged to the medium drought resistance type, Z21 belonged to the middle type, Z19, Z23, Z55 and CK2 belonged to the more sensitive drought type, Z9 and Z12 belonged to the sensitive drought type. Therefore, triticale variety Gannong No.1 and triticale lines Z1 and Z5 had strong drought resistance, which suitable for the semi-arid rain-fed areas.

Keywords: triticale; seedling stage; PEG-6000; physiological characteristics; drought resistance evaluation

随着畜牧业不断发展,饲料的用量越来越大。小黑麦作为一个杂交新物种,在结合小麦高产优质的同时,又具有黑麦抗逆性和适应性强的优点^[1]。小黑麦作为优质禾本科饲草具有较高的生产性能,但是,干旱缺水已成为小黑麦高产的主要限制因子^[2],对籽粒产量的影响极大^[3]。聚乙二醇(PEG-6000)溶于水后,产生的强大渗透压会使植物组织和细胞处于类似于自然干旱的水分胁迫状态^[4]。用 PEG-6000 模拟自然干旱已普遍用于作物抗旱性研究^[5]。在干旱胁迫下,作物形态特征和生理特性等会发生一系列变化^[6]。叶片水分是植物进行正常生理活动的基础,受到干旱胁迫时叶片中的水分含量直接反映植株受旱后可利用的水分情况,其含量高低在一定程度上可以反映植株叶片保水能力强弱。相对含水量是植物组织的含水量占饱和含水量的百分比,比含水量绝对值更能反映植物的水分亏缺情况以及抗脱水能力和受干旱胁迫程度^[7-8]。叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,在光合作用中起着吸收、传递和转化光能的作用,其含量高低在一定程度上决定着光合速率大小^[9]。植物在不良环境下,细胞膜的结构和功能最先受到伤害,同时植物体内活性氧自由基累积,并引发膜脂过氧化作用。丙二醛是膜脂过氧化最主要的产物,其含量与细胞膜膜脂过氧化程度有关,能够反映植物所遭受胁迫伤害的程度^[10-11]。同时,在逆境中,植物也会通过积累一些可溶性糖、脯氨酸等可

溶性物质来进行渗透调节,以此适应干旱胁迫。一般而言,这些渗透调节物质累积越多,植物的抗旱性越强^[12-13]。在逆境胁迫下植物细胞内还会因为自由基代谢过程不平衡而使自由基过剩,引发或加剧膜脂过氧化进程,损伤细胞膜系统。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)可有效清除这些自由基,称为酶促防御过程^[14]。国内外学者对小麦(*Triticum aestivum* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)、苜蓿(*Medicago sativa* L.)、高燕麦草(*Arrhenatherum elatius* L.)等植物的苗期抗旱生理过程进行了大量研究^[15-19],其抗旱性鉴定多根据与抗旱性紧密相关的生理指标,如叶片含水量、叶绿素、丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量以及 SOD、POD、CAT 活性等。前人对小黑麦抗旱性研究多集中在萌发期^[20-21]和成株期^[22-23],但对苗期抗旱生理研究很少。植物苗期的形态指标和主要生理指标受干旱影响较大,品种间差异明显,可从不同侧面反映出品种的抗旱能力^[24]。本试验拟在项目组前期研究基础上^[25],利用 30% PEG-6000 模拟干旱环境,研究干旱胁迫对 15 个饲料型小黑麦品系苗期叶片相对含水量(RWC)、叶绿素(CHL)含量、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(Pro)含量和可溶性糖(SS)含量的影响,并对参试小黑麦进行抗旱性综合评价,以期筛选抗旱性较强,适合在干旱和半干旱地区种植的小黑麦品系,并为小黑麦抗旱育种提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

利用有性杂交和系谱法选育的 15 个饲料型小黑麦品系,编号分别为 Z1,Z3,Z5,Z6,Z9,Z12,Z19,Z21,Z23,Z36,Z41,Z48,Z49,Z50,Z55,对照为甘农 1 号小黑麦(CK1)和新小黑麦 5 号(CK2)。

1.2 试验设计

试验在甘肃农业大学草业学院温室内进行,采用盆栽模拟干旱条件。将大田土和草炭土按 1 : 1 体积比混合均匀,装入花盆,播前浇足水,并施肥。选择成熟一致、籽粒饱满、健康无病虫害的小黑麦种子为试验材料,播种在花盆内,每个花盆种植 45 粒种子,定期浇水,以保证幼苗正常生长。待幼苗生长到 2~3 片真叶时,用 200 ml 浓度为 30% 的 PEG-6000 进行浇灌^[25],并保证溶液在盆中均匀分布。干旱处理后每 2 d 进行称重补水以维持溶液浓度。设置正常灌水(A1)和干旱胁迫(A2)2 个处理,参试 17 个小黑麦材料共 34 个处理,每个处理设 3 次重复,并于处理后 28 d 采集顶部第 1、2 片展开叶片测定相关生理指标^[25]。

1.3 测定指标及方法

叶片相对含水量(RWC)采用浸泡法测定^[26],叶绿素(CHL)含量采用丙酮反复提取法测定^[26],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[27],脯氨酸(Pro)含量采用酸性茚三酮染色法测定^[27],可溶性糖含量(SS)采用蒽酮比色法测定^[27]。

1.4 抗旱系数、隶属函数值及抗旱性综合评价值(D 值)的计算

抗旱系数是该性状在干旱胁迫处理下和正常灌水条件下的比值,计算公式为:

某一指标抗旱系数=
$$\frac{\text{干旱胁迫处理下某一指标测定值}}{\text{正常灌水条件下某一指标测定值}}$$

综合抗旱系数 =
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{干旱胁迫处理下某一指标测定值}}{\text{正常灌水条件下某一指标测定值}}$$

式中,n 表示指标数量,i 表示第 i 个指标。

由于植物的抗旱性是一个复杂的综合性状,隶属函数提供了一种在多指标测定基础上对植物抗旱性进行综合评价的途径,它可以克服利用少数指标对植物抗旱性进行评价的不足^[28]。因此,本试验采用隶属函数法对不同小黑麦材料苗期抗旱性进行综合评价,每个小黑麦品系各指标的具体隶属函数值按下列公式计算:

$$u(X_j)=\frac{X_j-X_{jmin}}{X_{jmax}-X_{jmin}}$$

式中, $u(X_j)$ 为各材料 j 指标的隶属函数值, X_j 表示各材料第 j 个指标; X_{jmin} 表示各材料 j 指标的最小值; X_{jmax} 表示各材料 j 指标的最大值。

抗旱性综合评价值(D) 计算公式为: $D =$

$$\sum_{j=1}^n \left[u(X_j) \left(|r_j| / \sum_{j=1}^n |r_j| \right) \right] \quad (j = 1, 2, 3, \cdots, n)$$

式中, r_j 为各小黑麦材料第 j 个指标与综合抗旱系数间的相关系数;若 r_j 为负值,则以 $1 - u(X_j)$ 代

替式中 $u(X_j)$; $|r_j| / \sum_{j=1}^n |r_j|$ 为指标权数,表示第 j 个指标在所有指标中的重要程度;根据 D 值将供试材料进行抗旱性分级, $0.8 \leq D \leq 1$ 为 1 级抗旱型(高抗旱型), $0.6 \leq D < 0.8$ 为 2 级抗旱型(中抗旱型), $0.4 \leq D < 0.6$ 为 3 级抗旱型(中间型), $0.2 \leq D < 0.4$ 为 4 级抗旱型(干旱较敏感型), $0 < D < 0.2$ 为 5 级抗旱型(干旱敏感型)。

1.5 数据统计分析

采用软件 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 对试验数据进行统计分析。用二因素随机区组设计的方差分析法分析小黑麦材料间、干旱处理间、小黑麦材料×干旱处理间小黑麦 RWC、CHL、Pro、SS、MDA 含量的差异显著性,如果差异显著,分别用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

由表 1 可以看出,除干旱处理间小黑麦的 CHL 含量有显著差异外($P<0.05$),材料间、干旱处理间、材料×干旱处理交互作用间小黑麦的 RWC、CHL、Pro、SS、MDA 含量均存在极显著差异($P<0.01$),需对上述各指标进行多重比较。

表 1 小黑麦苗期生理指标方差分析表(F 值)

Table 1 Variance analysis of physiological indexes of triticale (F-Value)

变异来源 Variation source	F 值 F-Value				
	RWC	CHL	Pro	SS	MDA
小黑麦材料间 Among triticale material	1.066**	4.012**	0.699**	1.500**	0.774**
干旱处理间 Among drought treatment	124.776**	3.105*	185.597**	92.656**	150.224**
小黑麦材料× 干旱处理间 Triticale material× drought treatments	83.643**	37.303**	186.903**	115.564**	50.567**

注:* 表示差异达显著水平($P<0.05$);** 表示差异达极显著水平($P<0.01$)。

Note: * indicates significant difference at $P<0.05$ level; ** indicates significant difference at $P<0.01$ level.

2.1 小黑麦材料间生理特性的差异

2.1.1 RWC 由表 2 可知,参试小黑麦材料中 Z9 的平均 RWC 最高(77.26%),与 Z3、Z6、Z12、Z23 和 CK2 间无显著差异,与其余材料间均存在显著差异;Z5 的平均 RWC 含量(55.04%)显著低于其他材料($P<0.05$)。

2.1.2 CHL 含量 由表 2 可以看出,在不同小黑麦材料中,Z49 的平均 CHL 含量($0.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于除 Z5、Z36 和 Z48 外的其余材料;Z23 的平均 CHL 含量最低($0.23\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),显著低于除 Z3、Z6、Z9、Z12 和 Z41 外的其余材料。

2.1.3 Pro 含量 参试小黑麦材料中,Z1 的平均 Pro 含量最高($0.36\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),与 Z3、Z5、Z6、Z21、Z36、Z41、Z48、Z49 和 Z50 间无显著差异,与其余材料间存在显著差异;CK2 的平均 Pro 含量($0.15\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)显著低于除 Z9 外的其余各材料(表 2)。

2.1.4 SS 含量 17 个小黑麦材料中 CK2 的平均 SS 含量($113.33\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于除 Z3 和 Z5 外的其余材料;Z12 的平均 SS 含量最低($28.58\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),除与 Z9、Z19 和 Z23 无显著差异外,与其余各材料间均存在显著差异(表 2)。

2.1.5 MDA 含量 参试小黑麦材料中 Z50 的平均 MDA 含量最高($4.05\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$),除 Z5、Z23、Z41 和 Z55 外,显著高于其余材料;CK2 的平均 MDA 含量($2.67\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)显著低于除 Z9 和 Z12 外的其余材料(表 2)。

2.2 干旱胁迫处理间小黑麦生理特性的差异

由表 3 可知,干旱胁迫导致小黑麦幼苗的生理指标发生不同程度变化。与正常灌水相比,干旱胁迫使小黑麦叶片的平均 RWC 显著降低,平均 CHL、Pro、SS 和 MDA 含量显著升高。

表 2 小黑麦材料间生理特性的差异

Table 2 Differences of the physiological property among triticale materials

小黑麦材料 Triticale material	生理指标 Physiological index				
	RWC/%	CHL/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Pro/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	SS/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	MDA/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)
Z1	65.28±9.58h	0.47±0.04bc	0.36±0.02a	96.10±16.51b	3.13±0.46ef
Z3	74.76±9.69abc	0.25±0.05gh	0.33±0.03ab	110.17±14.98a	3.68±0.46bcd
Z5	55.04±5.14j	0.49±0.04ab	0.33±0.03ab	113.26±17.40a	3.95±0.26ab
Z6	74.38±8.51abc	0.30±0.02efgh	0.35±0.03a	86.28±13.92bc	3.10±0.26ef
Z9	77.26±2.39a	0.24±0.02h	0.17±0.01e	35.45±8.24h	2.86±0.11fg
Z12	75.98±1.95abc	0.24±0.02h	0.20±0.01d	28.58±4.63h	2.82±0.23fg
Z19	71.64±4.38cdef	0.32±0.08efg	0.22±0.03d	37.30±3.79h	3.40±0.56de
Z21	59.18±3.58i	0.32±0.06ef	0.33±0.04ab	57.58±12.24g	3.38±0.36de
Z23	76.12±4.63ab	0.23±0.01h	0.29±0.03c	31.50±8.15h	3.86±0.40abc
Z36	67.62±6.61fgh	0.50±0.08ab	0.34±0.03ab	76.72±14.78cde	3.52±0.45cd
Z41	69.86±7.59defg	0.26±0.03fgh	0.35±0.04a	77.03±15.08cde	3.95±0.59ab
Z48	71.95±9.63bcde	0.51±0.07ab	0.33±0.04ab	68.05±12.03efg	3.39±0.64de
Z49	69.25±6.17efgh	0.55±0.03a	0.35±0.05a	63.17±16.41fg	3.40±0.46de
Z50	66.22±9.61gh	0.39±0.08d	0.33±0.05ab	74.81±13.78cdef	4.05±0.47a
Z55	72.69±5.17bcde	0.33±0.07e	0.32±0.04bc	73.19±11.15def	3.77±0.55abc
CK1	60.81±8.30i	0.41±0.06cd	0.31±0.04bc	83.34±16.82cd	3.60±0.60bcd
CK2	74.09±1.91abcd	0.43±0.07cd	0.15±0.02e	113.33±17.69a	2.67±0.19g

注:同列不同小写字母表示不同材料间差异显著($P<0.05$),各小黑麦材料的生理指标值为正常灌水与干旱胁迫下的平均值;各列数据均用平均值±标准误差表示,下同。

Note: Different lowercase letters within the same column mean significant differences among different materials ($P<0.05$), and values showed above were the average of normal irrigation and drought stress;The data of each column were expressed by the mean values ± standard error, the same below.

表 3 干旱处理间小黑麦生理特性的差异

Table 3 Differences of physiological characteristics of triticale among drought stress

处理 Treatment	生理指标 Physiological index				
	RWC/%	CHL/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Pro/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	SS/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	MDA/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)
正常灌水 Normal irrigation	82.73±1.19a	0.33±0.02b	0.13±0.01b	28.23±1.96b	2.50±0.05b
干旱胁迫 Drought stress	56.11±1.54b	0.40±0.03a	0.47±0.02a	116.19±7.19a	4.39±0.11a

注:不同处理下生理指标值为所有参试小黑麦材料的平均值。

Note:The values showed above were the average of all the tested triticale materials.

2.3 小黑麦材料×干旱处理交互作用间生理特性的差异

由表 4 可以看出,小黑麦材料×干旱处理交互作用间各生理指标均存在显著差异。与正常灌水相比,在 30% PEG 胁迫下,所有参试小黑麦材料的 RWC 均有不同程度下降,其中 Z12 的 RWC 降幅最小,其次为 CK2,CK1 降幅最大;CHL 含量并没有表现出整体性增加或减少,其中 Z1、Z5、Z19、Z21、Z36、Z41、Z48、Z50 及 CK1 的 CHL 含量增加,其余小黑麦材料的 CHL 含量下降;Pro 含量均表现出上升的趋势,Z12 的增幅最小,CK1 的增幅最大;SS 含量均上升,Z19 的增幅最小,Z3 增幅最大;MDA 含量的变化趋势同于 Pro 和 SS 含量,Z9 的增幅最小,Z50 的增幅最大。

表 4 小黑麦材料×干旱处理交互作用间生理特性的差异

Table 4 Differences of the physiological property for the interaction of triticale material and drought treatment					
材料×处理 Material×treatment	生理指标 Physiological index				
	RWC/%	CHL/(mg·g ⁻¹)	Pro/(mg·g ⁻¹)	SS/(mg·g ⁻¹)	MDA/(μmol·g ⁻¹)
Z1×A1	86.59±1.55bc	0.39±0.01fg	0.17±0.01ghi	15.02±0.24k	2.14±0.17jk
Z1×A2	43.97±1.59k	0.55±0.02cd	0.54±0.02cd	177.18±9.40b	4.13±0.16d
Z3×A1	96.27±1.56a	0.36±0.01gh	0.12±0.00jkl	16.39±1.18k	2.65±0.07ghij
Z3×A2	53.25±2.08j	0.15±0.01no	0.53±0.01d	203.95±4.17a	4.71±0.11c
Z5×A1	66.41±1.13hi	0.41±0.01fg	0.13±0.01ijkl	50.09±5.58h	3.39±0.01ef
Z5×A2	43.67±1.25k	0.58±0.01bcd	0.54±0.02cd	176.43±3.47b	4.51±0.15cd
Z6×A1	93.11±3.25a	0.35±0.02ghi	0.15±0.00hij	17.45±1.22k	2.63±0.21ghij
Z6×A2	55.64±0.91j	0.25±0.00jklm	0.56±0.01abcd	155.11±18.80c	3.57±0.25e
Z9×A1	82.05±2.26bcde	0.27±0.01hijkl	0.12±0.01jkl	17.59±0.59k	2.72±0.19ghi
Z9×A2	72.46±0.68fg	0.20±0.02klmno	0.21±0.02g	53.32±4.46h	3.00±0.08fgh
Z12×A1	76.60±1.12ef	0.28±0.02hijk	0.19±0.02gh	20.16±1.17jk	2.33±0.02ijk
Z12×A2	75.36±4.16fg	0.19±0.01lmno	0.21±0.01g	37.01±5.92hij	3.31±0.11ef
Z19×A1	81.29±1.24cde	0.14±0.00o	0.15±0.02hij	29.05±1.58ijk	2.15±0.11jk
Z19×A2	62.00±1.17i	0.49±0.01de	0.29±0.02f	45.54±1.07hi	4.65±0.09c
Z21×A1	66.78±1.17hi	0.18±0.01mno	0.13±0.01ijkl	30.79±0.57ijk	2.65±0.08ghij
Z21×A2	51.57±2.18j	0.46±0.02ef	0.52±0.02d	84.37±5.54g	4.12±0.33d
Z23×A1	85.93±2.28bc	0.24±0.00jklm	0.14±0.00ijk	13.27±0.36k	3.03±0.20fg
Z23×A2	66.30±2.43hi	0.22±0.02jklmn	0.44±0.01e	49.73±0.13h	4.68±0.25c
Z36×A1	82.25±1.10bcde	0.35±0.04ghi	0.13±0.01ijkl	44.35±0.65hi	2.52±0.06hijk
Z36×A2	52.98±1.82j	0.65±0.08ab	0.55±0.01cd	109.10±6.64f	4.53±0.11ed
Z41×A1	86.72±1.78bc	0.20±0.01klmno	0.12±0.01ijkl	21.20±1.16jk	2.43±0.10ijk
Z41×A2	52.99±0.86j	0.31±0.04hij	0.58±0.01abc	132.86±5.19d	5.47±0.22ab
Z48×A1	93.45±0.18a	0.35±0.02gh	0.13±0.02ijkl	21.24±1.54jk	1.99±0.04k
Z48×A2	50.45±1.21j	0.67±0.02a	0.53±0.01d	114.85±4.20ef	4.80±0.23c
Z49×A1	82.92±1.53bcd	0.58±0.04bc	0.11±0.02jkl	18.23±2.11k	2.41±0.22ijk
Z49×A2	55.59±1.21j	0.51±0.05cde	0.60±0.02a	108.10±7.74f	4.40±0.06cd
Z50×A1	87.41±1.50b	0.23±0.02jklmn	0.11±0.01jkl	21.91±3.09jk	2.33±0.13ijk
Z50×A2	45.02±3.24k	0.56±0.05cd	0.55±0.02bcd	127.71±4.35de	5.76±0.15a
Z55×A1	85.35±1.39bc	0.50±0.00cde	0.10±0.01jkl	44.68±3.65hi	2.45±0.19ijk
Z55×A2	64.50±1.85hi	0.22±0.03klmno	0.46±0.03e	90.08±7.41g	4.63±0.15c
CK1×A1	75.33±2.37fg	0.24±0.01jklm	0.09±0.01l	48.49±4.59h	2.33±0.19ijk
CK1×A2	37.86±0.83l	0.56±0.02cd	0.59±0.02ab	133.20±3.81d	5.27±0.18b
CK2×A1	78.00±0.88def	0.58±0.01bc	0.10±0.01kl	50.01±7.50h	2.26±0.12ijk
CK2×A2	70.17±1.44gh	0.27±0.02ijklm	0.21±0.00g	176.66±6.95b	3.07±0.03fg

注:A1 和 A2 分别表示正常灌水处理和干旱胁迫处理。
Note: A1 and A2 represent normal irrigation and drought stress treatment, respectively.

表 5 干旱胁迫下各小黑麦材料的 $u(X)$ 值、 D 值及排序
Table 5 $u(X)$ value, D value and rank of triticale with drought stress

小黑麦材料 Triticale material	$u(X)$				D 值 D value	排序 Rank	抗旱性分级 Drought-resistance classification
	RWC	CHL	Pro	SS			
Z1	0.84	0.78	0.85	0.84	0.837	3	高抗旱型 High drought resistance type
Z3	0.59	0.00	0.83	1.00	0.733	5	中抗旱型 Medium drought-resistance type
Z5	0.85	0.83	0.85	0.84	0.841	2	高抗旱型 High drought resistance type
Z6	0.53	0.19	0.89	0.71	0.665	9	中抗旱型 Medium drought-resistance type
Z9	0.08	0.10	0.02	0.10	0.068	16	干旱敏感型 Sensitive drought type
Z12	0.00	0.09	0.01	0.00	0.012	17	干旱敏感型 Sensitive drought type
Z19	0.36	0.67	0.21	0.05	0.248	15	干旱较敏感型 More sensitive drought type
Z21	0.63	0.60	0.80	0.28	0.584	11	中间型 Middle type
Z23	0.24	0.14	0.59	0.08	0.296	14	干旱较敏感型 More sensitive drought type
Z36	0.60	0.97	0.86	0.43	0.668	8	中抗旱型 Medium drought-resistance type
Z41	0.60	0.30	0.96	0.57	0.680	7	中抗旱型 Medium drought-resistance type
Z48	0.66	1.00	0.83	0.47	0.689	6	中抗旱型 Medium drought-resistance type
Z49	0.53	0.70	1.00	0.43	0.665	10	中抗旱型 Medium drought-resistance type
Z50	0.81	0.80	0.88	0.54	0.755	4	中抗旱型 Medium drought-resistance type
Z55	0.29	0.13	0.64	0.32	0.397	12	干旱较敏感型 More sensitive drought type
CK1	1.00	0.80	0.98	0.58	0.854	1	高抗旱型 High drought resistance type
CK2	0.14	0.23	0.00	0.84	0.305	13	干旱较敏感型 More sensitive drought type
指标权重 Index weights	0.30	0.09	0.32	0.29			

3 讨 论

3.1 植物苗期抗旱性研究的重要性

水资源短缺是限制牧草生长的关键因素,研究牧草的抗旱性并培育和筛选抗旱性强的品种可适当缓解干旱半干旱雨养农业区饲料短缺问题。植物受到干旱胁迫后其体内细胞及生理生化代谢发生一系列适应性变化,从而表现出抗旱性^[30],植物抗旱性是复杂的数量性状,与植物类型、基因型等紧密相关,并且容易受环境因素影响。吴文荣^[31]测定了玉米苗期与抗旱性相关的生理指标,并研究了这些指标的综合评价与干旱胁迫处理下产量抗旱指数的相关性,发现抗旱性强品种的种子产量较对照下降较少,而抗旱性弱品种的种子产量则较对

照下降较多,从而说明研究植物苗期的抗旱性强弱可以用来快速预测品种抗旱性。

3.2 PEG-6000 干旱胁迫对小黑麦苗期生理特性的影响

本试验通过研究不同小黑麦材料在正常灌水和干旱胁迫处理下幼苗生理指标的变化发现,环境因素对小黑麦生理特性的影响因基因型不同而异。参试小黑麦材料中,Z9 的平均相对含水量最高(77.26%),Z49 的平均叶绿素含量最高(0.55 mg · g⁻¹),Z1 的平均 Pro 含量最高(0.3568 mg · g⁻¹),CK2 的平均可溶性糖含量最高(113.33 mg · g⁻¹)、平均丙二醛含量最低(2.67 μmol · g⁻¹)。干旱胁迫使小黑麦幼苗的平均相对含水量显著降低,平均叶绿素含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量和丙二醛含

量显著升高,这与 Jackson 等^[32]和霍红等^[28]的研究结果一致。这主要是因为干旱胁迫使小黑麦做出一定响应,产生一系列复杂的生理变化,以适应干旱胁迫,减少或避免对自身造成损伤^[33-34]。就小黑麦材料与干旱处理交互作用而言,参试小黑麦材料在 30% PEG 胁迫下叶片的相对含水量均有不同程度下降,降幅为 1.62% ~ 49.74%,说明干旱胁迫导致小黑麦叶片水分亏缺,这与王曙光等^[35]的研究结果一致,本试验中 CK1 和 Z1 叶片水分亏缺较严重。在干旱等逆境中植株叶片的叶绿素会受到一定损害,使叶绿素含量下降,导致光合能力降低,蒸腾作用受阻,进而影响植株生长发育^[36]。干旱逆境下植物体内产生大量活性氧,破坏叶绿体结构,使叶绿素合成减少,导致叶绿素含量降低^[37]。本研究结果表明,干旱胁迫使 8 个小黑麦材料的叶绿素含量降低(与上述结果一致),但其余 9 个小黑麦材料的叶绿素含量却增加,这可能与植物对环境因子的补偿和超补偿效应有关^[38-39]。干旱胁迫会使植物的细胞膜造成不同程度损伤^[40],因此在 30% PEG 胁迫下,17 个小黑麦材料的丙二醛含量均增加,其中 Z50 的损伤程度最严重,Z9 受伤害程度最低。干旱胁迫下参试小黑麦材料的脯氨酸含量均呈上升趋势,其中 Z9 和 Z12 增幅较少,Z49 的增幅最大,说明其更能抵抗干旱胁迫或适应干旱环境^[41]。与脯氨酸含量变化趋势一样,30% PEG 干旱胁迫下所有参试小黑麦材料通过增加可溶性糖含量来抵抗或适应逆境^[42]。

综上,用单一指标判断参试小黑麦材料的抗旱性得到的结果不一致,不同小黑麦材料对同一生理指标的反应不同,同一小黑麦材料对不同生理指标也会有不同响应,利用单一指标对小黑麦的抗旱性进行评价是片面的^[43],为综合考虑干旱胁迫环境下参试小黑麦幼苗的保水能力、光合性能、质膜过氧化程度和细胞中渗透调节物质积累等的变化,更科学地评价其抗旱性,本试验采用隶属函数法对参试小黑麦材料的抗旱性进行了综合评价,得到了不同小黑麦材料的抗旱性综合评价值(D 值),并根据 D 值对供试小黑麦材料的抗旱性进行了分级:Z1、Z5 和 CK1 属于高抗旱型,抗旱性较强;Z9 和 Z12 属于干旱敏感型,抗旱性较弱,这与观察的结果基本一致,说明采用隶属函数综合评定法在小黑麦抗旱性比较研究中是可行的。综合评价结果表明,甘农 1 号小黑麦和小黑麦品系 Z1、Z5 的抗旱性较强,适合在干旱半干旱雨养农业区种植。

4 结 论

小黑麦材料间、干旱处理间和小黑麦材料×干旱处理交互作用间各项生理指标差异显著。综合评价结果表明,15 个小黑麦材料中 Z1 和 Z5 的抗旱性较强,属于高抗旱型,Z3、Z6、Z36、Z41、Z48、Z49 和 Z50 属于中抗旱型,Z21 属于中间型,Z19、Z23 和 Z55 属于干旱较敏感型,Z9 和 Z12 的抗旱性弱,属于干旱敏感型。

参 考 文 献:

- [1] 朱钦霞,高凯,王国成. 小黑麦研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2011, 26(4): 433-437.
- [2] 李诚,孔广超,曹连蕾,等. 应用模糊综合评判法评价小黑麦的抗旱性[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(13): 2682-2684,2687.
- [3] 王金铃. 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.
- [4] Attree S M, Fowle L C. Embryogeny of gymnosperms: advances in synthetic seed technology of conifers [J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 1993, 35(1): 1-35.
- [5] 荣秀连,王波,刘刊,等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对冷季型草坪种子萌发特性影响[J]. 北方园艺, 2010, (8): 80-82.
- [6] 王瑾,刘桂茹,杨学举. PEG 胁迫下不同抗旱性小麦品种幼苗形态及主要理化特性的比较[J]. 河北农业大学学报, 2005, 9(5): 6-10.
- [7] 宫德村. 小麦抗旱性生理指标研究[D]. 烟台:烟台大学, 2014.
- [8] 葛体达,隋方功,张金政,等. 玉米根、叶质膜透性和叶片水分对土壤干旱胁迫的反应[J]. 西北植物学报, 2005, 25(3): 507-512.
- [9] 刘钟栋主编. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社, 1989:33-55.
- [10] 李雪莲,张国芳,谷艳蓉,等. 4 种多年生禾草苗期抗旱性的比较研究[J]. 四川草原, 2005, (1): 13-15.
- [11] 时丽冉,刘志华. 干旱胁迫对苜蓿菜抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(5): 673-677.
- [12] Chaves M M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2365-2384.
- [13] 安玉艳,梁锁锁,郝文芳. 柳柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 716-725.
- [14] 梁新华,史大刚. 干旱胁迫对光果甘草幼苗根系 MDA 含量及保护酶 POD、CAT 活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 108-110.
- [15] 胡雯媚,王思宇,樊高琼,等. 西南麦区小麦品种苗期抗旱性鉴定及其指标筛选[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 182-189.
- [16] 李艳. 水稻品种苗期抗旱性及鉴定指标筛选的研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2006.
- [17] 于艳敏,武洪涛,张书利,等. 水稻品种苗期抗旱性筛选与评价[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 23-28.
- [18] 张荟荟,甄世财,张一弓,等. 12 份苜蓿品系材料苗期抗旱性综合评价[J]. 草业科学, 2014, 31(4): 737-743.
- [19] 杨宏新,毛培春,孟林,等. 19 份高燕麦草品系材料苗期抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2011, (2): 6-14,34.
- [20] 李会芬,时丽冉,崔兴国,等. 不同品种小黑麦萌发期耐旱性比

- (上接第 105 页)

- [24] Zhang J H, Huang W D, Liu Y T, et al. Effects of temperature acclimation pretreatment on the ultrastructure of mesophyll cells in young grape plants (*Vitis vinifera* L. cv. Jingxiu) under cross-temperature stresses [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47 (8): 959-970.
- [25] Makino A. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat [J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 125-129.
- [26] Cornic G. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture-not by affecting ATP synthesis [J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(5): 187-188.
- [27] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants [J]. Plant Cell and Environment, 2002, 25(2): 275-294.
- [28] 周宇飞, 王德权, 陆樟铤, 等. 干旱胁迫对持绿性高粱叶片渗透调节及叶绿体超微结构的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2545-2550.
- [29] Wang N, Wang Y T, Yu J L, et al. Prioritization of feasible physiological parameters in drought tolerance evaluation in sorghum: a grey relational analysis [J]. Zemdibyste-Agriculture, 2015, 102(4): 457-464.
- [30] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1303-1311.
- [31] Demmig B, Winter K, Krüger A, et al. Photoinhibition and zeaxanthin formation in intact leaves: a possible role of the xanthophyll cycle in the dissipation of excess light energy [J]. Plant Physiology, 1987, 84(2): 218-224.
- [32] 王霞, 侯平, 尹林克. 植物对干旱胁迫的适应机理 [J]. 干旱区研究, 2001, 18(2): 42-46.
- [33] 尹永强, 胡建斌, 邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展 [J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 105-110.
- [34] Dorothea B, Ramanjulu S. Drought and salt tolerance in plants [J]. Critical Reviews Plant Sciences, 2005, 24(1): 23-58.
- [35] 张立新, 李生秀. 氮、钾、甜菜碱对水分胁迫下夏玉米叶片膜脂过氧化和保护酶活性的影响 [J]. 作物学报, 2007, 33(3): 482-490.
- [36] Borrell A, Hammer G, Van Oosterom E. Stay-green: a consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain fillings? [J] Annals of Applied Biology, 2001, 138(1): 91-95.