

11份草地早熟禾种质材料对PEG-6000胁迫的生理响应和耐旱性评价

张然¹, 李佳缙¹, 王铭¹, 吉凌鹤¹, 侯瑄¹, 马祥², 马晖玲¹

(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. 青海省畜牧兽医科学院青藏高原优良牧草种植资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:为鉴定评价11份不同草地早熟禾种质材料幼苗的耐旱性,将种子播种于育苗钵中,待幼苗生长至4~5片真叶时进行15% PEG-6000模拟干旱胁迫处理。测定相对含水量(RWC)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性、叶绿素(Chl)、脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)和可溶性糖(SS)含量。结果表明:在干旱胁迫下,11份草地早熟禾种质材料RWC和Chl含量显著降低,而SOD、POD、CAT、Pro、MDA和SS含量均有不同程度的增加;利用隶属函数法分析得出11份供试材料耐旱性强弱排序依次为10-202>秦州>橄榄球>午夜2号>清水>10-130>09-085>天水>解放者>蓝月>09-61。因此10-202和秦州可作为选育耐旱品种的候选材料。

关键词:草地早熟禾;PEG胁迫;苗期;生理响应;耐旱性

中图分类号:S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)02-0113-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyep.2021.02.016

草地早熟禾(*Poa pratensis*)作为禾本科早熟禾属多年生草本植物,是世界上种植最广泛的冷型草坪草之一^[1]。因其耐践踏、耐修剪和再生能力强而广泛用于公园、高尔夫球场、城市景观和其他运动场草坪^[2]。近年来,由于全球气候暖化、极端气温频发、工业和农业迅猛发展,加剧了水资源的不确定性和极端干旱的发生^[3]。干旱是限制世界各地草坪草生长的主要非生物因素之一^[5]。研究表明,当草坪草所处环境的干旱程度低于其最高耐受阈值时,草坪草通过调节自身的生理生化特性来适应环境条件的改变。然而,当草坪

草生长环境的干旱程度高于其最高耐受阈值时,会引起草坪草细胞、组织和器官永久损伤,进而影响草坪草的生长和发育,甚至导致植株死亡^[6]。干旱胁迫对草坪草的伤害程度取决于胁迫时间、草坪草的发育阶段和基因型^[7]。草地早熟禾喜光、耐阴、耐旱,但苗期耐旱性相对较弱^[8],因此选育具有优良遗传性状的草地早熟禾种质对草坪的建植至关重要。

我国是世界上早熟禾资源最丰富的国家之一,国家牧草种质资源中心库保存着71个早熟禾属、148种草地早熟禾种质材料^[9]。野生早熟禾具有较强的抗逆性。王婧等^[10]应用NaCl处理14种草地早熟禾,发现‘蓝天鹅’‘优异白’‘蓝狐’‘肯塔基’和‘优美’品种耐盐性较好。白小明等^[11]利用NaCl和Na₂SO₄处理8个甘肃野生早熟禾种质材料种子,发现萌发期小药早熟禾耐盐性较好。鲜靖苹等^[12]比较了10种草地早熟禾的耐镉性,结果表明‘午夜’品种具有良好的耐镉性。吕优伟等^[13]对甘肃境内9个野生早熟禾材料进行低温处理,发现一年生早熟禾耐寒性较强。田莉华等^[14]选取青海省海北地区的8种早熟禾属种质材料进行耐旱评价,发现草地早熟禾、高原早熟禾和山地早熟禾的耐旱性较好。

收稿日期:2020-04-01; **修回日期:**2020-05-18

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)

作者简介:张然(1995-),女,山西绛县人,在读博士,主要从事草坪生物学研究。

E-mail:912459402@qq.com

马晖玲为通讯作者。

E-mail:mahl@gsau.edu.cn

甘肃省和青海省地形复杂,气候多变,横跨湿润、半湿润、半干旱和干旱区,早熟禾属资源丰富^[15]。因此,本试验选取3个甘肃野生草地早熟禾材料,4个青海野生草地早熟禾材料和4种草地早熟禾商用品种开展苗期干旱胁迫试验,通过测定其生理指标的变化并用隶属函数对苗期的耐旱性进行评价,阐明11种草坪草耐旱性强弱,以期对甘肃省和青海省草地早熟禾耐

旱品种的选择和培育提供理论参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料(表1)由甘肃农业大学草业学院和青海省畜牧兽医科学院提供,分析纯PEG-6000购自上海源叶生物科技有限公司。

表1 供试草地早熟禾种质材料及其来源

Table 1 Kentucky bluegrass germplasm and their sources

编号	种质名称	采集地或供应商	生境	来源
M1	草地早熟禾(蓝月)	北京克劳沃公司	—	甘肃农业大学草业学院
M2	草地早熟禾(午夜2号)	北京克劳沃公司	—	甘肃农业大学草业学院
M3	草地早熟禾(09-085)	青海省平安县	路边	青海省畜牧兽医科学院
M4	草地早熟禾(10-130)	青海省互助县	田埂	青海省畜牧兽医科学院
M5	草地早熟禾(清水)	甘肃省清水县	河滩	甘肃农业大学草业学院
M6	草地早熟禾(天水)	甘肃省天水市	路边	甘肃农业大学草业学院
M7	草地早熟禾(解放者)	北京克劳沃公司	—	甘肃农业大学草业学院
M8	草地早熟禾(秦州)	甘肃省秦州区	山坡	甘肃农业大学草业学院
M9	草地早熟禾(橄榄球)	北京克劳沃公司	—	甘肃农业大学草业学院
M10	草地早熟禾(10-202)	青海省互助县	路边	青海省畜牧兽医科学院
M11	草地早熟禾(09-61)	青海省平安县	路边	青海省畜牧兽医科学院

1.2 试验设计

挑选籽粒饱满、大小均一的草地早熟禾种子,用无菌水过夜浸泡,70%的酒精处理1 min,无菌水冲洗3~5次,20%(V/V)的次氯酸钠消毒30 min,无菌水冲洗5~6次,最后用滤纸将水吸干备用。试验所用种植土为消毒后的蛭石和营养土(重量比3:1),每个育苗钵装入0.5 kg,将处理后的种子于2019年9月15日种植于育苗钵内,放置在19楼培养室,设置昼/夜温度为25℃/20℃,每天光周期循环14 h,相对湿度为65%。每天18:00~20:00及时补充水分,采用称重法控制土壤含水量,正常灌溉保持土壤含水量在20%~23%(由预实验所得的草地早熟禾盆栽土壤饱和含水量)。待95%种子长出第1片真叶时将育苗钵转移到含1/2 Hoagland营养液的培养盒中,每4 d更换1次培养盒的营养液。待幼苗长至4~5片真叶时进行干旱胁迫处理,处理组将培养盒的溶液换成含15%PEG-6000的1/2 Hoagland营养液,对照组(CK)为1/2 Hoagland营养液,每隔3 d更换1次营养液,每组处理3次重复。处理第12 d采样测定其抗性指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 相对含水量的测定^[18] 取处理12 d后的地上部幼苗叶片,迅速称量鲜重(FW);将叶片用去离子水浸泡24 h(此过程需遮光);取出后用吸水纸吸干叶片表面的水分,迅速称量叶片饱和重量(TW);将叶片放入105℃烘箱杀青30 min,然后在80℃烘干至恒重,称量干重(DW),计算相对含水量(RWC):

$$RWC(\%) = [(FW - DW)/(TW - DW)] \times 100\%$$

1.3.2 膜质过氧化物测定 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法测定^[19];

1.3.3 渗透调节物质含量的测定 游离脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮显色法测定^[20];可溶性糖含量(soluble sugar,SS)采用蒽酮比色法测定^[19];

1.3.4 叶绿素含量的测定 叶绿素(Chl)含量采用乙醇提取法测定^[20],按照公式计算叶绿素含量:

$$C_a = 13.95D_{665\text{ nm}} - 6.88D_{649\text{ nm}}; C_b = 24.96D_{649\text{ nm}} - 7.32D_{665}; C_{\text{叶绿素}} = C_a + C_b; \text{叶绿素含量} = C_{\text{叶绿素}} \times V/W;$$

式中, C_a : 叶绿素 a 浓度; C_b : 叶绿素 b 浓度;

$C_{\text{叶绿素}}$: 叶绿素浓度; V : 提取液体积(L); W : 称取样品质量(g)。

1.3.5 抗氧化酶活性的测定 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑显色法测定^[19]; 过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外比色法测定^[19]; 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[19]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 24.0 进行数据分析, 用平均值和标准误差表示测定结果, 对同种材料间对照组和处理组各指标采用 t 检验, 对各指标相对含量进行单因素方差分析($P < 0.05$), 用 Duncan 法对各数据进行多重比较; 采用 GraphPad Prism 8 作图。

相对增加量(%) = [(处理组 - 对照组) / 对照组] × 100% (包括 SOD、POD、CAT 活性, Pro、MDA、可溶性糖含量);

相对减少量(%) = [(对照组 - 处理组) / 对照组] × 100% (包括相对含水量、叶绿素含量);

应用模糊数学中隶属函数法, 就各指标的相对含量进行综合分析。隶属函数公式为:

当指标性状与缓解干旱胁迫呈正相关时, 公式为:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min});$$

当指标性状与缓解干旱胁迫呈负相关时, 公式为:

$$U(X_i) = 1 - [(X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})].$$

其中, $U(X_i)$ 表示隶属函数值; X_i 表示处理水平某指标的测定值; X_{\min} 和 X_{\max} 表示参试水平系中某一指标内的最小值和最大值。最后将各个指标的隶属函数值进行累加, 求平均值, 进行排序。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片相对含水量的影响

干旱胁迫下 11 个草地早熟禾种质材料幼苗叶片 RWC 均有不同程度的降低。M3、M8、M10、M11 与对照差异极显著($P < 0.01$), M1、M2、M5、M6、M7、M9 相比于对照差异显著($P < 0.05$), M4 较对照无差异(图 1-A)。M2、M3、M11 的叶片相对含水量分别较对照降低了 30.71%、32.89%、30.49%, 显著高于其他材料($P < 0.05$); M4、M5、M8、M10 的相对含水量降低值较小, 分别为 13.41%、13.98%、14.99%、13.31%, 但与 M6、M7 和 M9 差异不显著($P > 0.05$), 与其他材料相比差异显著($P < 0.05$) (图 1-B)。M4、

M5、M8、M10 经过干旱胁迫后, 幼苗叶片 RWC 降低幅度较小, 而 M2、M3、M11 的 RWC 降低幅度较大。

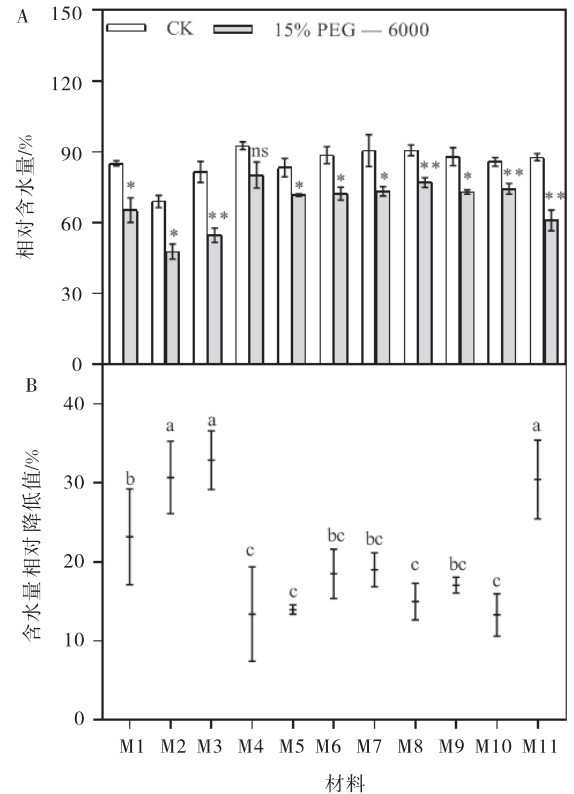


图 1 草地早熟禾幼苗叶片相对含水量和相对减少量

Fig. 1 Relative water content and relative water content reduction of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

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, 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同

2.2 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片丙二醛含量的影响

11 种材料经 15% PEG-6000 处理后, MDA 含量均有增加, 其中 M1、M3、M6、M11 较对照差异极显著($P < 0.01$), M4、M7、M8、M10 较对照差异显著($P < 0.05$), M2、M5、M9 与对照相比无显著差异(图 2-A)。M6 和 M11 MDA 含量相对增加量显著高于其他材料($P < 0.05$), 分别为 153.21%、148.29%; 而 M2 和 M8 较对照分别降低了 13.59% 和 9.73%, 显著低于其他材料($P < 0.05$)。这说明 11 个草地早熟禾材料叶片的 MDA 含量均受干旱胁迫的影响, M6 和 M11 的 MDA 含量变化较大, 叶片膜脂过氧化程度较高, M2 和 M8 的 MDA 含量变化较小, 叶片细胞膜系统受损程度较轻(图 2-B)。

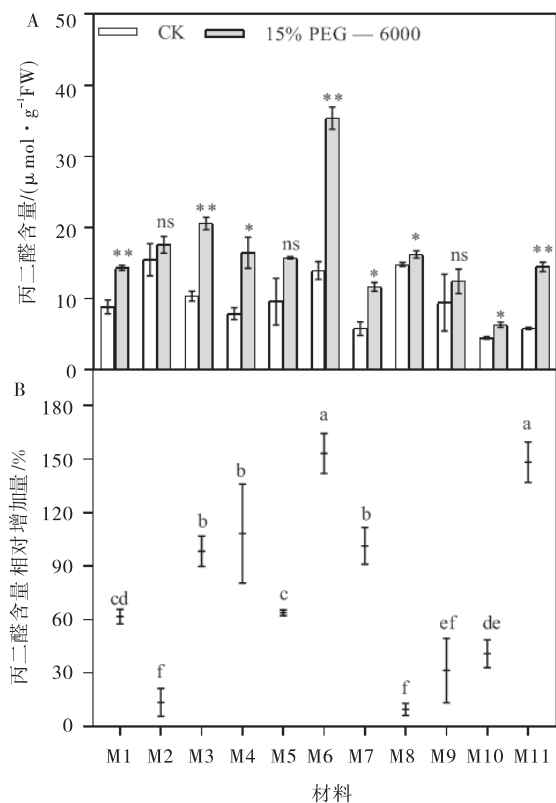


图2 草地早熟禾幼苗叶片丙二醛含量和相对增加量

Fig. 2 MDA content and relative added value of MDA content of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

2.3 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

2.3.1 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片脯氨酸含量的影响 经干旱胁迫后, M5 的 Pro 含量与对照相比差异不显著, 其余 10 种草地早熟禾材料叶片 Pro 含量较对照均显著增加 ($P < 0.01$) (图 3-A)。Pro 含量相对增加量, M1 显著高于其他材料 ($P < 0.05$), 相比于对照增加了 207.10%; M8 和 M10 的 Pro 含量相对增加量分别较对照增加 176.12%、157.41%, 低于 M1, 但显著高于其他材料 ($P < 0.05$); 而 M5 和 M11 的 Pro 含量相对增加量分别为 16.06%、19.83%, 显著低于其他材料 ($P < 0.05$) (图 3-B)。这说明干旱胁迫下 M1、M8 和 M10 产生 Pro, 可降低细胞内水势, 提高细胞渗透调节能力, 而 M5 和 M11 产生 Pro 较少, 对细胞渗透调节能力相对较弱。

2.3.2 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片可溶性糖含量的影响 干旱胁迫下, 11 种材料的可溶性糖含量均呈极显著增加 ($P < 0.01$) (图 4-A)。其中 M6 和 M10 的 SS 含量相对增加量分别为 329.14% 和 328.77%, 显著高于其他材料 ($P < 0.05$), 而 M2 和 M7 的 SS 含

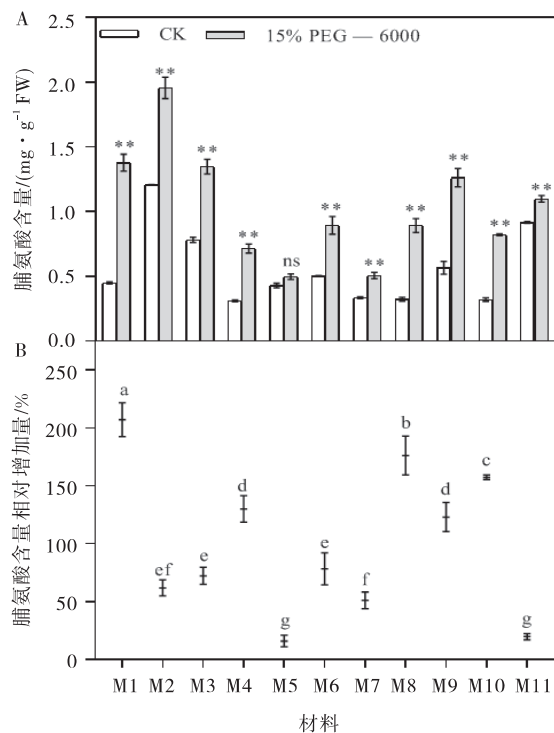


图3 草地早熟禾幼苗叶片脯氨酸含量和相对增加量

Fig. 3 Pro content and relative added value of Pro content of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

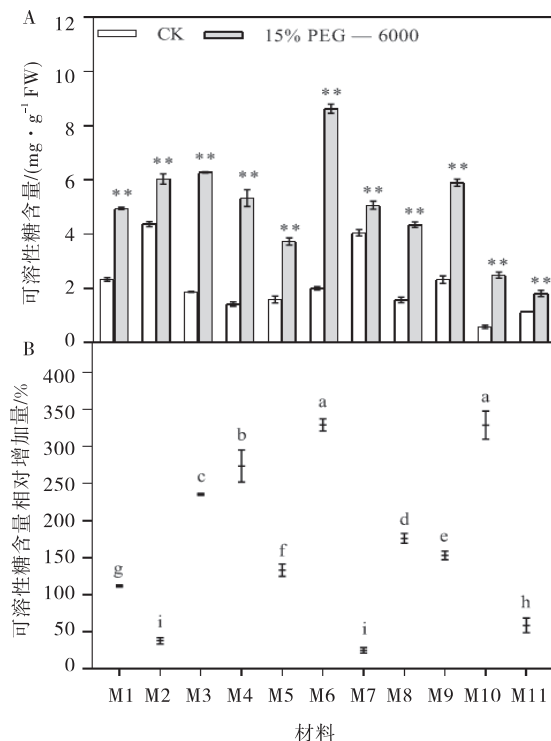


图4 草地早熟禾幼苗叶片可溶性糖含量和相对增加量

Fig. 4 Soluble sugar content and relative added value of soluble sugar content of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

量相对增加量显著低于其他材料($P < 0.05$),分别为 38.09%和 25.12%(图 4-B)。这表明 11 种草地早熟禾材料幼苗都会通过积累可溶性糖来响应干旱胁迫, M6 和 M10 积累较高的可溶性糖来提高草地早熟禾的渗透调节能力,而 M2 和 M7 积累可溶性糖含量相对较低更容易受到干旱胁迫的影响。

2.4 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片叶绿素含量的影响

11 种草地早熟禾材料幼苗叶片 Chl 含量均有不同程度的下降(图 5-A)。其中 M1 和 M11 下降幅度最大,显著高于其他材料($P < 0.05$),分别为 86.02%和 85.33%;而 M5、M8、M9 和 M10 的相对 Chl 含量降低量最小,显著低于其他材料($P < 0.05$),分别为 19.61%、24.65%、21.85%和 21.71%(图 5-B)。这表明 M5、M8、M9 和 M10 的 Chl 含量受干旱胁迫影响较小,而 M1 和 M11 受干旱胁迫影响较大。

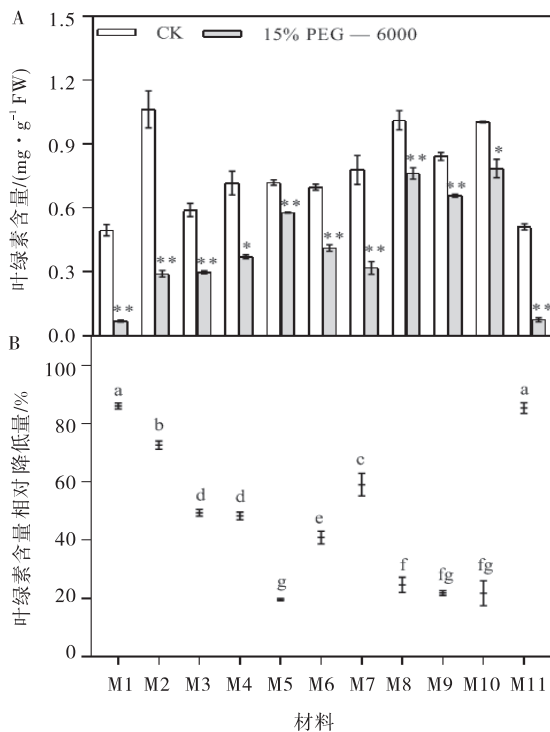


图 5 草地早熟禾幼苗叶片叶绿素含量和相对降低量

Fig. 5 Chlorophyll content reduction of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

2.5 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

2.5.1 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片 SOD 活性的影响 干旱胁迫下,11 种草地早熟禾材料幼苗 SOD 活性较对照均有提高,其中 M2、M3、M4 和 M10 与对

照相比差异极显著($P < 0.01$);M7、M8、M9 和 M11 与对照相比差异显著($P < 0.05$);而 M1、M5 和 M6 与对照相比无显著差异(图 6-A)。SOD 活性相对增加量, M10 最大,较对照增加了 61.41%,显著高于其他材料($P < 0.05$),M1 和 M11 的 SOD 活性相对增加量显著低于其他材料,分别为 3.11%和 4.62%(图 6-B)。

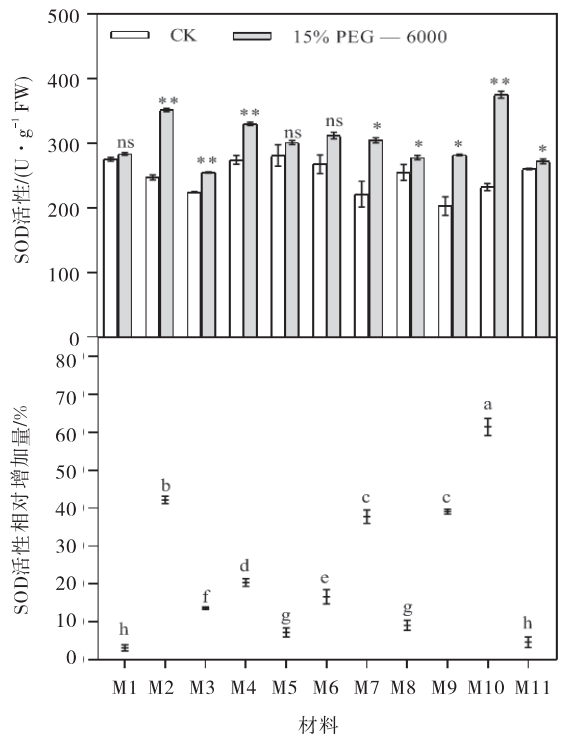


图 6 草地早熟禾幼苗叶片 SOD 活性和相对增加量
Fig. 6 SOD activity and relative added value of SOD activity of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

2.5.2 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片 POD 活性的影响 干旱胁迫下,11 种草地早熟禾材料幼苗 POD 活性均有不同程度的提高。其中 M1、M2、M6、M7、M8、M10 和 M11 较对照差异极显著($P < 0.01$);M3 和 M4 与对照相比差异显著($P < 0.05$);而 M5 和 M9 与对照相比无显著差异(图 7-A)。POD 活性相对增加量 M2 和 M10 分别为 83.36%和 90.87%,增加幅度大于其他区材料;而 M1 和 M11 的增加幅度较小,仅为 8.93%和 7.90%,显著低于其他材料($P < 0.05$) (图 7-B),这表明干旱胁迫 M1 和 M11 的 POD 活性受胁迫影响较大。

2.5.3 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片 CAT 活性的影响 干旱胁迫下,11 种草地早熟禾材料幼苗叶片中 CAT 活性明显提高,M5、M8、M9 和 M10 较对照差异极显著($P < 0.01$);M1、M2、M3 和 M6 较对照差异显著($P < 0.05$);材料 M4、M7 和 M11 较对照无显著

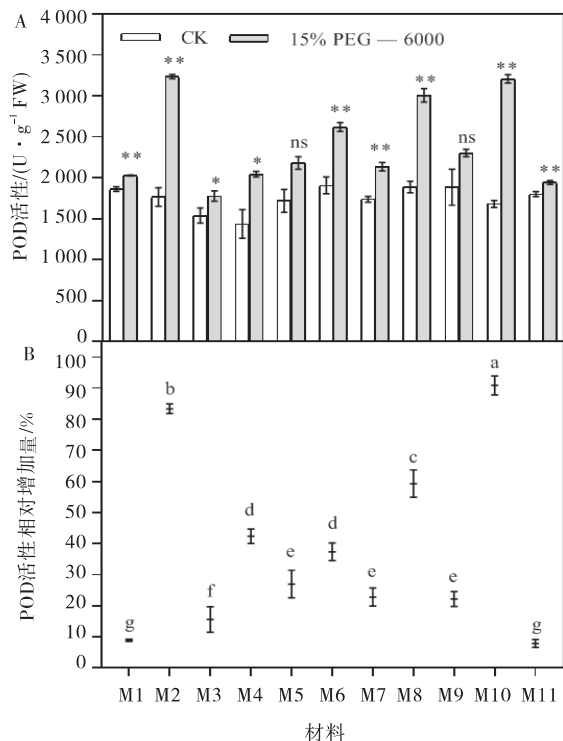


图7 草地早熟禾幼苗叶片 POD 活性和相对增加量

Fig. 7 POD activity and relative added value of POD activity of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

差异(图 8-A)。11 种材料, M10 的 CAT 活性相对增加量为 78.71%, 显著高于其他材料 ($P < 0.05$); M7 和 M11 的增加幅度较小, 低于其他材料, 仅为 7.66% 和 8.16%(图 8-B), 这表明 M10 幼苗 CAT 活性受干旱胁迫影响较低, 而 M7 和 M11 受胁迫影响较大。

2.6 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片各指标的综合评价

以 RWC、Chl、Pro、SS、MDA 含量、SOD、CAT、

POD 活性 8 个抗旱性相关指标的相对增加量为依据, 计算各个指标的平均隶属函数值, 对 11 种草地早熟禾幼苗期耐旱性进行综合评价, M11 隶属平均值最小 (0.09), 耐旱性最弱; 而 M10 的平均值最大 (0.90), 耐旱性最强; 11 种草地早熟禾种质材料耐旱性强弱依次为 $M10 > M8 > M9 > M2 > M5 > M4 > M3 > M6 > M7 > M1 > M11$ (表 2)。

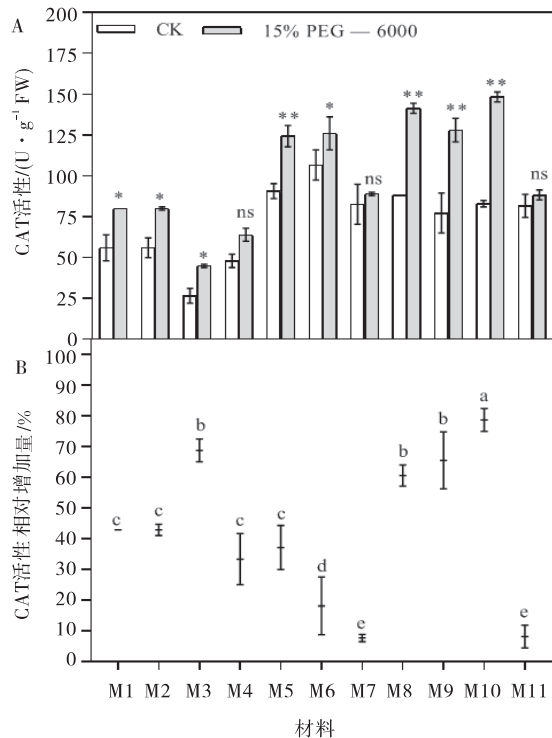


图8 草地早熟禾幼苗叶片 CAT 活性和相对增加量

Fig. 8 CAT activity and relative added value of CAT activity of leaves of Kentucky bluegrass seedlings

表 2 干旱胁迫对草地早熟禾幼苗叶片各指标隶属函数值及耐旱性排序

Table 2 The subordinate function value of seedling leaves in response to drought stress and the ranking of drought tolerance for 11 different Kentucky bluegrass

材料	隶属函数值								平均值	排序
	RWC	MDA	Pro	SS	Chl	SOD	POD	CAT		
M1	0.50	0.64	1.00	0.29	0.00	0.00	0.01	0.50	0.33	10
M2	0.11	0.97	0.24	0.04	0.20	0.67	0.91	0.50	0.55	4
M3	0.00	0.38	0.29	0.69	0.55	0.18	0.09	0.88	0.41	7
M4	0.99	0.31	0.60	0.82	0.57	0.30	0.42	0.36	0.51	6
M5	0.97	0.62	0.00	0.36	1.00	0.07	0.23	0.41	0.52	5
M6	0.74	0.00	0.33	1.00	0.68	0.23	0.36	0.15	0.39	8
M7	0.71	0.36	0.18	0.00	0.41	0.59	0.18	0.00	0.38	9
M8	0.91	1.00	0.84	0.50	0.92	0.10	0.62	0.75	0.73	2
M9	0.81	0.85	0.56	0.42	0.97	0.62	0.17	0.81	0.69	3
M10	1.00	0.78	0.74	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00	0.90	1
M11	0.12	0.03	0.02	0.11	0.01	0.03	0.00	0.01	0.09	11

3 讨论

草坪草体内正常的水分含量对维持其细胞功能至关重要,水分吸收取决于根系的特性和功能,水分的消耗和保持主要受地上部生长和生理活动的控制^[21]。叶片相对含水量是衡量植物组织水分状况及吸水 and 失水动态平衡的重要指标,在一定程度上能体现出植物对干旱胁迫的耐受能力。相对含水量下降速度慢,幅度小,则抗旱性强,反之则弱^[22]。本研究通过模拟干旱胁迫,对 11 种不同生境幼苗期草地早熟禾的耐旱性进行评价,结果表明,干旱胁迫导致 11 种草地早熟禾幼苗相对含水量均有不同程度的下降,这与细叶芒 (*Miscanthus sinensis*)^[23]、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)^[24]、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)^[25]、黑麦草 (*Lolium perenne*)^[26] 等牧草和观赏植物的研究结果一致。其原因可能是干旱胁迫使草地早熟禾根系吸收水分减少,地上部分水分散失率大于地下部的吸收率,进而降低了叶片相对含水量。此外,11 种草地早熟禾叶片相对含水量下降幅度存在差异,这与 Cao 等^[27] 对 12 种薄壳山核桃 (*Carya illinoensis*) 的耐旱性评价结果一致。

丙二醛作为植物细胞膜脂质过氧化的产物之一,是反映氧化损伤程度的重要生理指标^[28]。大量研究表明,干旱胁迫会导致膜系统氧化损伤,MDA 含量增加^[29]。本研究结果表明,干旱胁迫下 11 种不同生境草地早熟禾 MDA 含量增加,且 MDA 含量增加幅度不同。干旱胁迫会引起活性氧自由基增加,使植物细胞遭受氧化胁迫,从而导致细胞膜受损并影响植物生长,赵丽丽等^[30] 报道干旱胁迫引起 19 种高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 种质 MDA 含量上升,这与本研究结果一致。

脯氨酸和可溶性糖是植物体内的渗透调节物质,参与干旱胁迫下植物细胞的渗透调节,可以保护蛋白质结构和稳定膜结构^[31]。宋娅丽等^[33] 研究发现干旱胁迫下黑麦草、高羊茅和早熟禾幼苗通过增加 Pro 和 SS 含量来提高水分吸收。本研究结果显示,干旱胁迫导致草地早熟禾幼苗叶片中 Pro 和 SS 含量增加,这种增加可能分别是蛋白质和淀粉降解的结果^[32]。同样,曹丽等^[34] 对草地早熟禾抗旱性指标测定分析的研究得到了相同的结果。

光合作用是植物体生长发育的物质基础。叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素,能够主导植物的

光合作用,而干旱胁迫会引起叶绿体光合色素含量降低、内囊体膜稳定性和参与光合作用酶活性的改变,导致光合能力下降和光合作用受阻^[35],叶绿素含量的高低能够反映植物的光合特性和抗旱能力^[36]。罗彬莹等^[37] 研究发现干旱胁迫导致樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗中叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a/b 下降,进而引起净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度持续下降。本研究结果表明,干旱胁迫导致 11 种草地早熟禾幼苗叶片的叶绿素含量均有不同程度的降低,推测原因可能是缺水引起植物光合色素降解,以及合成途径受阻,导致光合色素含量下降。Dalal 等^[38] 证实干旱胁迫引起水稻 (*Oryza sativa*) 幼苗 5-氨基乙酰丙酸脱氢酶、胆色素原脱氢酶、原卟啉氧化酶 3 抗体、Mg-原卟啉 IX 氧化酶和叶绿素氧化还原酶等基因的表达量下调,导致相关酶活性降低,进而抑制了叶绿素生物合成中间体(即谷氨酸-1-半醛(GSA),5-氨基乙酰丙酸,Mg-原卟啉 IX 和叶绿素酸酯)的积累。

正常条件下,植物产生的活性氧(ROS)是重要的信号分子,参与植物生长、发育激素反应、逆境胁迫应答和部分生理过程^[39]。干旱胁迫下植物气孔关闭,叶片内 CO₂ 浓度降低,碳同化被抑制,为维持光合电子传递链的正常运行,O₂ 被直接还原为 O₂^{·-},进而积累了过多的 ROS^[35]。研究表明,SOD、POD 和 CAT 是清除 ROS 的重要酶,同时也是评价植物抗逆境的重要指标之一^[40]。本试验结果表明,干旱胁迫下 11 种草地早熟禾材料 SOD、POD 和 CAT 活性显著升高,不同材料增加幅度不同,其中 M10 增加幅度最大,这与董沁等^[41] 的研究结果相一致。

植物抗旱性是由多因素和多基因相互作用构成的一个复杂的性状,利用模糊数学中的隶属函数法对相关抗旱指标进行综合评价,有利于评定出的结果与实际结果较为接近。本试验利用隶属函数法,对 11 种草地早熟禾种质材料苗期所测定的 8 个指标进行综合评价,使得评定结果更加全面可靠地反映各种质资源的耐旱性。

4 结论

干旱胁迫下 11 种草地早熟禾种质材料相对含水量和叶绿素含量显著降低,SOD、POD 和 CAT 活性升高,Pro、MDA 和可溶性糖含量增加。通过隶属函数法用 11 种草地早熟禾种质材料的 RWC 和 Chl 含量

的相对降低量和MDA、Pro、SS、SOD、POD和CAT的相对增加量进行苗期耐旱性综合评价,耐旱性由强到弱排序依次为M10>M8>M9>M2>M5>M4>M3>M6>M7>M1>M11。因此,M10和M8可作为甘肃省和青海省草地早熟禾选育耐旱品种的候选材料。

参考文献:

- [1] 孙吉雄. 草坪学[M]. 北京:中国农业出版社,2008:78—113.
- [2] Zhang X Z, Goatley M, Wu W L, *et al.* Drought-induced injury is associated with hormonal alteration in Kentucky bluegrass [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2019, 14(10): e1651607.
- [3] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295—1304.
- [4] 贺晋云,张明军,王鹏,等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1179—1190.
- [5] 牛奎举,金小煜,李慧萍,等. 甘肃野生草地早熟禾萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. *草地学报*, 2016, 24(5): 1041—1049.
- [6] Staniak M, Kocon A. Forage grasses under drought stress in conditions of Poland [J]. *International Journal of Genomics*, 2015, 37(6): 116.
- [7] Loka D, Harper J, Humphreys M, *et al.* Impacts of abiotic stresses on the physiology and metabolism of cool-season grasses: A review [J]. *Food and Energy Security*, 2019, 8(1): UNSP e00152.
- [8] 田莉华,周青平,卢素锦,等. 不同种类早熟禾苗期抗旱性综合评价[J]. *草地学报*, 2017, 25(3): 561—566.
- [9] 李存福. 草地早熟禾种质资源考察与收集[C]//中国草学会草坪专业委员会2010年学术年会论文集. 北京:中国草学会,2010:26—30.
- [10] 王婧,刘璐,刘骐华,等. 草地早熟禾不同品种苗期耐盐性鉴定[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(18): 36—43.
- [11] 白小明,王靖婷,贺佳圆,等. 8个野生早熟禾种子萌发期耐盐性研究[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 546—555.
- [12] 鲜靖苹,柴澍杰,王勇,等. 镉胁迫对草地早熟禾生长与生理代谢的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(1): 176—186.
- [13] 吕优伟,贺佳圆,白小明,等. 9个野生早熟禾对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价[J]. *草地学报*, 2014, 22(2): 326—333.
- [14] 田莉华,周青平,卢素锦,等. 不同种类早熟禾苗期抗旱性综合评价[J]. *草地学报*, 2017, 25(3): 561—566.
- [15] 方强恩,孙英,白小明,等. 甘肃早熟禾属野生植物资源分布研究[J]. *中国草地学报*, 2010, 32(6): 39—45.
- [16] 杨时海,马玉寿,施建军,等. 三江源区野生草地早熟禾的分布及群落特征[J]. *中国草地学报*, 2008, 30(6): 82—88.
- [17] 李锦萍,李玉玲,白丽娜,等. 青海早熟禾属植物系统修订[J]. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 2: 78—83.
- [18] Niu K, Ma X, Liang G, *et al.* 5-Aminolevulinic acid modulates antioxidant defense systems and mitigates drought-induced damage in Kentucky bluegrass seedlings [J]. *Protoplasma*, 2017, 254(6): 2083—2094.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [20] 路旭平,董文科,张然,等. 外源甜菜碱对镉胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2019, 39(6): 1—10.
- [21] Huang B R, DaCosta M, Jiang Y W. Research Advances in Mechanisms of Turfgrass Tolerance to Abiotic Stresses: From Physiology to Molecular Biology [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2015, 22(2—3): 141—189.
- [22] 朱慧森,王保平,董晓燕,等. 干旱及复水对山西野生草地早熟禾幼苗生长与生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(7): 79—88.
- [23] 陈敏,侯新村,范希峰,等. 细叶芒苗期耐旱性分析[J]. *草业学报*, 2013, 22(3): 184—189.
- [24] 李红,李波,马赫,李祥利. 模拟干旱胁迫对苜蓿幼苗抗氧化酶系统的影响[J]. *草原与草坪*, 2016, 36(4): 54—58.
- [25] 张小娇,祁娟,曹文侠,徐长林. 干旱胁迫对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—59.
- [26] 张博文,李富平,许永利,等. PEG-6000模拟干旱胁迫下五种草本植物的抗旱性[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(8): 2686—2695.
- [27] Cao F, Wei Y C, Wang X W, *et al.* A Study of the Evaluation of the Pecan Drought Resistance of Grafted Pawnee Trees From Different Seedling Rootstocks [J]. *HORTSCIENCE*, 2019, 54(12): 2139—2145.
- [28] Hosseini M S, Samsampour D, Ebrahimi M, *et al.* Effect of drought stress on growth parameters, osmolyte contents, antioxidant enzymes and glycyrrhizin synthesis in licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) grown in the field [J]. *Phytochemistry*, 2018, 156: 124—134.
- [29] Jia X, Sun C S, Li G Y, *et al.* Effects of progressive drought stress on the physiology, antioxidative enzymes and secondary metabolites of *Radix astragali* [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(12): 262.

- [30] 赵丽丽,吴佳海,陈莹,等. 干旱对高羊茅生理特性的影响及抗旱性评价[J]. 中国草地学报,2015,37(4):15-20.
- [31] Lehmann S, Funck D, Szabados L, *et al.* Proline metabolism and transport in plant development [J]. *Amino Acids*, 2010, 39(4): 949-962.
- [32] Asghari B, Khademian R, Sedaghati B. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 263: 109132.
- [33] 宋娅丽,王莎,王克勤,等. 3 种冷季型草坪草苗期对干旱胁迫的生理响应[J]. 草原与草坪,2018,38(3):9-16.
- [34] 曹丽,回振龙,魏小红,徐严. 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+113.
- [35] 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.
- [36] 马碧花,蔺伟虎,高敏,等. 干旱胁迫下水杨酸和内生真菌对多年生黑麦草的影响[J]. 草业学报,2020,29(1): 135-144.
- [37] 罗彬莹,刘卫东,吴际友,等. 干旱胁迫对樟树幼苗光合特性和水分利用的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019,39(5):49-55.
- [38] Dalal V K, Tripathy B C. Modulation of chlorophyll biosynthesis by water stress in rice seedlings during chloroplast biogenesis[J]. *Plant Cell and Environment*, 2012, 35(9):1685-1703.
- [39] Baxter A, Mittler R, Suzuki N. ROS as key players in plant stress signalling[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(5):1229-1240.
- [40] Mostofa M G, Hossain M A, Fujita M. Trehalose pretreatment induces salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings: oxidative damage and co-induction of antioxidant defense and glyoxalase systems[J]. *Protoplasma*, 2015, 252(2): 461-475.
- [41] 董沁,鲁存海,白小明,等. 野生早熟禾 (*Poa* L.) 对模拟干旱的生理响应[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1743-1749.

Physiological responses to drought stress in 11 different kentucky bluegrass germplasm and the evaluation of their drought tolerance

ZHANG Ran¹, LI Jia-jin¹, WANG Ming¹, JI Ling-he¹, HOU Xuan¹,
MA Xiang², MA Hui-ling¹

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou, 730070, China;
2. Academy of Animal Science and Veterinary, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: In order to evaluate the drought tolerance of 11 kentucky bluegrass germplasm, the seeds were planted in the seedling bowls. Drought stress treatment was simulated by imposing 15% PEG-6000 when the seedlings had four-five true leaves. The relative water content (RWC), chlorophyll (Chl), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), proline (pro), malondialdehyde (MDA) and soluble sugar (SS) were measured. The results showed that under drought stress, RWC and Chl decreased significantly, while SOD, POD, CAT, Pro, MDA and SS increased to some extent. Drought tolerance of 11 bluegrass varieties were assessed using the subordinate function, with the ranking as 10-202 > Qinzhou > Rugby > Midnight 2 > Qingshui > 10-130 > 09-085 > Tianshui > Liberator > Bluemoon > 09-61. Therefore, 10-202 and Qinzhou could be used as the potential germplasm for breeding drought resistant varieties.

Key words: kentucky bluegrass; PEG stress; seedling stage; physiological responses