

干旱胁迫对红豆草根系生长及生理特性的影响

陈洁,温素军,梁鹏飞,李景峰,魏少萍,刘鑫,南丽丽*

(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:采用不同浓度PEG-6000模拟干旱胁迫(渗透势分别为0、-0.4、-0.8、-1.2、-1.6和-2.0 MPa),研究干旱胁迫对5份红豆草材料根系生长及生理指标的影响,并对其苗期抗旱性进行分析和评价。结果表明:随干旱胁迫的加剧,供试红豆草的根冠比、根表面积、根尖数、根系可溶性蛋白、根系可溶性糖、根系活力均先增加后下降,根系平均直径、根体积、叶片相对含水量下降,根长和丙二醛含量增加;重度胁迫下,材料P1的根体积、根表面积、根直径降幅最小、丙二醛含量最低,材料P2的可溶性蛋白含量增幅最大,甘肃红豆草的根冠比降幅最小、可溶性糖含量增幅最大,蒙农红豆草的根系活力、根尖数降幅最低,根长最长。经隶属函数法分析得出供试红豆草的抗旱性顺序为:材料P1>P3>P2>甘肃红豆草>蒙农红豆草,主成分分析显示根直径、脯氨酸、可溶性糖可作为筛选抗旱红豆草的参考指标。

关键词:红豆草;PEG胁迫;根系形态特征;根系生理特性;抗旱性评价

中图分类号:S541+.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)06-0101-09

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2022.06.014



红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)是豆科多年生草本植物,因其富含蛋白质、氨基酸、粗脂肪和矿物质,被誉为“牧草皇后”^[1],可用于青饲、青贮、放牧、晒制青干草、加工草粉、配合饲料和多种草产品,因茎叶含有单宁,可沉淀在瘤胃中形成大量泡沫性的可溶性蛋白质,故反刍家畜在青饲、放牧时不易发生膨胀病。

我国干旱和半干旱地区的面积约占国土面积的52.5%^[2],干旱胁迫对农作物造成的损失在所有非生物胁迫中占首位^[3]。我国审定登记的红豆草品种数量较少^[4],培育和应用抗旱红豆草品种能使干旱地区的红豆草增产、稳产。红豆草对病害^[5]、干旱^[6]、盐渍^[7]、霜冻^[8]、低磷^[9]等逆境均有较好耐受性,但不同品种之间抗性差异较大。当出现干旱胁迫时,根系能最先感

知土壤中的水分亏缺并做出相应反应^[10],其中根系形态结构及生理特性反映了植物抗旱的形态基础和生理基础^[11-13]。为此,本试验以5份红豆草为试验材料,利用PEG-6000模拟干旱环境,研究干旱胁迫对红豆草根系生长及生理特性的影响,以期筛选出抗旱性较强的红豆草材料以及与抗旱密切相关的指标,为红豆草抗旱育种提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

利用杂交选育的3个红豆草品系,编号分别为P1, P2, P3^[14],对照为甘肃红豆草(*O. viciaefolia* cv. Gansu, CK1)和蒙农红豆草(*O. viciaefolia* cv. Mengnong, CK2)。

1.2 试验设计

试验采用PEG-6000(聚乙二醇6000)模拟干旱条件。将500 g消毒后的细沙装入塑料杯,经H₂O₂溶液消毒后的供试红豆草种子播种在塑料杯,每隔2 d浇灌50 mL Hoagland营养液;待幼苗生长至第42天,设置6个水势梯度:0(对照,CK)、-0.4、-0.8、

收稿日期:2021-06-29;修回日期:2021-07-23

基金项目:甘肃农业大学科技创新基金(青年导师扶持基金)(GAU-QDFC-2018-14)

作者简介:陈洁(1998-),女,甘肃天水人,硕士研究生。

E-mail:748722517@qq.com

*通信作者。E-mail:nanll@gsau.edu.cn

-1.2、-1.6和-2.0 MPa,并于处理7 d后采集红豆草幼苗测定相关生理指标,每个处理5次重复。

1.3 测定指标与方法

采用烘干法分别测定每盆植株地下部分(根系)、地上部分(茎、叶)的干物质量并计算根冠比(根干物质量/地上部干物质量)。将各处理的根系用蒸馏水冲洗干净,采用台式扫描仪对根系进行扫描并将图像存入电脑,扫描仪的分辨率为300 dpi。采用WinRHIZO根系分析系统软件对根系图像进行分析,获得根系总长度(Root length, RL)、根系总表面积(Total root surface, TRS)、根系平均直径(Average root diameter, ARD)、根体积(Root volume, RV)和根尖数(Root tip number, RTN)等特征参数。

生理指标测定参考邹琦^[15]的方法,其中根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定,可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量采用蒽酮比色法测定,可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量采用考马斯亮蓝G-250染色法测定,丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定;叶片相对含水量(Relative water content, RWC)采用饱和称重法测定;游离脯氨酸(Proline, Pro)含量采用酸性茚三酮比色法测定;超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定;过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性采用愈创木酚法测定。

1.4 统计分析

用Excel整理数据,SPSS 16.0统计软件进行方差分析、聚类分析和主成分分析,不同处理之间用Duncan方法进行多重比较。应用Fuzzy数学中隶属度函数法进行综合评判,与抗旱性呈正相关的参数如RWC、SS、Pro、SP、SOD、POD和根系活力计算公式为:

$$F_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$$

对与抗旱性呈负相关的MDA计算公式为:

$$F_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$$

式中: F_{ij} 为*i*品种*j*性状测定的具体隶属值; X_{ij} 为*i*品种*j*性状测定值; $X_{j\min}$ 为*j*性状中测定的最小值; $X_{j\max}$ 为*j*性状中测定的最大值。

权重应用客观赋权法进行计算:

$$I_j = C_j / S_j$$

式中, I_j 是一个无量纲数,表示某评价指标在干旱胁迫下的测定值相对于对照组的比值。 C_j 为第*j*个指

标正常组的测定值, S_j 为第*j*个指标在某个胁迫处理下所测定的平均值。如果是负相关,计算式为:

$$I_j = S_j / C_j$$

最后通过归一化,计算出每个评价指标的权重:

$$W_j = I_j / \sum I_j^{[16]}$$

综合评价价值:

$$D = \sum (F_{ij} \times W_j)^{[16]}。$$

2 结果与分析

2.1 红豆草材料间根系形态特征的差异

供试红豆草根冠比、根表面积和根尖数均随水势梯度的增加呈先增加后减小趋势($P < 0.05$),且在-0.8 MPa时达到最大值,与0 MPa相比,CK1的根冠比、CK2的根表面积及材料P2的根尖数增幅较大;除CK1的根冠比在0 MPa时最小外,供试红豆草根冠比、根表面积和根尖数均在-2.0 MPa时最小。供试红豆草根直径和根体积随胁迫程度加剧呈显著下降趋势($P < 0.05$),在-2.0 MPa下,P1、P2、P3、CK1和CK2的根直径和根体积均降至最小值。干旱胁迫显著增加供试红豆草根长($P < 0.05$),且在-2.0 MPa时增至最大值(图1)。

2.2 红豆草材料间生理特性的差异

2.2.1 RWC、SP、SS和Pro含量的变化 由图2可知,供试红豆草RWC随胁迫程度加剧呈不断下降趋势。-2.0 MPa处理下,其RWC降至最小值,且材料P1、P2的RWC显著高于其他材料($P < 0.05$);除材料P2外,其余材料的SP含量均随胁迫程度加剧先增加后下降。-2.0 MPa处理下,P2的SP含量增至最大值,其余材料均在-0.8 MPa处理下,SP含量增至最大值,而-2.0 MPa处理下,SP含量均降至最低,且材料P1的SP含量显著低于其他材料($P < 0.05$);除材料P2、CK2外,其余材料的SS含量均随胁迫程度加剧先增加后下降。-2.0 MPa下,材料P2、CK2的SS含量增至最大值,分别为0 MPa的1.47、1.49倍($P < 0.05$),其余材料均在-0.8 MPa下其SS含量增至最大,-2.0 MPa下其SS含量均降低,且CK1的SS含量显著低于其他材料($P < 0.05$);供试红豆草Pro含量均随胁迫程度加剧先增加后下降。-1.6 MPa处理下,材料P2的Pro含量增至最高,增幅为226.21%($P < 0.05$),其余材料均在-1.2 MPa处理下其Pro含量增至最大,-2.0 MPa处理下Pro含量均下降但均高于0 MPa。

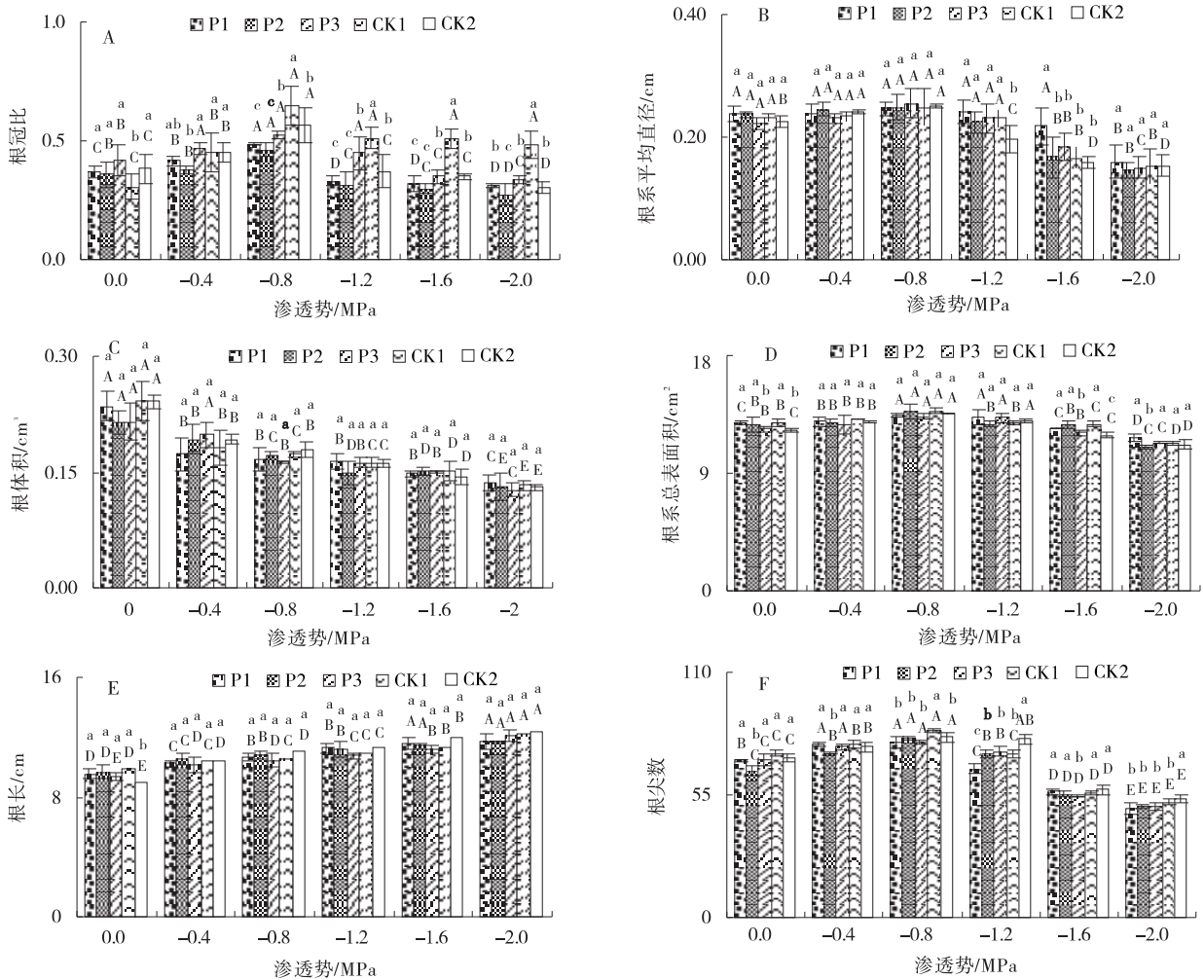


图1 干旱胁迫下红豆草的根系形态特征

Fig. 1 Effects of drought stress on root morphological characteristics of sainfoin

注: 图内数据为平均值±标准误。不同小写字母表示同一胁迫水势下不同材料间差异显著($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一材料在不同胁迫水势下差异显著($P < 0.05$), 下同

2.2.2 SOD和POD活性变化 供试红豆草SOD和POD活性均随胁迫程度加剧先升高后降低(图3)。-0.8 MPa胁迫下, 供试红豆草的SOD活性均增至最高, -2.0 MPa胁迫下其SOD活性均降至最低, 且CK2的SOD活性显著低于其他材料($P < 0.05$); 材料P1、P2和P3的POD活性均在-1.2 MPa胁迫下增至最大, 而CK1和CK2的POD活性均在-0.8 MPa胁迫下达到峰值, 增幅分别为13.92%和10.90%, -2.0 MPa胁迫下供试红豆草POD活性均降至最小, 且材料间差异不显著。

2.2.3 MDA和根系活力变化 干旱胁迫显著增加了供试红豆草的MDA含量($P < 0.05$), 在-2.0 MPa胁迫下均增至最大, P1、P2、P3、CK1和CK2的增幅分别为241.60%、158.31%、168.28%、62.98%和

265.18%; 随水势梯度增加供试红豆草根系活力呈先增加后减小趋势, -0.8 MPa时均达到最大, 与0 MPa相比, P1、P2、P3、CK1和CK2的根系活力增幅分别为83.97%、76.02%、122.67%、78.31%和102.02%; 除CK2的根系活力在-1.6 MPa胁迫下最小外, 其余材料均在-2.0 MPa胁迫时其根系活力降至最小(图4)。

2.3 性状相关性分析

除根长与根冠比、根直径、根体积、根表面积、根尖数均呈负相关外, 各根系形态指标两两间均呈正相关; 除根长与MDA含量呈极显著正相关、与其他生理指标基本呈负相关外, 各根系形态指标与各生理指标基本均呈正相关, 各生理指标两两间基本均呈正相关(表1)。

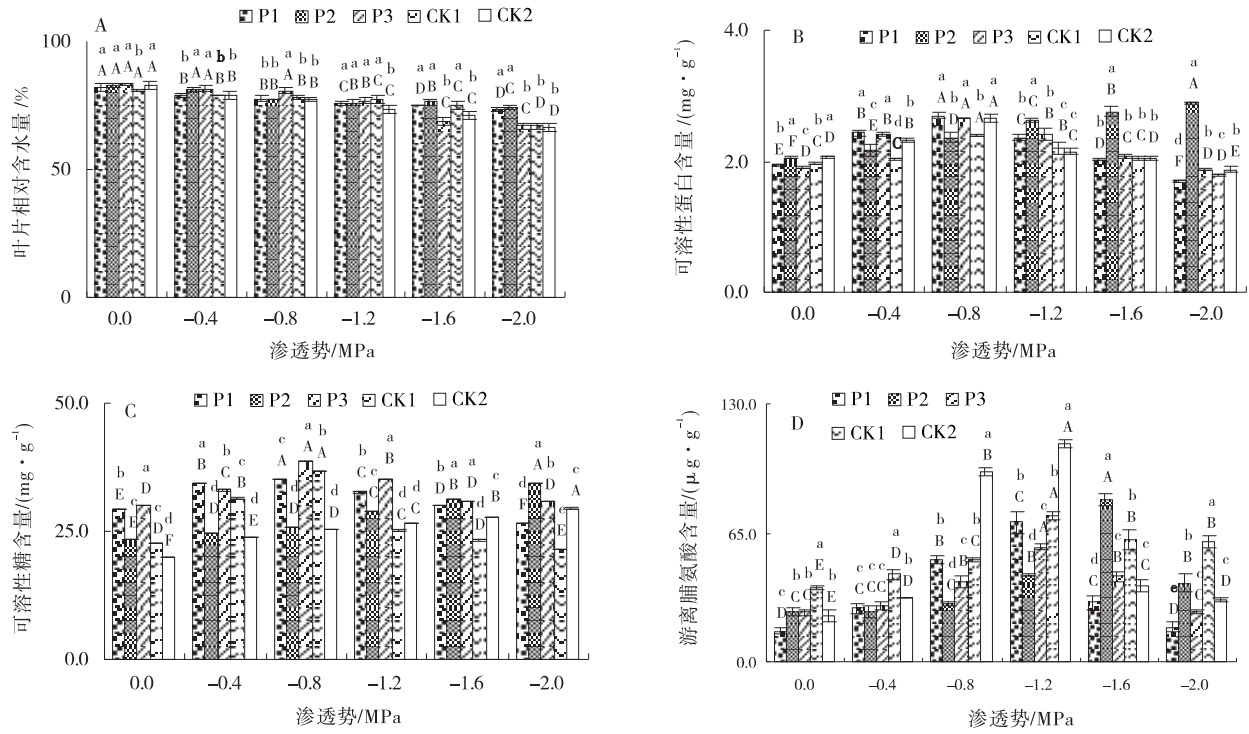


图2 干旱胁迫下对红豆草叶片的相对含水量和渗透调节物质含量

Fig. 2 Relative water content and contents of osmotic adjustment substances in sainfoin leaf under drought stress

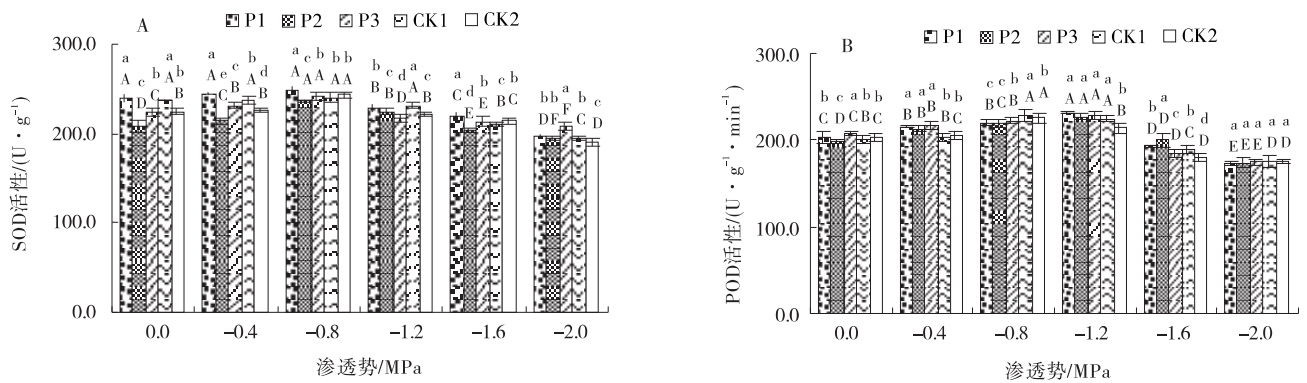


图3 干旱胁迫下红豆草的抗氧化酶活性

Fig. 3 SOD and POD activities in sainfoin under drought stress

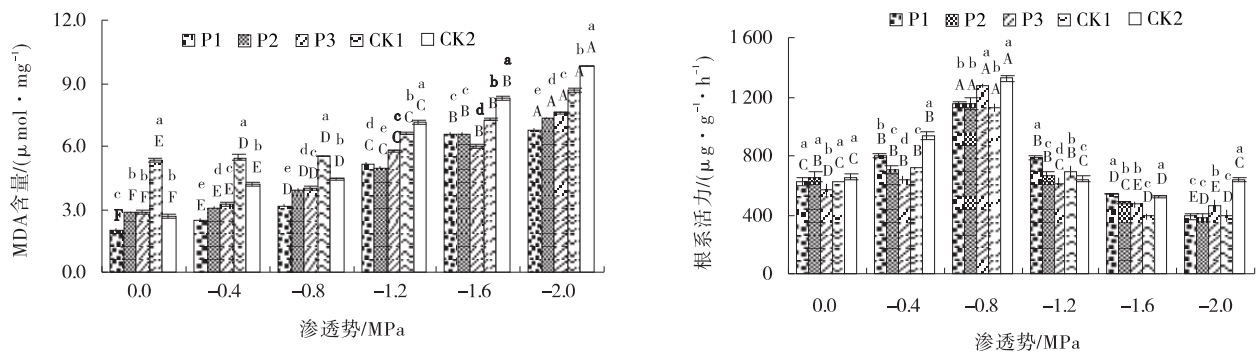


图4 干旱胁迫对红豆草MDA含量和根系活力的影响

Fig. 4 Effects of drought stress on MDA content and root activity in sainfoin

表 1 干旱胁迫下各性状的相关性
Table 1 Correlation between characters of sainfoin under drought stress

指标	根冠比	根直径	根体积	根表面积	根长	根尖数	可溶性糖	可溶性蛋白	脯氨酸	叶片含水量	歧化酶	过氧化物酶	丙二醛	根系活力
根冠比	1.000													
根直径	0.467**	1.000												
根体积	0.098	0.632**	1.000											
根表面积	0.590**	0.859**	0.389*	1.000										
根长	-0.205	-0.709**	-0.933**	-0.463**	1.000									
根尖数	0.590**	0.878**	0.529**	0.853**	-0.612**	1.000								
可溶性糖	0.133	0.127	-0.295	0.194	0.085	0.142	1.000							
可溶性蛋白	0.190	0.321	-0.132	0.416*	-0.031	0.373*	0.510**	1.000						
脯氨酸	0.270	-0.032	-0.301	0.313	0.335	0.175	-0.003	0.353	1.000					
叶片含水量	0.248	0.781**	0.828**	0.607**	-0.905**	0.670**	-0.005	0.239	-0.214	1.000				
歧化酶	0.533**	0.840**	0.498**	0.819**	-0.572**	0.854**	0.259	0.334	0.077	0.604**	1.000			
过氧化物酶	0.508**	0.844**	0.338	0.889**	-0.454*	0.864**	0.280	0.528**	0.334	0.598**	0.761**	1.000		
丙二醛	-0.226	-0.814**	-0.773**	-0.573**	0.866**	-0.651**	-0.066	-0.244	0.335	-0.864**	-0.667**	-0.578**	1.000	
根系活力	0.631**	0.731**	0.206	0.743**	-0.276	0.765**	0.267	0.496**	0.171	0.374*	0.738**	0.682**	-0.463**	1.000

2.4 主成分分析

前3个主成分的贡献率分别为53.999%、19.753%、8.710%，累计贡献率为82.461%。其中第1、2、3主成分各自的特征值分别为7.560、2.765、1.219，对应较大的特征向量分别是根直径、Pro、SS含量，因此这3个指标可以作为红豆草抗旱性筛选与评价的重要指标(表2—3)。

表2 各综合指标特征值及贡献率

Table 2 Eigenvalue and contribution of each comprehensive index

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	7.560	53.999	53.999
2	2.765	19.753	73.752
3	1.219	8.710	82.461

2.5 红豆草苗期抗旱性综合评价

隶属函数分析克服了依靠单一指标评价的弊端，能对植物的抗逆性做出客观、合理、全面的评价。利用14项指标的隶属函数加权平均值对5份红豆草抗旱能力进行综合评价，其中材料P1抗旱性最好，材料P3次之，CK2最差(表4)。

3 讨论

根系是植物吸收水分和养分的主要部位，也是对干旱胁迫最先起反应的部位^[12]。研究表明，干旱胁迫

表3 各因子载荷矩阵

Table 3 Matrix of factor loading

指标	主成分		
	1	2	3
根冠比	0.073	0.140	0.291
根直径	0.127	-0.018	0.006
根体积	0.087	-0.249	0.105
根表面积	0.117	0.103	0.128
根长	-0.100	0.216	0.042
根尖数	0.123	0.049	0.114
可溶性糖	0.024	0.177	-0.612
可溶性蛋白	0.055	0.206	-0.367
脯氨酸	0.006	0.254	0.380
叶片含水量	0.109	-0.153	-0.083
歧化酶	0.118	0.044	0.004
过氧化物酶	0.115	0.117	0.024
丙二醛	-0.110	0.149	0.181
根系活力	0.100	0.145	0.020

下根长、根系表面积和根体积较大，有利于植物大范围吸收土壤水分和养分^[17]。厉广辉等^[11]和 Pirnajmedin等^[18]研究认为，根系干重、根系体积、根系总吸收面积与品种抗旱能力呈显著正相关。Wang等^[19]研究认为，干旱胁迫显著降低了高羊茅的根系生物量和根系总长度，而抗旱型品种的根系生物量和根系总长度降幅较小。本研究表明，-0.8 MPa胁迫时，供试红豆草的根冠比、根系总表面积、根系平均直径、根体积、根尖数和根系活力均显著增加；随胁迫程度增加

表4 红豆草幼苗期抗旱指标隶属值及综合评价

Table 4 The membership value and comprehensive evaluation for drought resistance on sainfoin seedlings

指标	P1		P2		P3		CK1		CK2	
	F_{ij}	W_j	F_{ij}	W_j	F_{ij}	W_j	F_{ij}	W_j	F_{ij}	W_j
根冠比	0.348	0.066	0.267	0.073	0.464	0.069	0.704	0.042	0.421	0.064
根系活力	0.379	0.060	0.319	0.073	0.336	0.062	0.305	0.076	0.462	0.057
根平均直径	0.619	0.072	0.526	0.081	0.552	0.074	0.524	0.081	0.481	0.076
根体积	0.273	0.099	0.291	0.093	0.297	0.092	0.299	0.108	0.307	0.099
根表面积	0.583	0.066	0.529	0.069	0.521	0.067	0.597	0.071	0.505	0.065
根长	0.568	0.057	0.579	0.060	0.524	0.059	0.575	0.063	0.659	0.053
根尖数	0.488	0.071	0.512	0.068	0.520	0.073	0.572	0.077	0.601	0.069
叶片含水量	0.578	0.071	0.618	0.073	0.505	0.076	0.522	0.076	0.416	0.075
可溶性蛋白含量	0.455	0.057	0.723	0.056	0.492	0.057	0.326	0.067	0.425	0.062
可溶性糖含量	0.630	0.060	0.480	0.057	0.732	0.061	0.411	0.059	0.357	0.050
脯氨酸含量	0.271	0.036	0.321	0.047	0.269	0.048	0.472	0.049	0.510	0.035
过氧化物酶活性	0.580	0.065	0.581	0.065	0.564	0.069	0.543	0.069	0.476	0.067
超氧化物歧化酶活性	0.657	0.069	0.437	0.066	0.563	0.069	0.577	0.075	0.510	0.068
丙二醛含量	0.637	0.152	0.594	0.120	0.575	0.124	0.399	0.087	0.389	0.160
综合评价值	0.461		0.411		0.436		0.403		0.390	
排序	1		3		2		4		5	

(-0.8~-2.0 MPa胁迫),供试红豆草的根冠比、根系总表面积、根系平均直径、根体积、根尖数和根系活力均显著下降。重度胁迫下,材料P1的根体积、根表面积、根直径降幅最低,CK1的根冠比降幅最小,CK2的根系活力和根尖数降幅最低、根长最长。说明干旱胁迫下,根体积、根表面积、根直径较高可能是红豆草抗旱能力较强的重要原因。

植物抗旱性与植物的水分状况密切相关。本试验中,干旱胁迫显著降低了供试红豆草的RWC,且CK2的RWC降幅最大,说明CK2的叶片保水能力较其他供试红豆草差,对干旱环境的适应能力较弱。

可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸作为重要的渗透调节物质,干旱胁迫下其含量迅速增加,能降低渗透势,维持膨压,这是植物适应干旱胁迫的一种重要机制^[20-21]。本研究显示,整个胁迫期间,材料P2的SP含量增幅最大,CK1的SS调节作用最强,P1、CK2的Pro含量增幅最大。说明干旱胁迫下,供试红豆草的渗透调节能力因材料不同而异,且不同材料对不同生理指标的敏感性亦不同。

植物在遭受环境胁迫时,活性氧会大大增加^[22],SOD、POD是有效的保护酶^[23]。本研究发现,干旱胁迫显著增加了供试红豆草的MDA含量,说明供试红豆草的膜脂过氧化水平随干旱胁迫程度增加而显著增加,这与以往的研究结果一致^[24];相比之下,材料P1的MDA含量低于其他供试材料,说明P1膜系统受到外界环境的伤害较小,能够保持较高的细胞膜相对完整性,间接地体现出较好的抗旱性。供试红豆草的SOD和POD活性随着干旱程度的增加先升高后降低,其SOD活性均在-0.8 MPa胁迫时显著增加,材料P1、P2、P3的POD活性则在-1.2 MPa胁迫时显著增加。说明在轻中度干旱条件下,植物能够促进抗氧化酶的合成,使抗氧化酶具有较高的活性,但随着干旱胁迫的增加,干旱胁迫强度超出植物忍受范围,植物体内抗氧化酶合成系统失调,导致抗氧化酶活性降低^[25]。整个胁迫期间,材料P1的抗氧化酶(SOD、POD)活性最大,说明抗旱性强的材料其POD和SOD活性存率高,这与前人研究结论一致^[26]。本研究发现,供试红豆草根系活力随水势梯度的增加呈先增高后降低趋势,这与前人研究结论一致^[27]。说明在轻度

干旱胁迫下,植物体内调节促进了根系生长并提高了根系活力,在重度干旱条件下,植物内环境失调,植物难以促进根系生长,致使根系活力降低。

主成分分析表明第1、2、3主成分的累计贡献率为82.461%,主要特征值分别为根直径、Pro、SS含量,前面的分析也表明这3个指标与红豆草耐旱性关系密切,可作为红豆草耐旱性评价指标。

4 结论

采用营养液沙培法,以不同PEG-6000浓度模拟干旱胁迫,运用Fuzzy数学隶属函数综合评判法对5份红豆草的根系形态及生理指标进行综合分析,得出材料P1、P2、P3的抗旱性优于甘肃红豆草和蒙农红豆草,且P1抗旱性最好。干旱胁迫下,根直径、脯氨酸、可溶性糖可作为筛选耐旱红豆草的参考指标。本试验为培育抗旱红豆草新品种提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 肖占文,张俐,刘金荣. 人工种植红豆草对灰棕荒漠土改土效应的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 199-202.
- [2] 宋家壮,李萍萍,付为国. 水分胁迫及复水对藜草生理生化特性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 62-69.
- [3] Anjum S A, Ashraf U, Zohaib A, *et al.* Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: A review [J]. *Zemdirbyste Agriculture*, 2017, 104 (3): 267-276.
- [4] 全国草品种审定委员会. 中国审定登记草品种集(1999-2006)[M]. 北京:中国农业出版社, 2008.
- [5] 李彦忠,聂红霞. 甘肃省红豆草病原真菌鉴定及病害发生动态调查[J]. 植物保护学报, 2016, 43(2): 222-232.
- [6] 于闯,南丽丽,魏永鹏. 不同红豆草材料苗期抗旱性综合评价[J]. 草原与草坪, 2017, 37(4): 74-80.
- [7] 伍国强,李辉,雷彩荣,等. 添加KCl对高盐胁迫下红豆草生长及生理特性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(6): 45-55.
- [8] 田丰,于闯,付双军,等. 7份红豆草对低温的生理响应及抗寒性评价[J]. 甘肃农业科技, 2018(10): 21-26.
- [9] 江海慧,汪堃,陈洁,等. 低磷胁迫对红豆草新品系幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 95-101.
- [10] 汪攀,陈奶莲,邹显花,等. 植物根系解剖结构对逆境胁迫响应的研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2):

- 550—556.
- [11] 厉广辉,万勇善,刘凤珍,等. 不同抗旱性花生品种根系形态及生理特性[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 531—541.
- [12] 张翠梅,师尚礼,吴芳. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 868—882.
- [13] Shahidi R, Yoshida J, Coughon M, *et al.* Morpho-physiological responses to dehydration stress of perennial ryegrass and tall fescue genotypes[J]. Functional Plant Biology, 2017, 44(6): 612—623.
- [14] 南丽丽,温素军,魏凡,等. 红豆草新品系的草产量及营养价值研究[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 383—388.
- [15] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 110—174.
- [16] 陈文荣,曾玮玮,李云霞,等. 高丛蓝莓对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性综合评价[J]. 园艺学报, 2012, 39(4): 637—646.
- [17] 丁红,张智猛,戴良香,等. 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5169—5176.
- [18] Pirnajmedin F, Majidi M M, Gheysari M. Root and physiological characteristics associated with drought tolerance in Iranian tall fescue [J]. Euphytica, 2015, 202(1): 141—155.
- [19] Wang J P, Bughrara S S, Nelson C J. Morpho-physiological responses of several fescue grasses to drought stress[J]. Hort Science, 2008, 43(3): 161—173.
- [20] 易家宁,王康才,张琪琦,等. 干旱胁迫对紫苏生长及品质的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(6): 1320—1326.
- [21] 郭瑞,周际,杨帆,等. 拔节孕穗期小麦干旱胁迫下生长代谢变化规律[J]. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1319—1327.
- [22] 范苏鲁,苑兆和,冯立娟,等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 651—657.
- [23] 何建社,张利,刘千里,等. 岷江干旱河谷区典型灌木对干旱胁迫的生理生化响应[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2362—2371.
- [24] 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.
- [25] 郑清岭,杨冬艳,刘建文,等. 干旱胁迫对沙芥和斧形沙芥幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(4): 600—608.
- [26] 张新兰. 不同品种苜蓿叶片离体干旱胁迫过程中抗氧化酶活性动态[J]. 草业科学, 2008, 25(2): 77—83.
- [27] 安玉艳,梁宗锁. 植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2907—2915.

Effects of drought stress on root growth and physiological characteristics of sainfoin

CHEN Jie, WEN Su-jun, LIANG Peng-fei, LI Jing-feng, WEI Shao-ping,
LIU Xin, NAN Li-li*

(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: PEG—6000 was used to simulate drought stress, and the effects of PEG-6000 concentrations (0, —0.4, —0.8, —1.2, —1.6, and —2.0 MPa) on seedling root growth and physiological indexes of 5 samples of sainfoin were studied. The drought resistance in seedling stage was also analyzed and evaluated. The five sainfoin samples including 3 sainfoin lines (P1, P2, P3), *Onobrychis viciaefolia* ‘Gansu’ (CK1) and *O. viciaefolia* ‘Meng-nong’ (CK2). The results showed that root shoot ratio, total root surface, root tip number, contents of soluble protein and soluble sugar increased first and then decreased, average root diameter and root volume significantly de-

creased, root length and MDA content significantly increased with the increasing of PEG—6000 concentration. Under severe stress, root volume, total root surface, average root diameter of P1 decreased the least, and MDA content of P1 was the lowest. The Root soluble protein content of P2 increased the most. Root shoot ratio of CK1 decreased the least, whereas soluble sugar content of CK1 increased the most. Root activity and root tip number of CK2 decreased the least, and root length of CK2 was the longest. According to the membership function analysis, the drought resistance order of the tested sainfoin was as follows: P1>P3>P2>CK1>CK2. Principal component analysis indicated average root diameter, proline, and soluble sugar were the most suitable indicators for the tolerance to drought.

Key words: sainfoin; PEG stress; root morphological characters; root physiological traits; drought resistance evaluation

(上接 100 页)

Effects of exogenous gibberellin on seed germination characteristics of *Elytrigia* species

TIAN Xiao-xia, MENG Qing-yi, MAO Pei-chun, ZHENG Ming-li, MENG Lin*

(*Institute of Grassland, Flowers and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China*)

Abstract: Promoting the seed germination of *Elytrigia* species is the key to the successful establishment of cultivated grassland. In this study, the seed germination and physiological characteristics of *E. elongata*, *E. intermedia* and *E. repens* were studied by soaking the seeds in the different concentrations of exogenous gibberellin GA₃ solution (0, 500, 1 000, 1 500, and 2 000 mg/L). The results showed that with the increase of GA₃ concentration, the seed germination rate and germination potential of the three *Elytrigia* species were significantly increased. The 1 500 mg/L GA₃ concentration was the most suitable concentration for breaking seed dormancy and improving germination. After soaking the seeds with GA₃ solution, both radicle length and sprout length were promoted. The IAA and GA₃ contents of seeds were increased, while the ABA content was decreased. Furthermore, the POD activity of the sprouts of three *Elytrigia* species was increased, while the content of MDA was decreased. In conclusion, seed soaking with 1 500 mg/L exogenous gibberellin GA₃ could regulate the endogenous hormone content and promote seed germination. The results provide an important theoretical basis for the efficient seed production and grassland establishment of *Elytrigia* species.

Key words: *Elytrigia* species; gibberellin GA₃; seed germination; physiological characteristics