

入侵植物少花蒺藜草对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价

陈佳宁¹,冯海旭^{1,2},苏慧¹,罗亚勇³,周立业^{1*}

(1. 内蒙古民族大学农学院,内蒙古 通辽 028000;2. 山西农业大学,山西 太原 030031;3. 中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要:【目的】探究入侵植物少花蒺藜草(*Cenchrus pauciflorus*)及本地伴生种狗尾草(*Setaria viridis*)对干旱胁迫生理响应的差异。【方法】以2种植物幼苗为研究对象,采用聚乙二醇(PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫环境,设置4个处理水平,对照、轻度、中度、重度胁迫,相对应的PEG浓度分别为0%、5%、10%、15%,测定2种植物的相对含水量(RWC)、叶绿素(Chl)含量以及保护酶活性、可溶性蛋白(SP)含量等生理指标,利用隶属函数分析法进行抗旱性综合评价。【结果】1)随着胁迫程度的增强,2种植物的游离氨基酸(FAA)、可溶性蛋白含量,过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性均呈先增加后降低的趋势,RWC呈逐渐降低的趋势,丙二醛(MDA)和可溶性糖(SS)含量则持续增加,少花蒺藜草的Chl含量呈逐渐降低的趋势,狗尾草的Chl含量呈先降低后升高的趋势;2)少花蒺藜草的POD活性在中度干旱胁迫时活性最高,为224.867 $\mu\text{g/g}$,狗尾草在中度干旱胁迫时CAT活性最高,为72.667 $\mu\text{g/g}$;3)抗旱性综合评价表明,2种植物幼苗的抗旱水平基本相同。【结论】2种植物在干旱胁迫时表现出不同的生理特征变化以适应干旱生境,生理响应虽存在差异,但均具有较强的耐旱性。

关键词:少花蒺藜草;狗尾草;干旱胁迫;耐受性

中图分类号:S541 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)03-0077-07

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2023.03.010



外来入侵生物对入侵地生态环境及生态系统的功能、结构产生严重的干扰与危害,并对自然生态系统的生产力和全球的农业生产构成了严重的威胁^[1]。外来入侵植物作为一类能够快速入侵新生境的物种,对环境条件的多变性和异质性有着独特的适应机制。禾本科少花蒺藜草(*Cenchrus pauciflorus*)属一年生草

本植物,自1983年有记载以来已经成为科尔沁沙地最为严重的入侵杂草之一^[2]。在干旱条件下,少花蒺藜草通过调整生物构件如降低分株高度,减少穗生物量的生存对策来适应当地环境^[3]。少花蒺藜草入侵的生境包括林间草地、撂荒地和田间地头,主要以沙地为主,因此我国的沙壤土区域均有一定程度的入侵风险^[4]。

科尔沁沙地地处我国北方半干旱农牧交错区,植被稀疏、风大沙多、水土流失严重,常年干旱少雨,生态环境极为脆弱^[5]。近年来,少花蒺藜草在科尔沁沙地及周边地区快速蔓延,严重影响了草地资源的正常利用及群落组成,加剧了土壤沙漠化,使本来脆弱的生态系统进一步恶化,给当地农牧民日常生活和畜牧业生产带来严重影响^[6]。少花蒺藜草的幼苗一旦存活便迅速扩展蔓延,形成特有的干旱适应机制^[7]。禾本

收稿日期:2022-03-21; **修回日期:**2022-05-24

基金项目:内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFDZ0028);内蒙古自然科学基金联合项目(2019LH03022);内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0041-005);国家自然科学基金(42142027)

作者简介:陈佳宁(1998-),男,内蒙古通辽市人,硕士研究生。E-mail:1120138440@qq.com

*通信作者。E-mail: toni2002@126.com

科狗尾草属狗尾草(*Setaria viridis*)是科尔沁沙地植被恢复演替过程中留存下来的土著杂草,在不同沙漠化类型的生境下都有分布,狗尾草抗性基因丰富,对非生物胁迫耐受能力强,是研究耐热、耐旱、耐盐等胁迫反应的重要模式植物^[8]。

入侵植物在入侵过程中常遭遇干旱胁迫,并显示出较强的适应性,但不同植物表现出不同的适应机制,通常表现为降低蒸腾速率、关闭气孔、提高水分利用率、启动渗透调节物质和提高抗氧化酶活性以及增加光合能力等方式,来抵抗干旱胁迫对植物造成的影响。可见,入侵植物对干旱胁迫存在一定的生理适应机制。通过分析少花蒺藜草及本地伴生种狗尾草对水分胁迫的生理响应,以期明确少花蒺藜草在干旱生境下的独特生理适应机制,预测少花蒺藜草种群扩散的潜在范围,为减少和控制少花蒺藜草的扩散和蔓延提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料及试验地概况

供试少花蒺藜草和狗尾草种子在2020年10月采集于通辽市四合屯无人干扰的人工种植疏林草地(N 43°40', E 122°04')。海拔187 m,年平均气温5.6℃,年均日照3 000 h,≥10℃积温3 000~3 200℃,全年无霜期147 d,年降水量350~400 mm,降水大多集中在6~8月,蒸发量是降水量的5倍左右,年平均风速为3~4.4 m/s,全年8级以上大风日数25 d左右,该区的地貌类型以流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘和草地等交错分布为主^[9]。

1.2 试验设计

试验采用室内盆栽法,利用PEG-6000溶液模拟干旱胁迫环境,设置5%(轻度,LD)、10%(中度,MD)、15%(重度,SD)3个浓度处理,0(CK)为对照,每个处理3次重复。试验前将沙壤土与蛭石按1:1的比例混合,放置在花盆(上口径20 cm,高13.5 cm)内,装填至距离盆口5 cm处,并称量饱和持水量(约509 g)及田间持水量(约36%)。将大小一致、籽粒饱满的种子置于去离子水中浸泡24 h,浸泡后的种子用浓度为2%的次氯酸钠溶液消毒30 min,然后用蒸馏

水洗涤5~6遍,吸干水分,种在预先准备好的花盆中,少花蒺藜草和狗尾草各种12盆,每盆播种50粒种子,覆土2~3 cm后压实浇水。将所有花盆置于相同的室内环境下,苗期保持充足的水分,待植株长出2~3片真叶时定苗,每盆留40株长势均匀的幼苗,定苗后当幼苗株高达到15 cm左右时停止浇水,使土壤含水量保持在田间持水量,并按照饱和持水量一次性施入PEG-6000溶液,胁迫10 d后,取各处理幼苗上部5片功能叶测量其相对含水量,再将剩余叶片进行各项生理指标的测定。

1.3 指标测定及其方法

叶片相对含水量(RWC):取各处理幼苗5片功能叶称量鲜重,再将叶片放入蒸馏水中浸泡24 h,测定其饱和鲜重,之后在105℃下杀青,并于75℃烘干至恒重,称量干重^[10]。叶绿素含量(Chl)采用95%乙醇浸提比色法、游离氨基酸(FAA)含量采用水合茚三酮比色法、可溶性糖含量(SS)采用蒽酮法、丙二醛含量(MDA)采用硫代巴比妥酸比色法、可溶性蛋白含量(SP)采用考马斯亮蓝G-250染色法、过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法、过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[11]。

1.4 隶属函数分析法

应用模糊数学中的隶属函数法综合评价少花蒺藜草的抗旱能力,其隶属函数值 $[X(u)]$ 计算方程如下:

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

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

式中: X 为少花蒺藜草与狗尾草某一指标的测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为少花蒺藜草与狗尾草该测定指标的最大和最小值。若该指标与植物耐旱性呈正相关,则采用(1)式计算隶属值;相反,则用(2)式计算。将各指标的隶属值累加后再平均,平均值越大,抗旱性愈强,反之亦然^[12]。

1.5 数据处理

所有数据均使用Excel 2013进行图表制作,使用SPSS 26.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和多因素方差分析(Multi-way ANOVA),显著度水平为 $P < 0.05$, $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对少花蒺藜草与狗尾草叶片 RWC 的影响

随着胁迫程度的增加,少花蒺藜草与狗尾草的叶片 RWC 都呈逐渐下降的趋势,而且胁迫程度越强,RWC 的降幅越大。2 种植物在中度和重度胁迫下的 RWC 显著低于对照($P < 0.05$),分别降低了 47% 和 36%,且重度胁迫下叶片 RWC 显著低于中度胁迫($P < 0.05$);在对照和轻度胁迫处理条件下,少花蒺藜草和狗尾草叶片 RWC 之间无显著差异性($P > 0.05$),中度胁迫下少花蒺藜草叶片 RWC 显著低于狗尾草($P < 0.05$),重度胁迫时少花蒺藜草叶片 RWC 极显著低于狗尾草($P < 0.01$)(图 1)。

2.2 干旱胁迫对少花蒺藜草及狗尾草叶片 POD 与 CAT 活性的影响

随着干旱胁迫程度的增强,2 种植物的 POD、CAT 活性均表现为先增加后降低。少花蒺藜草的 POD 活性在各个胁迫浓度下均极显著高于狗尾草($P < 0.01$),而 CAT 活性则均极显著低于狗尾草($P < 0.01$);在中度胁迫下少花蒺藜草和狗尾草的 POD、CAT 活性最高,少花蒺藜草的 POD、CAT 活性分别为 224.867 和 58.33 $\mu\text{g/g}$,狗尾草分别为 98.367 和 72.667 $\mu\text{g/g}$ 显著高于其他处理($P < 0.05$)(图 2)。

2.3 干旱胁迫对少花蒺藜草与狗尾草叶片 MDA 含量的影响

少花蒺藜草与狗尾草叶片的 MDA 含量均随着干旱胁迫程度的增加呈上升趋势。2 种植物的 MDA 含量在重度胁迫条件下达到最高,显著高于其他处理(P

< 0.05),且与对照相比分别提高了 61% 和 71%;在同一胁迫浓度条件下少花蒺藜草的 MDA 含量均极显著低于狗尾草($P < 0.01$)(图 3)。

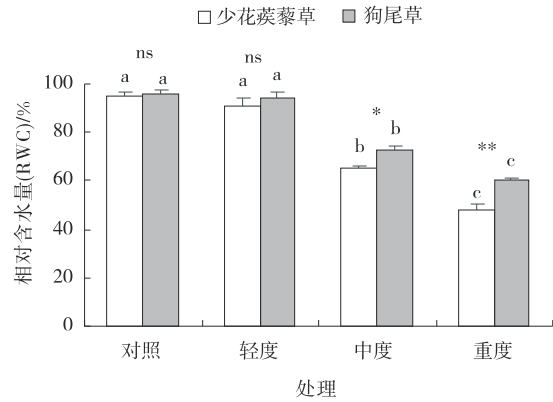


图 1 干旱胁迫处理下对少花蒺藜草及狗尾草叶片相对含水量

Fig. 1 Effects of drought stress on relative water content in leaves of *Cenchrus pauciflorus* and *Setaria viridis*

注:*号和**号分别表示不同植物同一处理的差异显著性($P < 0.05$),($P < 0.01$);ns 表示不同植物同一处理间无差异显著性($P > 0.05$);小写字母表示同一植物不同处理的差异显著性($P < 0.05$)。下同

2.4 干旱胁迫对少花蒺藜草与狗尾草叶片 Chl 含量的影响

在轻度胁迫条件下,少花蒺藜草与狗尾草的 Chl 含量均显著高于其他处理($P < 0.05$);在中度胁迫时,狗尾草叶片中 Chl 含量最少,为 0.313 mg/g,且显著低于其他处理($P < 0.05$),而少花蒺藜草叶片中 Chl 含量在重度胁迫条件下最低,为 1.519 mg/g;相同处理条件下少花蒺藜草叶片中 Chl 含量均显著高于狗尾草($P < 0.01$)(图 4)。

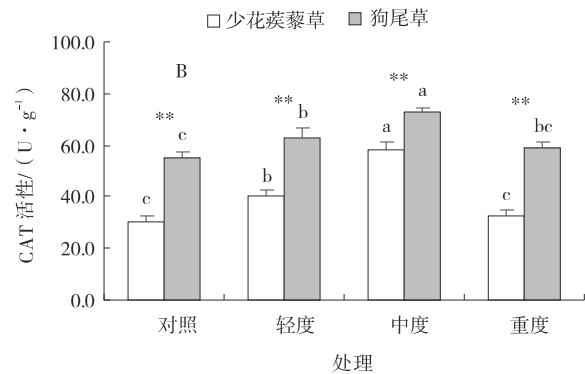
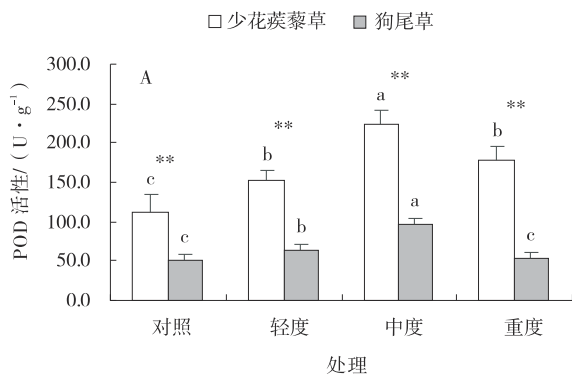


图 2 干旱胁迫处理下少花蒺藜草与狗尾草叶片 POD 与 CAT 活性

Fig. 2 POD and CAT activities in leaves of *Cenchrus pauciflorus* and *Setaria viridis*

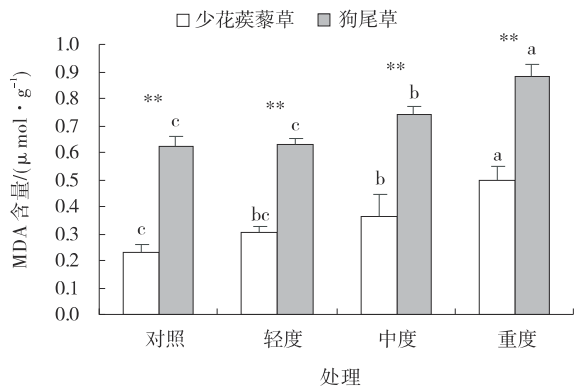


图3 干旱胁迫处理下少花蒺藜草与狗尾草叶片MDA含量

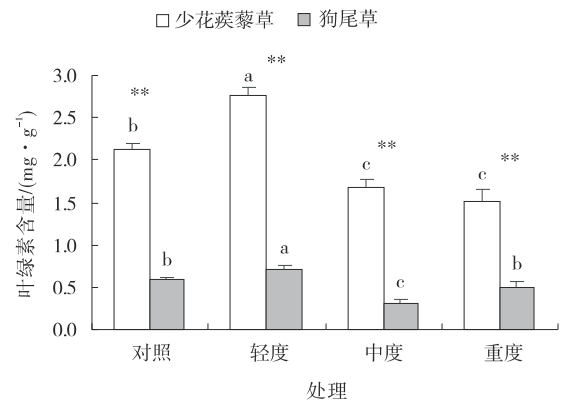
Fig. 3 MDA content in leaves of *Cenchrus pauciflorus* and *Setaria viridis*

图4 干旱胁迫处理下少花蒺藜草与狗尾草叶片Chl含量

Fig. 4 Chl content in Leaves of *Cenchrus pauciflorus* and *Setaria viridis*

2.5 干旱胁迫对少花蒺藜草与狗尾草叶片渗透调节物质的影响

2种植物叶片中SS含量随干旱胁迫强度的增加表现为逐渐上升的趋势,SP与FAA含量则随着干旱胁迫强度的增加呈先增加后降低的趋势。在重度胁迫条件下,少花蒺藜草与狗尾草的SS含量达到最高,分别为1.122和1.102 mg/g,均显著高于其他处理($P<0.05$),而SP与FAA含量则在中度胁迫条件

下达到最高且显著高于其他处理;在相同胁迫条件下,少花蒺藜草与狗尾草之间的SS含量均无显著差异。在对照和轻度胁迫条件下,少花蒺藜草的SP含量显著低于狗尾草($P<0.05$),而FAA含量在中度胁迫条件下显著高于狗尾草($P<0.05$),少花蒺藜草与狗尾草的FAA含量在重度胁迫条件下差异显著($P<0.01$)。

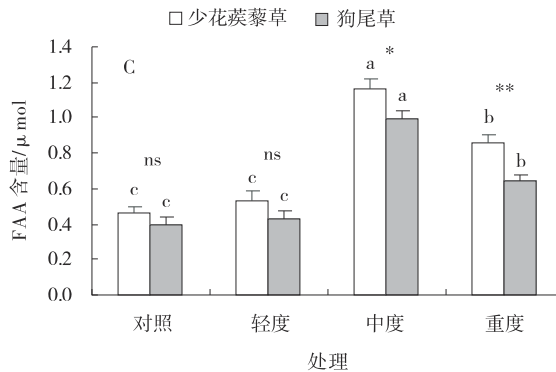
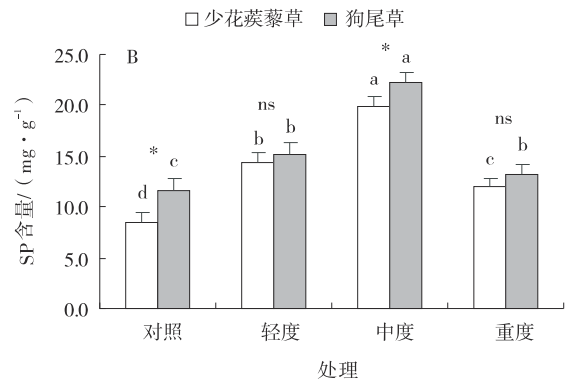
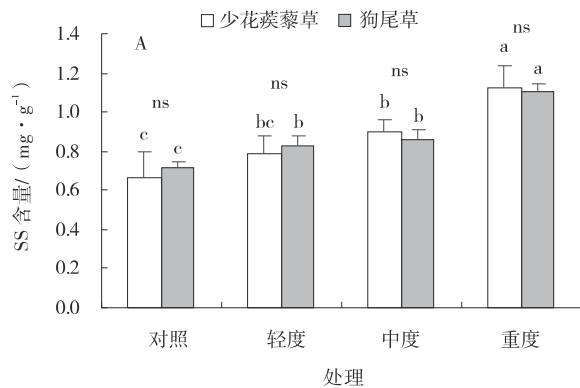


图5 干旱胁迫下少花蒺藜草与狗尾草叶片渗透调节物质

Fig. 5 Effects of drought stress on osmotic substances in leaves of *Cenchrus pauciflorus* and *Setaria viridis*

2.6 少花蒺藜草与狗尾草幼苗期抗旱性综合评价

通过对相对含水量、叶绿素、丙二醛含量、3种渗透调节物质及2种保护酶活性8个生理指标计算出的隶属函数值分析可知,少花蒺藜草和狗尾草的抗旱性隶属函数均值分别为0.514 4,0.513 2(表1)。

表1 少花蒺藜草与狗尾草幼苗期抗旱性综合评价

Table 1 Comprehensive evaluation of drought resistance of *Cenchrus pauciflorus* and *Setaria setaria* at seedling stage

抗旱指标	少花蒺藜草	狗尾草
相对含水量	0.4286	0.4266
叶绿素含量	0.8375	0.7825
游离氨基酸含量	0.3851	0.4084
可溶性糖含量	0.4436	0.4081
可溶性蛋白含量	0.5548	0.5472
过氧化物酶活性	0.4478	0.6014
过氧化氢酶活性	0.5686	0.5538
丙二醛活性	0.4494	0.3779
均值	0.5144	0.5132
排序	1	2

3 讨论

3.1 干旱胁迫对少花蒺藜草及狗尾草相对含水量和叶绿素含量的影响

水分是活细胞的必要组成成分和代谢活动的重要物质,抗旱性强的植物其叶片结构特征更有利于减少水分损失。因此,叶片的保水力直接体现植株的抗旱能力^[13]。干旱胁迫中叶片RWC的下降与土壤含水量和可利用水的减少有关^[14]。在本研究中,轻度干旱胁迫时,少花蒺藜草与狗尾草叶片的RWC能维持在较高的水平,2种植物的叶片RWC在中度和重度胁迫时表现出显著差异,可能的原因是少花蒺藜草与狗尾草在轻度干旱胁迫时具有较强的抗旱能力,随着胁迫程度的加深,2种植物根系吸水困难,再有叶片蒸腾丧失,从而导致了RWC下降,这与田永雷^[15]等研究的老芒麦(*Elymus sibiricus*)叶片RWC随着胁迫程度的增加而降低的结果一致。

植物叶片中的叶绿素含量不仅反映光合作用的强弱,也在一定程度上直接关系着植物光合同化过程^[16]。相关研究表明,干旱会降低植物的光合作用,并导致光合色素的降解^[17]。本研究中,少花蒺藜草叶

片叶绿素含量随胁迫程度的加深而逐渐降低,与张宁等^[18]研究的草地早熟禾(*Kentucky bluegrass*)叶绿素含量变化相似。可能的原因是轻度干旱对少花蒺藜草叶片光合能力影响不明显,而重度胁迫时,植物体内积累了大量有毒物质活性氧,导致合成叶绿素的蛋白受到破坏,从而致使叶绿素含量下降^[19]。狗尾草叶片叶绿素含量则呈现先降低后上升的趋势,这与付宝春等^[20]研究的德国鸢尾(*Iris germanica*)、白萼鸢尾(*I. baie*)在受到干旱胁迫时,叶绿素含量表现为先降低后升高的结果一致。

3.2 干旱胁迫对少花蒺藜草及狗尾草抗氧化酶系统的影响

在荒漠地区,伴随着高温及干旱的出现,植物叶绿体内会产生大量的活性氧(ROS),为清除ROS,植物产生了包括POD以及CAT在内的抗氧化酶^[21]。CAT通过加速分解H₂O₂,一定程度上缓解了植物细胞的膜质过氧化,从而提高植物的抗旱能力^[22]。在外界环境胁迫初期,植株会以增加自身抗氧化防御系统的活力来清除多余的活性氧,但随着胁迫程度增强,活性氧含量不断增加,相关抗氧化酶的活性氧清除能力却下降,多余的活性氧无法被清除,从而使植株遭遇不可逆的伤害^[23]。本研究中,少花蒺藜草和狗尾草的POD及CAT活性均随着干旱胁迫程度的增加呈现先上升再下降的趋势,这与裴斌等^[24]对沙棘(*Hippogae rhamnoides*)的干旱胁迫研究结果表现一致。可能的原因是,重度胁迫超出了少花蒺藜草及狗尾草的抗氧化酶调节能力,使得POD与CAT活性降低。2种植物的抗氧化酶活性变化不同,说明少花蒺藜草和狗尾草诱导抗氧化酶合成的能力存在差异。

3.3 干旱胁迫对少花蒺藜草及狗尾草细胞渗透调节能力的影响

植物在干旱胁迫下能够维持较高的水分利用效率和光合效率主要依赖于其体内的渗透调节系统^[25]。可溶性蛋白作为渗透调节物质对干旱胁迫的反应较为敏感^[26-28],其含量与植物抗旱能力成正比^[29-30]。少花蒺藜草和狗尾草叶片的可溶性蛋白含量在干旱胁迫过程中呈现先升高后降低的趋势,可能的原因是在干旱条件下,2种植物均通过积累水溶性物质来平衡细胞内外的渗透压,从而保护细胞的稳定性。干旱胁迫下可溶性糖的积累能增强部分生理代谢反应,如原

生质黏度增大,提高植物对水分的吸收、保持能力,保持部分水解酶活性,从而保持原生质结构^[31]。张美云等^[32]、刘慧芬等^[33]研究结果指出在干旱胁迫下,可溶性糖含量随旱胁迫程度的增强而不断积累,其积累量的大小影响着牧草细胞的渗透调节能力,而渗透调节作用的强弱与牧草抗旱能力间有密切的联系。本研究中2种植物的可溶性糖含量随着胁迫强度的增加而升高,这与张美云与刘慧芬等的研究结果一致。游离氨基酸的积累是植物对逆境响应的一种重要方式^[34]。本研究中,随着干旱胁迫的增加,游离氨基酸的含量逐渐上升,可见,在少花蒺藜草与狗尾草的渗透调节中,游离氨基酸是维持其渗透势的一种重要物质。胁迫过程中,植物的细胞膜脂过氧化是伤害的首要表现^[35-36],而丙二醛是植物细胞膜脂过氧化反应的主要产物之一,其含量的高低反映了生物细胞膜受伤害的程度^[37-38]。耐旱性强的植物在一定程度干旱胁迫下丙二醛含量增幅较小^[39]。本研究中,随着干旱胁迫的增强,2种植物叶片的丙二醛含量逐渐上升,表明植株受损伤程度逐渐增大,其细胞膜受到的过氧化损害也逐渐增高,少花蒺藜草的丙二醛含量较狗尾草增幅小,可能的原因是少花蒺藜草主要通过调节丙二醛含量来抵抗干旱胁迫的损伤。

3.4 少花蒺藜草与狗尾草幼苗期抗旱性综合评价

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,利用隶属函数分析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接近^[40]。本试验利用隶属函数法,对入侵植物少花蒺藜草和本地伴生种狗尾草苗期所测定的8个指标进行综合评价,使得评定结果较全面地反映2种植物的耐旱性。2种植物的抗旱性无明显差异,可能的原因是少花蒺藜草与狗尾草通过自身独特的生理调节机制适应了干旱环境带来的损伤,从而在水分匮乏的地区也能够较好的生长繁育。

4 结论

干旱胁迫直接降低了少花蒺藜草植物叶片RWC和Chl含量,提高了MDA和SS含量;随着胁迫程度的增强,FAA、SP含量和POD、CAT活性呈先增加后降低的趋势。少花蒺藜草与狗尾草在苗期均具有较强的耐旱能力,抗旱水平基本相同,但2种植物抗旱方式

有所不同。干旱胁迫时,少花蒺藜草主要通过提高POD活性、延缓光合色素的降解来抵御胁迫造成的损伤,狗尾草则主要通过依靠提高CAT活性加速H₂O₂分解来维持植物正常生长。少花蒺藜草所具有的特殊抗旱机制,使其容易适应科尔沁沙地的干旱环境,具有继续扩散蔓延的风险。

参考文献:

- [1] Ragan M, Erik T. Aschehoug Invasive Plants Versus Their New and Old Neighbors: A Mechanism for Exotic Invasion[J]. Science, 2000, 20: 521-523.
- [2] 周立业, 张玉霞, 杨秀梅, 等. 科尔沁沙地典型人工固沙林群落中少花蒺藜草入侵土壤特性[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1381-1384.
- [3] 张志新, 田迅. 干旱和灌溉条件下少花蒺藜草分株生物量分配特征[J]. 草业科学, 2011, 28(2): 185-188.
- [4] 孙忠林, 周立业, 高凯, 等. 少花蒺藜草入侵现状、适应机制和防控策略[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1196-1202.
- [5] 张寒冰, 高阳, 崔艳智. 基于风沙防治的典型农牧交错区土地利用多情景模拟[J]. 环境科学研究, 2019, 32(6): 1081-1089.
- [6] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. Biological soil crust and surface soil properties in different vegetation types of Horqin sand land, China[J]. Catena, 2010, 82(2): 70-76.
- [7] 曲婷, 田迅, 周立业. 入侵植物少花蒺藜草种子异型性及种群维持策略[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2622-2628.
- [8] Huang P, Jiang H, Zhu C M, et al. Sparse panicle1 is required for inflorescence development in *Setaria viridis* and maize[J]. Nature plants, 2017, 3(5): 17054.
- [9] 周欣, 左小安, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地植物功能性状的尺度变异及关联[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 20-26.
- [10] 王优信, 延荣, 蔺明月. 冀中北小麦品种抗旱性筛选研究[J]. 植物遗传资源报, 2021, 22(1): 74-82.
- [11] 邹琦. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [12] 王东丽, 张日升, 方祥, 等. 固沙樟子松种子萌发与幼苗生长对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(1): 60-68.
- [13] 刘菲, 周隆腾, 蒋焱, 等. 不同种源江南油杉幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11): 35-45.
- [14] 王宁, 袁美丽, 陈浩, 等. 干旱胁迫及复水对入侵植物节

- 节麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(1):70—78.
- [15] 田永雷,白春利,丁海君,等. 老芒麦种质对干旱胁迫的生理响应[J]. 草原与草坪, 2021, 41(2):70—74.
- [16] 曹林青. 油茶对干旱胁迫的生理生态响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017:57—58.
- [17] 刘领,李冬,马宜林,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下烤烟幼苗生长的缓解效应与生理机制研究[J]. 草业学报, 2019, 28(8):95—105.
- [18] 张宁,曹允馨,徐伟,等. 干旱胁迫下污泥对草地早熟禾生长及激素代谢的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(3):167—176.
- [19] 李丽杰,顾万荣,孟瑶,等. 干旱胁迫下亚精胺对玉米幼苗抗旱性影响的生理生化机制[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2):554—564.
- [20] 付宝春,薄伟,康红梅,等. 干旱胁迫对 13 种优良鸢尾属植物的生理影响[J]. 山西农业科学, 2013, 41(9):924—929.
- [21] 钟华,董洁,郭晋梅,等. 不同白羊草居群对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 草地学报, 2018, 26(1):195—202.
- [22] 吴永波,叶波. 高温干旱复合胁迫对构树幼苗抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(2):403—410.
- [23] 李州,彭燕. 亚精胺对水分胁迫下白三叶脯氨酸代谢、抗氧化酶活性及其基因表达的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(4):148—156.
- [24] 裴斌,张光灿,张淑勇,等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5):1386—1396.
- [25] 周紫鹃,苏培玺,解婷婷,等. 不同生境下红砂(*Reaumuria soongorica*)的生理生化特征及适应性[J]. 中国沙漠, 2014, 34(4):1007—1014.
- [26] 万里强,石永红,李向林,等. PEG 胁迫下 3 个多年生黑麦草品种抗性生理研究[J]. 草地学报, 2009, 17(4):440—444.
- [27] Ren W W, Qian J, Ma J, *et al.* Comparative study of *Leymus chinensis* a pos: water content and free proline of different geographic populations under the force of different consistency PEG [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2):349—352.
- [28] Mahajan S, Tuteja N. Cold, salinity and drought stresses: An overview [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2005, 444(2):139—158.
- [29] Li B, Jia X F, Bai Q W, *et al.* Effect of drought stress on prolin accumulation of alfalfa [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2003, 23(2):189—191.
- [30] 范志霞,李绍才,孙海龙. 多效唑作用下紫穗槐对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 草业学报, 2017, 26(3):132—141.
- [31] 苏慧敏,何丙辉,蔡兴华,等. 水分胁迫对太阳扇扦插苗形态和生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10):2185—2190.
- [32] 张美云,钱吉,郑师章. 渗透胁迫下野生大豆游离脯氨酸和可溶性糖的变化[J]. 复旦学报(自然科学版), 2001, 40(5):558—561.
- [33] 刘惠芬,高玉葆,张强,等. 不同种群羊草幼苗对土壤干旱胁迫的生理生态响应[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2004, 37(4):105—110.
- [34] 谢娟娜,路杨,房琴,等. 种子引发对小麦抗盐及抗旱特性影响综述[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8):1025—1034.
- [35] 孙建,颜小文,乐美旺,等. 芝麻不同抗旱基因型对花期干旱胁迫的生理响应机理[J]. 中国农业科学, 2019, 52(7):1215—1226.
- [36] 孙誉育,尹春英,贺合亮,等. 红桦幼苗根系对水—氮耦合效应的生理响应[J]. 生态学报, 2016, 36(21):6758—6765.
- [37] 王竞红,陈鹏,陈艾,等. 3 种观赏草苗期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 草业科学, 2019, 36(5):1266—1274.
- [38] 蒋倩,张瑞,李翔,等. 水分胁迫下 4 种观赏草的生理特性[J]. 草业科学, 2019, 36(12):3024—3032.
- [39] 吴建慧,李雪,王玲. 2 种委陵菜叶片结构和生理指标对干旱胁迫的生理响应[J]. 草地学报, 2015, 23(1):125—129.
- [40] 张然,李佳缙,王铭,等. 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[J]. 草原与草坪, 2021, 41(2):113—121.

(下转 91 页)

host plants can be infected by both *Glomus intraradices* and *Glomus Mosseae*, and the infection rates of four host plants were *Trifolium repens* > *Medicago sativa* 'Beilin201' > *Elymus nutans* 'Aba' > *Elymus sibiricus* 'Chuancao No 2'. After two months of cultivation, the spore density of treatment propagated by *Trifolium repens* was the highest. After inoculation with *Glomus intraradices* and *Glomus Mosseae*, plant height, biomass and chlorophyll content of the four host plants were increased. 【Conclusion】 Both perennial gramineous and legume forages could be used as host plants of *Glomus intraradices* and *Glomus Mosseae*, and *Trifolium repens* was the best host for propagation.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; host plant; mycorrhizal infection rate; spore density

(上接 83 页)

Physiological response and drought resistance evaluation of invasive plants *Cenchrus pauciflorus* to drought

CHEN Jia-ning¹, FENG Hai-xu^{1,2}, SU Hui¹, LUO Ya-yong³, ZHOU Li-ye^{1*}

(1. College of Agriculture, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, China; 2. Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: 【Objective】 In order to investigate the difference of physiological responses of invasive plant *Cenchrus pauciflorus* and its native associated species *Setaria viridis* to drought stress. 【Method】 The seedlings of two plants were used as the research object and PEG 6000 solution was used to simulate drought stress. Four treatment levels were set (CK, mild LD, moderate MD and severe SD) and PEG concentrations were 0%, 5%, 10% and 15%, respectively. The relative water content (RWC), chlorophyll (Ch l) content, protective enzyme, soluble protein (SP) and other physiological indexes of the two plants were determined. The comprehensive evaluation of drought resistance was carried out by membership function analysis. 【Result】 The results showed that: 1) with the increase of the degree of the drought stress, the contents of free amino acids (FAA), soluble protein (SP) and the activities of peroxidase (POD) and catalase (CAT) increased firstly and then decreased, RWC content decreased gradually, malondialdehyde (MDA) and soluble sugar (SS) contents increased continuously, The Ch l content of *Cenchrus pauciflorus* showed a decreasing trend, and that of *Setaria viridis* showed a decreasing first and then increasing trend; 2) POD activity of *C. pauciflorus* was the highest under moderate stress (224.867 U/g), and CAT activity of *S. viridis* was the highest under moderate drought stress (72.667 U/g); 3) The comprehensive evaluation of drought resistance showed that the drought resistance level of the seedlings of the two plants was basically the same. 【Conclusion】 The two plants showed different physiological characteristics to adapt to the arid habitat under drought stress. Although there were differences in physiological response, both plants had strong drought tolerance.

Key words: *Cenchrus pauciflorus*; *Setaria viridis*; drought stress; tolerance