

干旱胁迫对 3 种宿根花卉生理生化指标的影响

肖 涵,张鸿翎*,韩 涛,闫晓云

(内蒙古农业大学,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要:以 3 种常见宿根花卉为材料,采用室内盆栽控水法测定叶片超氧化物歧化酶 SOD 活性、游离脯氨酸 Pro、可溶性蛋白、可溶性糖、丙二醛 MDA 含量。研究表明,干旱胁迫至 12 d,千屈菜生长受严重抑制,婆婆纳、鼠尾草较轻。3 种宿根花卉土壤容积含水量均呈下降趋势且幅度基本一致。鼠尾草 SOD 活性 0~6 d 呈上升趋势且 6 d 达最大值,6~12 d 呈下降趋势;婆婆纳、千屈菜 SOD 活性 3 d 达最大值,随后呈下降趋势。3 种宿根花卉 Pro 含量随干旱胁迫均呈上升趋势;可溶性蛋白、可溶性糖含量随干旱胁迫呈先上升后下降趋势;婆婆纳和鼠尾草随干旱胁迫叶片 MDA 含量增加,千屈菜则呈先升高后降低趋势。通过隶属函数综合评价,3 种宿根花卉抗旱性强弱为:鼠尾草>婆婆纳>千屈菜。

关键词:宿根花卉;干旱胁迫;生理指标;隶属函数

中图分类号:S682.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)05-0102-06

Effects of Drought Stress on Physiological and Biochemical Indices of Three Species Perennial Flowers

XIAO Han,ZHANG Hong-ling*,HAN Tao,YAN Xiao-yun

(Inner Mongolia Agricultural University,Hohhot 010020,Inner Monglia,China)

Abstract:Seedlings of three commonly occurred perennial flowers were used as test materials that were potted cultured indoors under different water levels to study the effects of drought stress on their physiological and biochemical indices,such as the activity of leaf SOD,the content of proline,soluble protein,soluble sugar,and MDA content. The results showed that when drought stress lasted 12 days,the growth of *Lythrum salicaria* was severely inhibited. At the same time,the growth of *Veronica incana* and *Salvia japonica* were less affected by the drought stress. The volumetric water content of the soils of three perennial flowers showed a similar decline trend. The SOD activity of *S. japonica* increased firstly at 0—6 d and reached the maximum at 6d,showing a downward trend during the 6—12 d. The SOD activity of the *V. incana* and the *L. salicaria* reached a maximum at 3 d,and then showed a downward trend. The content of proline of three kinds of perennial flowers increased with drought stress. The content of soluble protein and soluble sugar increased first,and then decreased with drought stress. The contents of MDA in the leaves of *V. incana* and *S. japonica* increased with the drought stress,and for *L. salicaria*,it increased first,and then decreased with drought stress. It was concluded that the drought resistance ability was in the order of *S. japonica*>*V. incana*>*L. salicaria*.

Key words:perrennial flower; drought stress; physiological index; subordinate function

我国北方大部分地区属于旱半干旱地区,干旱是制约北方地区园林绿化的最大因素。构建低

收稿日期:2018-12-03 修回日期:2019-03-04
基金项目:国家自然科学基金(3156030025);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ052)。
作者简介:肖 涵,女,在读硕士,研究方向:园林植物与人居环境。E-mail:1368012615@qq.com
*通信作者:张鸿翎,女,副教授,研究方向:园林植物应用等。E-mail:hlzhang68@sina.com

耗水量且符合美学规律的植物配置模式成为北方地区绿化建设主要方向。节水型园林植物配置要求植物抗旱性强可接近“雨养”状态,即植物长时间不浇水靠降雨仍保持健康生长且满足色彩及造型效果的景观。

宿根花卉具有很强的抗逆性和生长繁殖能力,因其花期较长具有较高观赏价值,同时较 1、2 年生花卉可显著降低绿化成本,故受旱区绿化建设重视。宿根花卉抗逆性研究对于园林植物生态配置具有重要指导意义,为宿根花卉在园林中的应用提供理论基础^[1-2]。近年来专家学者对不同地区宿根花卉进行调查和筛选并深入研究其生物学特性、抗逆性能力、花期调控等。本试验选取 3 种内蒙古地区园林绿化建设常用且观赏价值较高、耐寒性强、易于繁殖、管理粗放宿根花卉为试验材料,测定 3 种宿根花卉干旱胁迫下生长状态与生理生化指标的变化并用隶属函数综合评价其抗旱性强弱,以筛选出耐旱强的宿根花卉。

1 材料与方法

1.1 材料

选用婆婆纳(*Veronica incana*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、鼠尾草(*Salvia japonica*) 3 种宿根花卉为试验材料。

1.2 试验设计

2018 年 5 月 10 日将 3 种试验苗分别移植于装有营养土直径为 15 cm 花盆内,每盆 2 株放入内蒙古农业大学教学温室进行正常养护管理,缓苗期过后每种植物随机挑选 50 盆长势相同植株。试验前 1 d 浇透水使基质处于饱和含水状态,此后不再浇水至试验结束。透水后 1 d 为干旱胁迫基点(即对照组 0 d)设 5 个时间点,每个时间点 3 次重复,每 3 天采 1 次样,即 0(对照组)、3、6、9、12 d 早上 9:00—10:00 记录各植株生长状况并选成熟健壮叶片测定各项生理生化指标。

1.3 测定指标及方法

观察植株形态并采集每个时间点需测定的指标样叶,取样后用液氮速冻并贮藏于超低温冰箱中,随后完成各项生理指标的测定^[3-5]。

1.3.1 植物形态评价 参照张寅媛等^[4]对植物主干、叶片形态,色泽等级评价体系(表 1),对 3 种植物受干旱胁迫程度进行评价。

1.3.2 土壤容积含水量的测定 使用 TSZ—I 型土壤水分速测仪来测定 3 种宿根花卉各个时间点土壤容积含水量。

1.3.3 叶片生理生化指标的测定 超氧化物歧化

酶(SOD)活性及游离脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白、可溶性糖、丙二醛(MDA)含量,均参照植物生理生化实验原理和技术^[5]。

表 1 植物形态特征评价

Table 1 The evaluation table of plant morphological characters

评定等级	形态特征		
	植株形态	叶片形态	色泽
A 生长旺盛	未出现萎蔫	叶质饱满	鲜亮
B 生长良好	未出现萎蔫	叶质较饱满	略微变淡
C 生长正常	未出现萎蔫	萎蔫皱缩	暗淡
D 生长受抑制	出现萎蔫皱缩	皱缩严重、萎蔫下垂	暗淡失绿
E 生长受严重抑制	出现萎蔫、失水倒伏	皱缩严重、萎蔫下垂	失绿变黄

1.4 数据处理与分析

用 Excel2016、SPSS25.0 处理试验数据。

1.5 抗旱性的综合评定

本试验采用隶属函数分析法对 3 种宿根花卉进行抗旱性综合评定,消除个别指标的片面性,使各参试材料抗旱性差异具可比性^[6-7]。隶属函数计算公式如下:

某一指标与抗旱性呈正相关:

$$X_{(u)} = (x - x_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{1}$$

某一指标与抗旱性呈负相关:

$$X_{(u)} = 1 - (x - x_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{2}$$

式中, X 为参试植物某一指标测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为某一指标最大值和最小值。最后将各植物各指标的抗旱隶属值累加求平均数,平均数与抗性呈正相关^[8]。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 3 种植物生长的影响

干旱胁迫前 3 d 植物生长情况均良好,叶质饱满,叶色鲜亮。胁迫至 6 d 婆婆纳和千屈菜均出现叶质萎蔫、叶色暗淡现象,鼠尾草则生长良好。胁迫至 9 d,3 种植物出现非常明显的叶色暗淡,叶质萎蔫皱缩现象。胁迫至 12 d,千屈菜生长受到严重抑制,出现植株萎蔫倒伏现象。婆婆纳和鼠尾草形态受干旱胁迫影响程度<千屈菜,未出现植株叶片失绿变黄迹象。具体表现等级见表 2。

2.2 土壤容积含水量

随干旱胁迫时间延长,花盆内土壤容积含水量呈下降趋势。由图 1、图 2 可知,鼠尾草、千屈菜、婆婆纳 0 d 土壤容积含水量达最高值,分别为 39.50%、35.87%、37.00%,3 种宿根花卉土壤容积含水量相差不大。3 种宿根花卉在干旱胁迫 6 d 内土壤容积含水量下降幅度较大,以后下降幅度较平

缓。胁迫 6 d,鼠尾草、千屈菜、婆婆纳土壤容积含水量分别比对照降低 58.99%、75.66%、68.19%。胁迫至 12 d,鼠尾草土壤容积含水量下降为 7.00%,比对照降低 82.28%;千屈菜土壤容积含水量下降为 6.97%,比对照降低 80.57%;婆婆纳土壤容积含水量下降为 10.37%,比对照降低 71.97%。

表 2 干旱胁迫下植物生长状况评价结果

Table 2 The evaluation result of plant growth under drought stress

植物种类	胁迫时间				
	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d
婆婆纳	A	B	C	D	D
千屈菜	A	B	C	D	E
鼠尾草	A	A	B	C	D

注:A.生长旺盛;B.生长良好;C.生长正常;D.生长受抑制;E.生长受严重抑制。

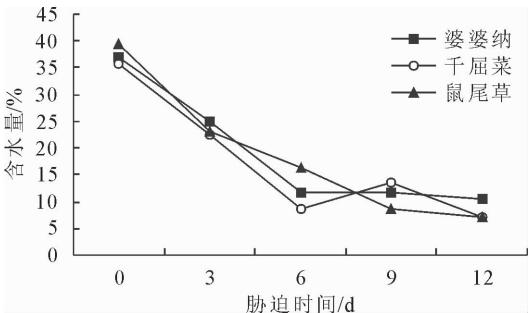


图 1 干旱胁迫下 3 种植物土壤容积含水量的变化
Fig.1 The variation of volumetric water content of three plant soils under drought stress

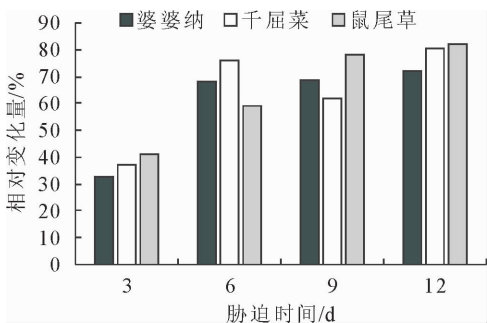


图 2 干旱胁迫下 3 种植物土壤容积含水量的减少量
Fig.2 The reduction of volumetric water content of three plant soils under drought stress

2.3 干旱胁迫对 3 种宿根花卉叶片生理生化指标的影响

2.3.1 超氧化物歧化酶(SOD)活性 由图 3、表 3 可知,3 种植物叶片 SOD 活性均呈先升高后降低趋势。婆婆纳和千屈菜在干旱胁迫至 3 d SOD 活性达最大值,分别比对照增加 22.21%、43.52%,3~12 d SOD 活性逐渐下降。鼠尾草在干旱胁迫 6 d SOD 活性达到最大值,比对照增加 49.77%,6 d 后活性逐渐下降。婆婆纳、千屈菜和鼠尾草 12 d 比对

照分别下降 24.92%、3.20%、9.63%。分析表明,无干旱胁迫时千屈菜 SOD 活性显著<其他 2 种植物($P<0.05$)。水分胁迫 12 d,婆婆纳和鼠尾草间无显著差异($P>0.05$),千屈菜 SOD 活性显著<其他 2 种植物。

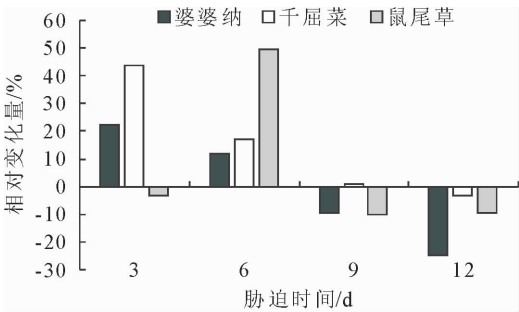


图 3 干旱胁迫下 3 种植物 SOD 活性相对变化量
Fig.3 The relative variation in SOD activity of three plants under drought stress

2.3.2 游离脯氨酸(Pro)的含量 由图 4、表 4 可知,干旱胁迫下 3 种植物 Pro 含量均呈上升趋势。婆婆纳、千屈菜和鼠尾草胁迫至 12 d Pro 含量比对照分别提高 574.24%、345.45%和 338.86%,千屈菜在 3 种植物中叶片 Pro 含量积累最多。分析表明,对照组千屈菜 Pro 含量高于婆婆纳和鼠尾草。鼠尾草与婆婆纳、千屈菜之间有显著差异($P<0.05$)。水分胁迫 12 d,3 种植物 Pro 含量无显著差异($P>0.05$)。

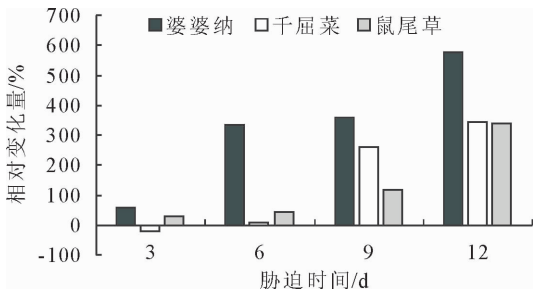


图 4 干旱胁迫下 3 种植物 pro 相对变化量

Fig.4 The relative variation in three plants under drought stress

2.3.3 可溶性蛋白的含量 3 种植物可溶性蛋白含量随干旱胁迫均呈先升后降趋势(图 5、表 5)。水分胁迫 9 d,婆婆纳、千屈菜、鼠尾草可溶性蛋白含量比对照分别增长 467.50%、147.44%、469.00%。分析表明,对照组 3 种植物间均具显著差异($P<0.05$),千屈菜可溶性蛋白含量最高。水分胁迫 12 d,鼠尾草可溶性蛋白含量最高且与婆婆纳、千屈菜差异显著($P<0.05$),而婆婆纳与千屈菜间无显著差异($P>0.05$)。

2.3.4 可溶性糖含量 由图 6、表 6 可知,婆婆纳和千屈菜可溶性糖含量在干旱胁迫下先上升后下

降,鼠尾草呈持续上升趋势。婆婆纳和千屈菜干旱胁迫至 6 d 时可溶性糖含量比对照分别提高 149.42%、143.47%,干旱胁迫 6~12 d 含量呈下降趋势。鼠尾草干旱胁迫期间可溶性糖含量呈持续上升趋势,12 d 可溶性糖含量比对照增加 313.14%。

表 3 干旱胁迫对 3 种植物 SOD 活性的影响
Table 3 Effects of drought stress on SOD activity of three plants

植物种类	胁迫时间				
	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d
婆婆纳	193.60±11.44Ba	236.61±9.87Cb	216.37±10.75Ba	174.79±13.17ABa	145.31±7.32Aa
千屈菜	89.43±16.02Ab	128.35±27.22Ba	104.76±21.30ABa	90.09±6.67Ac	86.57±8.65Ab
鼠尾草	169.07±9.41Aa	163.46±5.58Aa	253.22±5.70Cb	151.69±15.91Ab	152.79±13.34Aa

注:大写字母表示同一植物不同时间在 0.05 水平上差异性($P<0.05$);小写字母表示不同植物同一时间在 0.05 水平上差异性($P<0.05$)。下同。

表 4 干旱胁迫对 3 种植物 Pro 含量的影响
Table 4 Effects of drought stress on prolei content of three plants

植物种类	胁迫时间				
	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d
婆婆纳	53.76±2.31Aa	83.83±13.77Aa	234.48±42.22Ba	248.03±37.63Ba	362.48±20.10Ca
千屈菜	95.78±5.34Ba	76.62±8.81Ba	105.10±9.10Ba	344.38±38.14Aa	426.66±108.25Aa
鼠尾草	59.31±8.18Ab	75.97±13.65Ab	85.97±15.07Ab	127.70±2.41Ab	260.41±19.46Aa

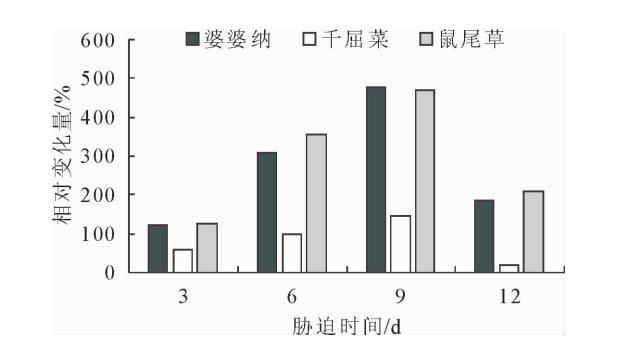


图 5 干旱胁迫下 3 种植物可溶性蛋白相对变化量
Fig. 5 The relative variation of soluble protein in three plants under drought stress

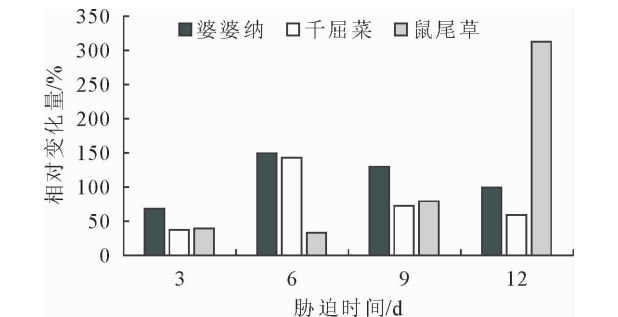


图 6 干旱胁迫下 3 种植物可溶性糖相对变化量
Fig. 6 The relative variation of soluble sugar in three plants under drought stress

2.3.5 丙二醛(MDA)含量 由图 7、表 7 可知,鼠尾草和婆婆纳叶片 MDA 含量随干旱胁迫时间延长逐渐增加,千屈菜呈先升高后下降趋势。胁迫 12 d

对照组 3 种植物叶片可溶性糖含量无显著性差异($P>0.05$),干旱胁迫 3~9 d 所有植物叶片可溶性糖含量差异显著($P<0.05$)。干旱胁迫至 12 d,鼠尾草和其他 2 种植物叶片可溶性糖含量差异显著($P<0.05$)。

婆婆纳和鼠尾草叶片 MDA 含量比对照升高 306.15%、179.26%。千屈菜 0~12 d 与其他 2 种植物差异显著($P<0.05$),婆婆纳与鼠尾草间无显著差异($P>0.05$)。千屈菜 9~12 d 与 0~6 d 差异显著($P<0.05$)。

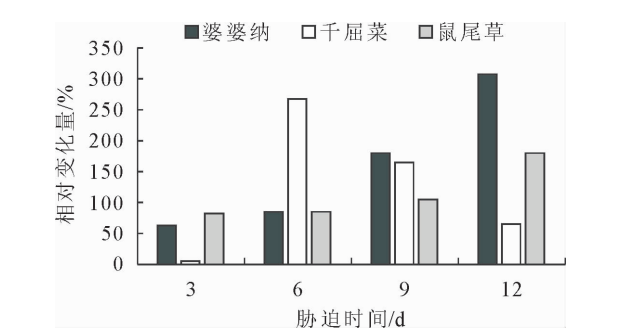


图 7 干旱胁迫下 3 种植物丙二醛(MDA)的相对变化量
Fig. 7 The relative variation of MDA in three plants under drought stress

2.4 隶属函数分析结果

应用隶属函数法对 3 种宿根花卉抗旱性强弱进行综合评定(表 8),3 种宿根花卉抗旱能力由强到弱顺序为:鼠尾草>婆婆纳>千屈菜。

3 结论与讨论

植物抗旱性受多种因素相互作用。当植物面临干旱胁迫时可通过不同途径来抵抗适应干旱^[9]。本研究通过几个简单、快速的生理指标和形态指标比

表 5 干旱胁迫对 3 种植物可溶性蛋白含量的影响

Table 5 Effects of drought stress on the soluble protein content of three plants

植物种类	胁迫时间				
	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d
婆婆纳	0.20±0.01Bc	0.44±0.01BCc	0.82±0.14Aa	1.15±0.12Da	0.57±0.05Aca
千屈菜	0.49±0.02Da	0.79±0.01BCab	0.97±0.05ACa	1.21±0.17Aa	0.58±0.03DBa
鼠尾草	0.30±0.04Eb	0.67±0.01Da	1.37±0.07Bb	1.71±0.09Ab	0.93±0.12Cb

表 6 干旱胁迫对 3 种植物可溶性糖含量的影响

Table 6 Effects of drought stress on the soluble sugar content of three plants

植物种类	胁迫时间				
	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d
婆婆纳	0.48±0.04Da	0.81±0.03Aa	1.20±0.09Ca	1.10±0.01BCa	0.96±0.07ABa
千屈菜	0.49±0.05Aa	0.67±0.04ABb	1.19±0.12Bb	0.85±0.07Bb	0.78±0.05Ca
鼠尾草	0.35±0.05Ba	0.48±0.04ABc	0.46±0.01ABc	0.62±0.05Ac	1.43±0.14Cc

表 7 干旱胁迫对 3 种植物丙二醛含量分析

Table 7 Effects of drought stress on the MDA content of three plants

植物种类	胁迫时间				
	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d
婆婆纳	1.76±0.46Aa	2.84±0.90Aa	3.26±1.13Aa	4.94±0.24Aa	7.15±3.62Aa
千屈菜	24.41±4.74Ab	25.43±5.29Ab	89.66±25.49Ab	64.95±6.59ABb	40.11±7.36Bb
鼠尾草	1.19±0.61Aa	2.16±0.46Aa	2.20±1.10Aa	2.44±0.33Aa	3.32±0.33Aa

表 8 抗旱性指标的隶属函数

Table 8 Subordinate function on drought resistance index

种	指标					平均值	排序
	SOD	Pro	可溶性蛋白	可溶性糖	MDA		
婆婆纳	0.4	0.40	0.39	0.28	0.27	0.34	2
千屈菜	0.26	0.42	0.31	0.06	0.54	0.31	3
鼠尾草	0.39	0.27	0.46	0.38	0.6	0.42	1

较 3 种宿根花卉的抗旱性强弱。干旱胁迫至 12 d, 千屈菜的生长受到严重抑制,表现出植株萎蔫、失水倒伏现象,叶片形态皱缩严重、萎蔫下垂并伴有失绿变黄的现象。婆婆纳和鼠尾草在胁迫至 12 d,生长受抑制程度<千屈菜,呈现植株叶片萎蔫皱缩且暗淡失绿的生长状态,同时在干旱胁迫期间这 2 种植物能保持相对于千屈菜较长时间的观赏价值。

SOD 可在植物受到干旱胁迫后分解植物体内积累的超氧阴离子自由基来保护细胞受损^[10]。宋海鹏等^[11]、习金根等^[12]分别对干旱胁迫下 5 种景天属植物和剑麻叶片生理指标进行研究并指出在一定范围的干旱胁迫,植物抗旱性与 SOD 活性变化幅度呈正相关,超出耐受范围后保护酶活性下降。这一结论与本研究 3 种宿根花卉叶片 SOD 活性变化趋势相吻合。

Pro 作为一种渗透调节物质,可反映出植物的抗逆性并用作鉴定植物抗逆性生理指标^[6,13]。张春

涛等^[14]对沈阳地区 10 种引进的新优宿根花卉抗旱性进行研究,得出抗旱性强的种 Pro 含量变化幅度较小,抗旱性差的种 Pro 含量变化较大,Pro 累积量较多。吕静等^[15]、A. Blum 等^[16]研究认为游离脯氨酸含量与干旱胁迫成正相关。但也有研究对将游离脯氨酸 Pro 列为植物抗旱性研究指标存在争议。本研究 3 种宿根花卉在受干旱胁迫时叶片内 Pro 含量均呈上升趋势,但 3 种植物变化量各不相同,婆婆纳叶片 Pro 含量增幅最大,千屈菜叶片 Pro 积累量最多,鼠尾草变化幅度较前两者小。植物 Pro 含量增幅与抗旱性呈负相关,这一试验结果与史燕山等^[17]研究结果一致。

干旱环境下植物能通过升高可溶性蛋白质含量,使细胞渗透势下降,有效减小干旱给植物带来的损害^[18]。本研究 3 种宿根花卉可溶性蛋白含量随着干旱胁迫呈先升后降趋势,说明一定程度干旱胁迫对植物可溶性蛋白积累有益,但程度加深超出其

耐受范围,细胞结构被破坏且功能丧失,可溶性蛋白含量下降抗旱能力减弱。这一结论与孙国荣等^[19]和王海珍等^[20]对红松、白桦幼苗和白刺花在干旱胁迫下生理指标变化研究相一致。因此,不同植物其可溶性蛋白含量变化也不同,不能只通过可溶性蛋白含量高低来判断植物抗旱性。

可溶性糖因其渗透调节功能可用作反映植物抗逆性的生理指标。钱瑋璜等^[21]研究华南地区 8 种常见园林地被植物抗旱性发现,叶片可溶性糖含量随干旱程度加深而急剧增加。本研究 3 种宿根花卉受到干旱胁迫后叶片可溶性糖含量呈增加趋势。婆婆纳和千屈菜叶片可溶性糖含量随胁迫时间延长呈现先升后降趋势,鼠尾草在干旱胁迫内可溶性糖含量始终呈增加状态,说明渗透调节在植物受到干旱胁迫时具有多样性。

MDA 作为膜脂氧化的最终产物,积累会严重损伤生物膜^[22-23]。宋海鹏等^[11]认为抗旱性较强的植物具有较强膜脂抗氧化能力,MDA 含量较低,膜透性较小,细胞膜系统伤害较轻。抗性较小的植物则反之。本研究中,婆婆纳和鼠尾草随干旱胁迫加剧叶片丙二醛含量增加,千屈菜则呈先升高后降低趋势。说明千屈菜在干旱胁迫产生 MDA 后启动自身抗氧化系统慢慢减缓并逐渐消减叶片 MDA 含量。这一现象与章毅等^[24]研究结果一致。

综上,从胁迫开始对 3 种宿根花卉各时间点形态指标和生理指标进行测定,得出 3 种宿根花卉抗性强弱顺序为:鼠尾草>婆婆纳>千屈菜。在鉴定一种或几种植物抗旱性时单一评价指标不能得出结论,需要选择与抗旱性有关的多个指标并用模糊数学隶属函数法进行统计分析和综合评价。宿根花卉在园林绿化中所占比例较大,本研究选择 3 种常见宿根花卉作为试验材料,比较其抗旱性为园林绿化和栽培养护提供建设性意见。目前多数研究集中在单一植物种上,并未建立系统评价体系。在抗旱性研究方面虽然前人做了大量工作,但仍存在一些问题,前人做的大量研究基本集中在植物叶片对干旱胁迫的生理响应,在干旱胁迫对花色、花型、花期等影响还没有成体系的研究框架,这可以成为将来的研究方向。

参考文献：

[1] 蒋文君,许桂芳,向佐湘. 地被植物抗性研究进展[J]. 林业调查规划,2006,31(4):76-79.

[2] 周媛,徐冬云,董艳芳,等. 9 种轻型屋顶绿化景天属植物的抗旱性研究[J]. 中国农学通报,2012,28(25):294-301.

[3] 关春景,焦孟月,张彦妮. 8 种矮牵牛品种抗旱性综合评价分析[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):62-69.

GUAN C J, JIAO M Y, ZHANG Y N. Comprehensive evaluation analysis of drought resistance of 8 *Petunia* cultivars[J]. Journal of Northwest Forestry Universty, 2018, 33(2): 62-69. (in Chinese)

[4] 张寅媛,刘英,白龙. 干旱胁迫对 4 种景天科植物生理生化指标的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(4): 724-731.

[5] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 105-263.

[6] 席嘉宾,陈平,张惠霞,等. 中国地毯草野生种质资源耐旱性变异的初步研究[J]. 草业学报, 2006, 15(3): 93-99.

[7] 田胄,左小容,梁宗锁. 黄土高原 3 种优势种对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(6): 18-23.

TIAN Z, ZUO X R, LIANG Z S. Responses and drought resistance of three dominant species to soil water stress from Loess Hilly Rgion [J]. Journal of Northwest Forestry Universty, 2011, 26(6): 18-23. (in Chinese)

[8] 郭慧,吕长平,郑智,等. 园林植物抗旱性研究进展[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(7): 53-55.

[9] 倪郁,李唯. 作物抗旱机制及其指标的研究进展与现状[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 36(1): 14-22.

[10] 李涛,王飞,卢燕. 4 种宿根花卉在自然失水胁迫下的生理变化与抗旱性关系[J]. 西北农业学报, 2010, 19(10): 146-151.

[11] 宋海鹏,刘君,李秀玲,等. 干旱胁迫对 5 种景天属植物生理指标的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(1): 11-15.

[12] 习金根,郑金龙,易克贤. 干旱胁迫对剑麻幼苗生理生化的影响[J]. 中国麻业科学, 2012, 34(05): 18-21.

[13] ARAKAWA T, TIMASHEFF S N. The stabilization of proteins by osmolytes [J]. Biophysical Journal, 1985, 47(3): 411-414.

[14] 张春涛,薛晨岩. 沈阳地区十种新优宿根花卉的抗旱性研究[J]. 北方园艺, 2010(23): 100-102.

[15] 吕静,刘卫东,王丽,等. 4 种暖季型草坪草的抗旱性分析[J]. 中国林业科技大学学报, 2010, 30(3): 100-104.

[16] BLUM A, EBERCON A. Genotypic responses in sorghum to drought stress 3 free proline accumulation and drought resistance[J]. Crop Science, 1976, 16: 428-431.

[17] 史燕山,骆建霞,王煦,等. 5 种草本地被植物抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 130-134.

[18] 付宝春,薄伟,秦国杰,等. 景天品种对干旱的生理响应及抗旱性综合评价[J]. 分子植物育种, 2015, 15(3): 1096-1103.

[19] 孙国荣,张睿,姜丽芬. 干旱胁迫下白桦实生苗叶片的水分代谢与部分渗透调节物质的变化[J]. 植物研究, 2001, 21(3): 413-415.

[20] 王海珍,梁宗锁,郝文芳,等. 白刺花适应土壤干旱的生理机制[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 106-110.

[21] 钱瑋璜,雷江丽,庄雪影. 华南地区 8 种常见园林地被植物抗旱性比较研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(4): 0759-0766.

[22] 许桂芳. PEG 胁迫对 2 种过路黄抗性生理生化指标的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 66-70.

[23] 曲涛,南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 126-135.

[24] 章毅,韦孟琪,孙欧文. 不同绣球品种对干旱胁迫的生理响应与抗旱机制研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 90-97

ZHANG Y, WEI M Q, SUN O W. Physiological responses and drought resistant mechanisms of different hydrangea varieties under drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry Universty, 2018, 33(1): 90-97. (in Chinese)