

水分胁迫对芍药生长和生理生化特性影响的研究

王 琪^{1,2}, 刘建鑫¹, 张建军¹, 于晓南^{1,3}

(¹北京林业大学园林学院, 北京 100083; ²天津城建大学建筑学院, 天津 300384;

³花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室/国家花卉工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要:芍药是一种适应性强的宿根花卉,尤其在干旱地区的应用具有良好前景。但芍药不同品种的抗性存在较大差异。本研究以4个芍药品种大富贵、粉玉奴、Karl Rosenfield 和 Duchesse de Nemours 为材料,通过盆栽控水试验,研究不同水分胁迫水平对植株表型性状、光合指标、水分生理指标及其他生理指标的影响,以及4个品种的抗旱性。运用主成分分析和隶属函数法对抗旱能力进行综合评价。结果表明:4个品种的抗旱性依次为 Karl Rosenfield > Duchesse de Nemours > 粉玉奴 > 大富贵。这将为芍药在干旱地区的栽培应用提供科学依据。

关键词:芍药;水分胁迫;抗旱性

The Effects of Growth and Physiology of Herbaceous Peony under Water Stress

WANG Qi^{1,2}, LIU Jian-xin¹, ZHANG Jian-jun¹, YU Xiao-nan^{1,3}

(¹College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

²School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384;

³Key Laboratory for Flower Germplasm Innovation and Molecular Breeding of Beijing/ National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing 100083)

Abstract: Herbaceous peony is a kind of perennial flowers with a strong adaptability and a good application prospect especially in arid region. Dafugui, Fen Yu Nu, Karl Rosenfield, and Duchesse de Nemours were used to study the effects of different soil water content on phenotypic traits, water physiological index and other physiological indexes, and drought resistance of four cultivars by pot experiment. Principal component analysis and subordinate functions were used to evaluate the drought resistance. The four cultivars could be ranked in decreasing levels of drought resistance as Karl Rosenfield, Duchesse de Nemours, Fen Yu Nu, and Dafugui. This would provide a scientific basis for the application and cultivation of herbaceous peony in arid regions.

Key words: herbaceous peony; water stress; drought resistance

水资源不足是世界农业和园艺领域面临的严峻问题。水分亏缺对植物的影响表现在各个阶段,如萌发、营养生长和生殖生长,直到具体的生理代谢过程,如光合作用、呼吸作用、水和营养元素的吸收和运输等^[1]。芍药属(*Paeonia* L.)植物对水分胁迫的抗性研究分为干旱胁迫和水湿胁迫两类。郭慧^[2]

就4个芍药品种在不同土壤含水量处理下的外观形态及叶片生理生化指标进行了研究;金荣^[3]对野生芍药进行了人工抗旱锻炼和干旱胁迫试验,研究认为维持其正常生长发育所需要的土壤水分含量范围为18%~35%;孔祥生等^[4]研究了2个牡丹品种在不同土壤含水量处理下叶片的净光合速率等生理生

收稿日期:2014-02-25 修回日期:2014-05-14 网络出版日期:2014-10-16

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20141016.1055.001.html>

基金项目:国家林业“948”项目(2012-4-59)

第一作者主要研究方向为园林植物生理。E-mail: wq93343@163.com

通信作者:于晓南,主要研究方向为园林植物栽培育种。E-mail: yuxiaonan626@126.com

化反应,比较其抗旱性强弱;刘林艳^[5]认为丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、电导率、可溶性糖含量及 SOD、POD 活性可作为芍药耐湿热能力强弱的鉴定指标,并对 4 个芍药品种耐湿热性能力进行了排序。以上研究主要是针对水分胁迫条件下芍药生理生态变化,但未涉及相关光合指标,且未运用数学统计方法进行抗旱性的综合评价,而有关国内和国外芍药品种在水分胁迫下理化特性变化规律的比较也尚未见报道。

本研究重点研究了水分胁迫中干旱胁迫对芍药不同品种的影响。选取 2 个国内应用广泛的传统品种大富贵、粉玉奴和 2 个欧美引进的庭院花卉新品种 Karl Rosenfield、Duchesse de Nemours 为研究对象,探讨水分胁迫对各品种的表型性状、光合指标、水分生理指标及其他生理指标的影响,为抗旱品种的筛选及芍药在干旱地区的栽培应用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

选用北京市小汤山苗圃自 2009 年引种栽培以来生长健康的 4 个芍药品种:大富贵、粉玉奴、Karl Rosenfield 和 Duchesse de Nemours。2012 年 10 月,将已去除地上部分的各芍药品种植株从原苗圃中挖出并清洗、分株,每株包含 5~8 个强壮的地下芽,并将根修剪至 15~18 cm 长,去除小根、烂根等。选择生长一致的芍药,每个品种 36 株,栽植于上口直径 30 cm、下口径 18 cm、高 22 cm 的塑料花盆内,盆栽基质为园土,另每盆掺入 15 g 鸡粪颗粒用作底肥,用土壤水分测试仪(HH2, Delta-T 公司,英国)测得土壤饱和含水量为 31%。入冬后将试验材料放入地沟并盖上棉被,第 2 年春季收起后正常管理。5 月初将各芍药品种出现的花蕾全部剪掉,然后将所有植株移入温室内。

1.2 试验设计与方法

试验前 10 d 用一部分芍药植株进行预试验。土壤水分梯度的划分参考前人的经验与方法^[2,6-7]并做适当改进,共设 4 个水分胁迫处理梯度:正常水分处理(CK)、轻度水分胁迫(T1)、中度水分胁迫(T2)和重度水分胁迫(T3),各处理的土壤含水量分别为土壤饱和含水量的 60%(土壤含水量 18.6%)、45%(土壤含水量 14.0%)、30%(土壤含水量 9.3%)和 15%(土壤含水量 4.7%)。

试验自 2013 年 5 月 30 日开始。试验前先对所

有材料浇一次透水,此后停止浇水让其自然干旱,每天 17:30 用土壤水分测试仪(HH2, Delta-T 公司,英国)测定土壤含水量,补充水分,使各处理保持设定的土壤水分梯度。每个品种每个处理 9 盆,且平均分成 3 组。当各处理达到控水梯度后的第 17 天开始,每天上午 8:00 开始测定叶片的光合指标,从各处理的 3 组中随机选取 1 组中的 1 盆,连续 3d,共 3 次重复;在第 18 天,以组为单位观察记录各芍药品种的表型性状,每处理 3 组,共 3 次重复;同样在第 18 天,从每个处理的 9 株中,随机采摘自顶叶向下数第 4~8 片的成熟叶片,测定叶片相对含水量、相对电导率、可溶性糖含量等。

1.3 指标的测定与计算

1.3.1 表型性状的测定 根据水分胁迫对植株的伤害程度,并参考郭慧^[2]在研究土壤水分胁迫对 4 个芍药品种生理生化反应的影响中的评价体系,根据水分胁迫对植株的伤害程度,分为以下 5 个级别给予评价分析(表 1)。

表 1 水分胁迫条件下芍药表型性状的评价体系

Table 1 The evaluation system of herbaceous peony phenotypic traits under water stress

级数 Class	植株的外部形态描述 Description of the external form of the plant	得分 Score
I	叶片翠绿,植株生长正常,无黄化或萎蔫症状	1
II	有少部分叶片萎蔫下垂,叶尖、叶缘变黄	2
III	约有 1/2 的叶片叶尖、叶缘变黄,卷曲发干	3
IV	大部分叶片有卷曲干枯现象	4
V	叶枯、枝枯直至整个植株死亡	5

以每组 3 盆植株的平均分为一次重复,求得每个处理下各品种的旱害指数,将定性和定量结合起来,进行综合分析。

旱害指数 = \sum 各株级数 / (最高级数 × 总株数)

1.3.2 生理指标的测定 叶片相对含水量的测定采用烘干称重法测定^[8];质膜相对透性的测定采用电导率法测定^[9];叶片的丙二醛(MDA, malondialdehyde)含量,采用硫代巴比妥酸(TBA, thiobarbituric acid)显色法测定^[9];叶片可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法测定^[9];脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮显色法测定^[9];叶片的可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[9];SOD 活性的测定采用氮蓝四唑(NBT, nitro-blue tetrazolium)法测定^[10]。

相关光合指标使用 LI-6400 型开路式光合气体分析系统(LI-COR 公司,美国)及其红蓝光源,选择

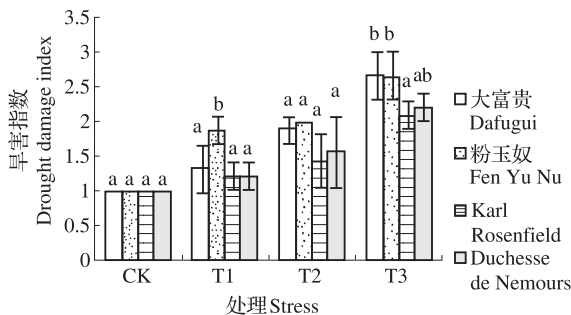
晴朗的天气,测定各试验处理的自顶叶向下数第4~8片的成熟叶片,测量时的叶室温度设置为29℃,CO₂浓度为400 μmol/mol,光照强度设置为2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、150、100、75、50、25、0 μmol/m²·s,可测得光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)等指标参数。将所得数据文件导入 Photosynthesis Work Bench 程序(LI-COR公司,美国),拟合芍药叶片的光响应曲线,从而得到本试验所需的最大净光合速率(P_{max}, max net photosynthetic rate)、光饱和点(LSP, light saturation point)和光补偿点(LCP, light compensation point)。

1.3.3 数据处理 利用 SPSS 17.0 软件进行4个芍药品种抗旱生理生化指标平均值、标准差、各品种间统计学差异的计算以及各指标的相关性分析和主成分分析。利用隶属函数法对4种芍药品种的抗旱性进行综合评价^[11]。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对芍药生长的影响

水分胁迫条件下各芍药品种的旱害指数如图1。从图1可知,随着水分的减少,各芍药品种的旱害指数均有所加重。其中,粉玉奴在轻度水分胁迫(T1)下与其他3个品种差异显著($P \leq 0.05$),Karl Rosenfield 在重度水分胁迫(T3)下与大富贵和粉玉奴差异均显著。从受旱害的速度来看,2个国外品种要慢于国内品种,可以推测国外品种的抗旱性要优于国内品种。



不同小写字母表示在0.05水平上的差异显著。下同
Different small letters mean significant difference at 0.05 level. The same as below

图1 水分胁迫下4个芍药品种的旱害指数

Fig. 1 Drought damage index of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.2 水分胁迫对植株相对含水量的影响

由图2可以看出,随着土壤中水分的减少,4个芍药品种叶片的相对含水量呈下降趋势。值得注意的是,

大富贵与粉玉奴的叶片相对含水量在正常水分处理(CK)时处于较高水平,但在重度水分胁迫(T3)下却处于较低水平,由此可以推测2个国内品种的水分调节能力不如2个国外品种。

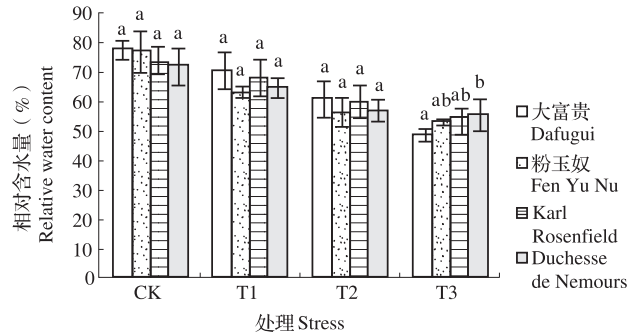


图2 水分胁迫下4个芍药品种叶片的相对含水量

Fig. 2 Relative water content of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.3 水分胁迫对植株相对电导率的影响

相同水分条件下植物的抗旱性越强,其相对电导率越低。由图3可知,随着干旱程度的加重,各芍药品种的相对电导率均增加,但是增加的幅度各异,粉玉奴增加的幅度在各处理中一直最高,因此粉玉奴叶片的细胞膜受伤害最大。大富贵次之,Karl Rosenfield 和 Duchesse de Nemours 受伤害最小。

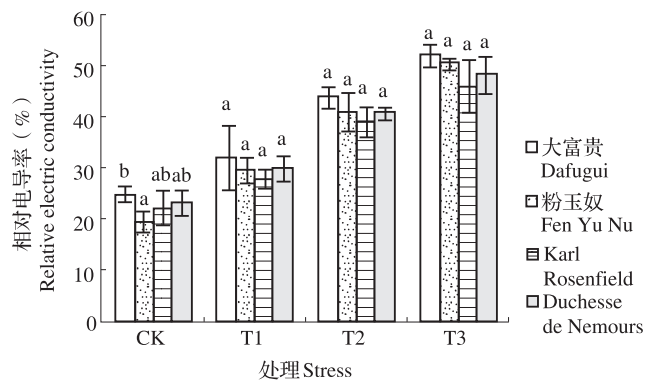


图3 水分胁迫下4个芍药品种叶片的相对电导率

Fig. 3 Relative electric conductivity of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.4 水分胁迫对植株丙二醛含量的影响

植物在遭受水分胁迫时,膜脂过氧化作用加强,导致丙二醛含量的增加。由图4可知,随着水分的减少,大富贵叶片的丙二醛含量呈现先增加后降低的趋势,在中度水分胁迫(T2)时达到最大,其他3个品种的丙二醛含量则一直呈持续上升的趋势。Duncan 方差分析表明,在轻度水分胁迫(T1)和中度水分胁迫(T2)条件下,大富贵与 Karl Rosenfield 均差异显著($P \leq 0.05$)。

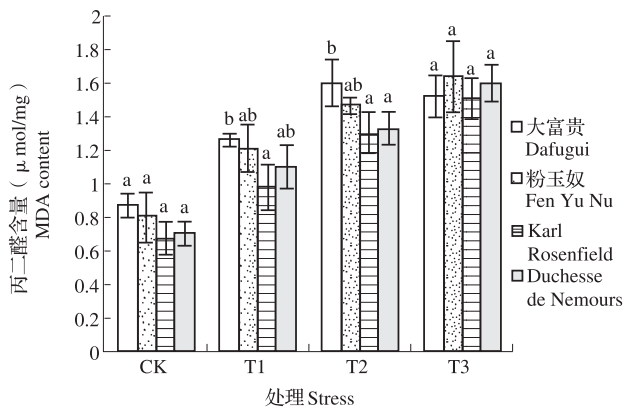


图 4 水分胁迫下 4 个芍药品种叶片的丙二醛含量

Fig. 4 MDA content of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.5 水分胁迫对植株可溶性糖含量的影响

由图 5 可知,随着水分胁迫的加重,除大富贵以中度水分胁迫(T2)为转折点,叶片可溶性糖含量呈现先升高后降低的趋势外,其他 3 个品种的可溶性糖含量一直为增加的趋势,而且由 Duncan 方差分析表明,三者在相同水分供应下的可溶性糖含量差异不显著。

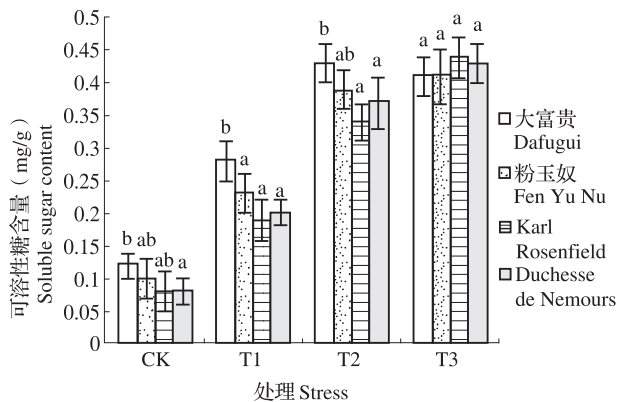


图 5 水分胁迫下 4 个芍药品种叶片的可溶性糖含量

Fig. 5 Soluble sugar content of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.6 水分胁迫对植株脯氨酸含量的影响

4 个芍药品种叶片的脯氨酸含量均随水分胁迫的加重而增加(图 6),并且增加幅度都比较大。从脯氨酸增加速率来看,大富贵在 4 个水分胁迫处理梯度上一直处于增幅最快的品种,粉玉奴、Duchesse de Nemours 和 Karl Rosenfield 分列其后。4 个品种在正常水分处理(CK)时,叶片的脯氨酸含量无明显差异,经过一系列变化,在重度水分胁迫(T3)时,2 个国外品种与 2 个国内品种的差异显著($P \leq 0.05$)。

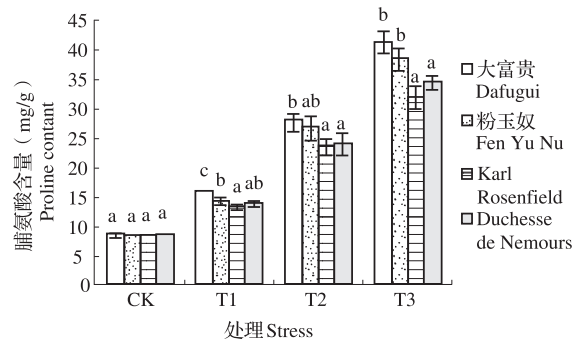


图 6 水分胁迫下 4 个芍药品种叶片的脯氨酸含量

Fig. 6 Proline content of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.7 水分胁迫对植株可溶性蛋白含量的影响

水分胁迫条件下 4 个芍药品种叶片可溶性蛋白含量的变化稍显复杂(图 7):随着水分的减少,大富贵呈降-升-降的变化趋势,其他 3 个品种虽然呈先降低后升高的变化趋势,但转折点却不同,粉玉奴在中度水分胁迫(T2)时叶片的可溶性蛋白含量最低,而 Karl Rosenfield 和 Duchesse de Nemours 则在轻度水分胁迫(T1)时达到最低。经 Duncan 方差分析, Duchesse de Nemours 与粉玉奴、Karl Rosenfield 在正常水分处理时差异显著;在轻度水分胁迫时各品种之间差异不显著;随着水分胁迫的加重,2 个国外品种与国内品种的差异逐渐增加。

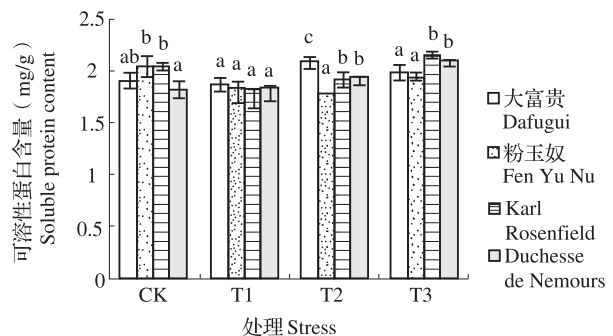


图 7 水分胁迫下 4 个芍药品种叶片的可溶性蛋白含量

Fig. 7 Soluble protein content of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.8 水分胁迫对植株 SOD 活性的影响

由图 8 可见,随着水分胁迫的加重,4 个芍药品种叶片的 SOD 活性变化不一,但总体活性均呈增强趋势:大富贵的 SOD 活性先升高再降低,在轻度水分胁迫(T1)时达到最大;粉玉奴与 Duchesse de Nemours 的 SOD 活性也呈先增加后减少的趋势,但却都在中度水分胁迫(T2)时达到顶峰;Karl Rosenfield 的 SOD 活性则随着水分的减少一直呈现增加

的趋势。由此可以发现,2 个国外品种的 SOD 活性增幅都明显高于 2 个国内品种。

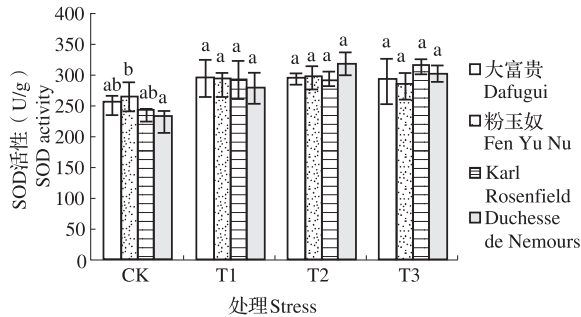


图 8 水分胁迫下 4 个芍药品种叶片的超氧化物歧化酶活性

Fig.8 SOD activity of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.9 相关光合指标变化

2.9.1 水分胁迫对芍药叶片最大净光合速率的影响 随着水分胁迫程度的不断增加,4 个芍药品种叶片的最大净光合速率均呈明显的下降趋势(图 9-A),这说明水分胁迫对 4 个品种芍药的光合作用产生了明显的抑制作用。Duncan 方差分析表明,4 个品种的最大净光合速率在正常水分处理(CK)时无明显差异,而 Karl Rosenfield 在中度水分胁迫(T2)和重度水分胁迫(T3)时显著低于其他 3 个品种。由此可以推测,Karl Rosenfield 的光合作用在土壤饱

和含水量低于 35% 时对水分胁迫的反应更快。

2.9.2 水分胁迫对芍药叶片光饱和点的影响 由图 9-B 可知,4 个芍药品种的光饱和点均随土壤水分的减少而呈递减的趋势。Duncan 方差分析表明,Karl Rosenfield 与大富贵在 4 种水分条件下差异均显著;与粉玉奴仅在轻度水分胁迫(T1)条件下差异不显著;与 Duchesse de Nemours 则除在正常水分处理(CK)外其他处理差异均显著;而这 3 个品种只有在中度水分胁迫(T2)开始,差异逐渐明显。这表明,Karl Rosenfield 较其他 3 个品种更能利用低光量子密度,对水分胁迫的光适应性更强。

2.9.3 水分胁迫对芍药叶片光补偿点的影响 由图 9-C 可知,随着水分胁迫程度的不断增加,各品种的光补偿点都呈现下降的变化趋势。在正常水分处理(CK)和轻度水分胁迫(T1)条件下,大富贵与粉玉奴的光补偿点高于另外 2 个品种;而在中度水分胁迫(T2)和重度水分胁迫(T3)条件下,大富贵与粉玉奴的光补偿点则低于另外 2 个品种。这说明,在土壤饱和含水量高于 35%~40% 时,2 个国外品种比 2 个国内品种有更强的耐弱光能力;相反,当土壤饱和含水量低于 35%~40% 时,2 个国内品种比 2 个国外品种有更强的耐弱光能力。

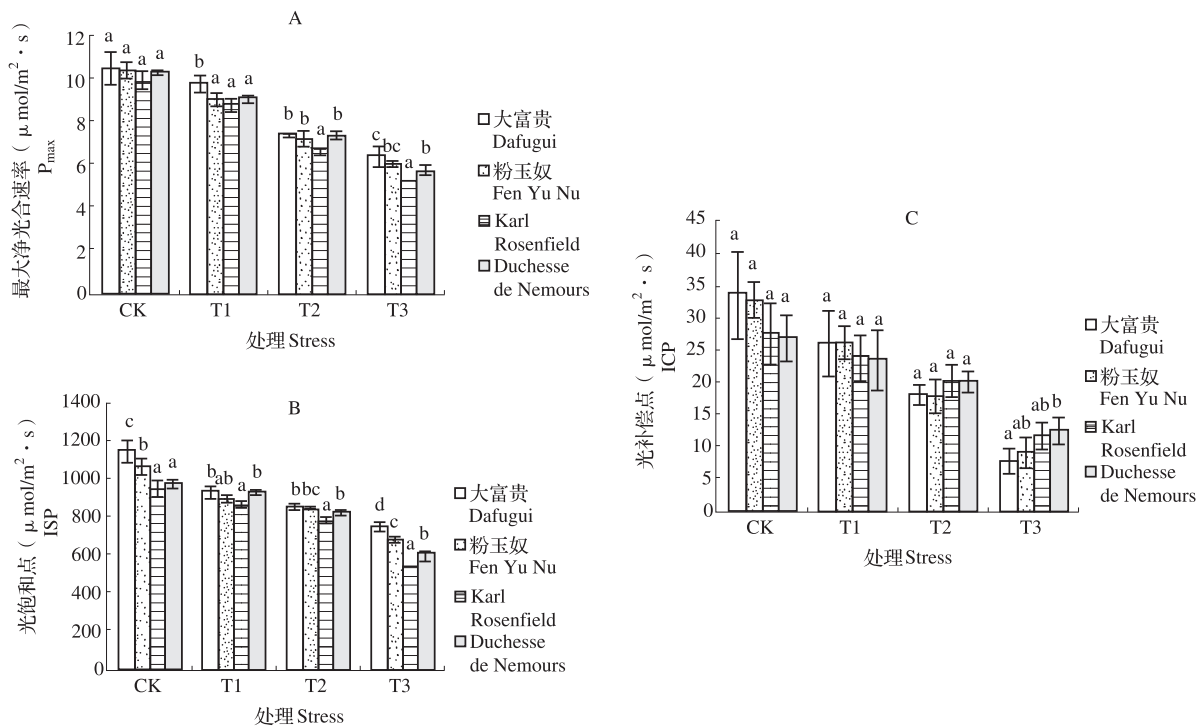


图 9 水分胁迫下 4 个芍药品种叶片的最大净光合速率、光饱和点和光补偿点

Fig.9 P_{max} , LSP and LCP of leaves of four herbaceous peony cultivars under water stress

2.10 不同芍药品种的抗旱性综合评价

环境胁迫对植物体的影响是多方面的,但最终体现在植物的生长和发育上。因此,本研究首先通过对不同水分胁迫条件下 11 个抗旱指标的相关性进行分析,再将与表型性状在 0.05 水平和 0.01 水平相关的指标提取出来用于主成分分析,最后利用隶属函数法对 4 个芍药品种的抗旱性进行综合评价。

2.10.1 抗旱指标的相关性分析 对 4 个芍药品种

的各项抗旱生理指标进行简单相关分析(表 2)表明,表型性状与相对含水量、最大净光合速率、光饱和点和光补偿点呈极显著负相关,与相对电导率、丙二醛含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性则呈极显著正相关;其他指标间也呈现一定的相关性。由此可见,用多个生理生化指标进行抗旱性综合评价可以避免各指标间所提供的信息出现重叠和疏漏。

表 2 4 个芍药品种的抗旱指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis among drought resistance indices of four herbaceous peony cultivars

抗旱指标 Drought resistance indexes	表型性状 Phenotypic traits	相对 含水量 Relative water content	相对 电导率 Relative electric conductivity	丙二醛 MDA	可溶性糖 Soluble sugar content	脯氨酸 Proline content	可溶性蛋白 Soluble protein content	SOD	最大净光 合速率 P _{max}	光饱 和点 LSP	光补 偿点 LCP
表型性状	1										
相对含水量	-0.761 **	1									
相对电导率	0.838 **	-0.856 **	1								
丙二醛	0.799 **	-0.765 **	0.878 **	1							
可溶性糖	0.810 **	-0.802 **	0.914 **	0.934 **	1						
脯氨酸	0.902 **	-0.854 **	0.950 **	0.868 **	0.912 **	1					
可溶性蛋白	0.264	-0.105	0.289 *	0.244	0.332 *	0.346 *	1				
SOD	0.498 **	-0.540 **	0.585 **	0.652 **	0.690 **	0.531 **	0.156	1			
最大净光合速率	-0.787 **	0.837 **	-0.900 **	-0.836 **	-0.898 **	-0.916 **	-0.382 **	-0.622 **	1		
光饱和点	-0.720 **	0.780 **	-0.817 **	-0.751 **	-0.810 **	-0.832 **	-0.394 **	-0.522 **	0.919 **	1	
光补偿点	-0.797 **	0.798 **	-0.858 **	-0.769 **	-0.805 **	-0.901 **	-0.283	-0.434 **	0.883 **	0.849 **	1

** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关
** and * mean significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively

2.10.2 抗旱指标权重的确定 根据相关性分析的结果,对于表型性状呈极显著相关的相对含水量、相对电导率、丙二醛含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性、最大净光合速率、光饱和点和光补偿点 9 个生理生化指标进行主成分分析(表 3)。从表 3 中可知,第 1 主成分的贡献率达到了 82.097%,可以代表原始指标的绝大部分信息。因此,以第 1 主成分分析各指标的负荷量,计算各指标对 4 个芍药品种抗旱性的作用大小,确定权重(表 4)。

2.10.3 抗旱指标的隶属度及综合指数值 计算出 4 个芍药品种抗旱性相关指标的隶属度值,再对各指标进行合成,计算出 4 个芍药品种的抗旱性综合指数(表 5)。由于植物的抗旱性与表型性状呈负相关,而本研究以水分胁迫下各芍药品种的表型性状为抗旱性衡量指标,因此综合指数越大,植物的抗旱能力越弱;综合指数越小,植物的抗旱能力则越强。根据表 5 中抗旱性综合指数的大小,得出 4 个芍药品种的抗旱性强弱排序:Karl Rosenfield > Duchesse de Nemours > 粉玉奴 > 大富贵。

表 3 4 个芍药品种抗旱性指标的特征根及相应贡献率

Table 3 Eigenvalue and contribution rate of drought resistance indices of four herbaceous peony cultivars

主成分 Principal components	特征根 Characteristic value	贡献率(%) Contribution rate	累计贡献率(%) Cumulative contribution rate
1	7.389	82.097	82.097
2	0.691	7.681	89.778
3	0.300	3.329	93.106
4	0.238	2.644	95.750
5	0.141	1.562	97.312
6	0.100	1.114	98.426
7	0.059	0.654	99.081
8	0.046	0.509	99.590
9	0.037	0.410	100.000

表 4 4 个芍药品种抗旱性指标的负荷量和权重

Table 4 Capacity and weight of drought resistance indices of four herbaceous peony cultivars

抗旱指标 Drought resistance indexes	负荷量 Load capacity	$ F \times Y $	权重 Weight
相对含水量 Relative water content	-0.892	0.732305	0.109893
相对电导率 Relative electric conductivity	0.958	0.786489	0.118024
丙二醛 MDA	0.917	0.752829	0.112973
可溶性糖 Soluble sugar content	0.955	0.784026	0.117654
脯氨酸 Proline content	0.961	0.788952	0.118393
SOD	0.668	0.548408	0.082296
最大净光合速率 P_{max}	-0.963	0.790594	0.118640
光饱和点 LSP	-0.899	0.738052	0.110755
光补偿点 LCP	-0.904	0.742157	0.111371

表 5 4 个芍药品种抗旱性综合评价

Table 5 Comprehensive assessment of four herbaceous peony cultivars

抗旱指标 Drought resistance indexes	大富贵 Dafugui	粉玉奴 Fen Yu Nu	Karl Rosenfield	Duchesse de Nemours
相对含水量 Relative water content	0	0.899	0.075	1.000
相对电导率 Relative electric conductivity	1.000	0.293	0	0.386
丙二醛 MDA	1.000	0.850	0	0.358
可溶性糖 Soluble sugar content	1.000	0.397	0	0.138
脯氨酸 Proline content	1.000	0.672	0	0.216
SOD	0.527	0.484	1.000	0
最大净光合速率 P_{max}	0	0.395	1.000	0.472
光饱和点 LSP	0	0.407	1.000	0.657
光补偿点 LCP	0.111	0	0.889	1.000
综合指数 Comprehensive index	0.522	0.489	0.419	0.478
排名 Ranking	4	3	1	2

3 结论与讨论

研究表明,水分胁迫引发了芍药体内一系列的生理生化反应:随着水分胁迫的加重(土壤水分的减少),4 个芍药品种的外部形态表现趋于发黄、凋落,但大部分处理的叶片变黄、卷曲发干状况未超过 1/2,并且 2 个国外品种受旱害的速度要慢于国内品种;4 个芍药品种叶片的相对含水量呈下降的变化趋势;相对电导率逐渐增加,这与植物在逆境胁迫下细胞膜受损,透性增大,使电解质外渗量增加,膜透性增大程度与逆境胁迫程度有关的观点^[38]相一致。

干旱条件下,一些植物常在细胞内积累溶质(如丙二醛、脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白),以降低其渗透势,增加吸水能力,而在一定程度上维持膨压,有效地提高植物的渗透调节能力。研究表明丙二醛、脯氨酸、可溶性糖的含量均呈上升的变化趋势。而可溶性蛋白含量变化不一,说明不同芍药品种在不同的水分胁迫下,叶片内的可溶性蛋白含量变化是不稳定的,因此,不能有效地比较抗旱性。

干旱胁迫干扰植物细胞中活性氧产生与清除之间的平衡,使活性氧积累,导致植物细胞遭受氧化胁迫。植物在长期适应干旱胁迫的过程中形成了活性氧清除的酶促系统,干旱胁迫下,植物体内参与活性

氧清除的酶类包括 SOD 酶的活性一般都会增强,进而提高植物体抗氧化能力。本研究表明 4 个品种的 SOD 酶活性总体活性呈增强趋势,与前人研究结果^[39]相一致。

光合指标(最大净光合速率、光饱和点和光补偿点)则均随干旱胁迫的加重而降低。原因是干旱胁迫使植物的光合作用减弱,同化产物减少,生长受到抑制。轻度干旱下,气孔开度减小或关闭造成光合下降,严重干旱胁迫下,缺水会影响原生质的胶体状况、细胞膨压及同化物的运输与转化等方面造成光合下降。

综上所述,4 个芍药品种的表型性状与叶片相对含水量、相对电导率、丙二醛含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性、最大净光合速率、光饱和点和光补偿点等 9 个生理生化指标之间的相关性均较强,将 9 个指标进行主成分分析,再结合隶属函数法确定各指标与芍药抗旱性关系的大小,其中关系最大的指标是最大净光合速率,以下依次是脯氨酸含量、相对电导率、可溶性糖含量、丙二醛含量、光补偿点、光饱和点、相对含水量和 SOD 活性。最终计算出 4 个芍药品种的抗旱性强弱的排序:Karl Rosenfield > Duchesse de Nemours > 粉玉奴 > 大富贵。由国外引种的芍药切花品种 Karl Rosenfield 和 Duchesse de Nemours 在北京的气候条件下均可以正常生长、开花,而 2 个品种的抗旱性均强于我国芍药传统品种大富贵与粉玉奴,因此,可以将 Karl Rosenfield 和 Duchesse de Nemours 引种至我国年均降水量在 644 mm(参考北京市)左右的地区进行试种。

参考文献

- [1] 汤章程. 植物对水分胁迫的反应和适应性: II 植物对干旱的反应和适应性[J]. 植物生理学通讯, 1983(4): 1-7
- [2] 郭慧. 土壤干旱胁迫对 4 个芍药品种生理生化反应的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009
- [3] 金荣. 人工栽培条件下野生芍药的灌溉与施肥水平的选择与实验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007
- [4] 孔祥生, 张妙霞, 王学永, 等. 水分胁迫下 2 个牡丹品种生理生化差异比较[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 162-167
- [5] 刘林艳. 几个芍药品种的耐湿热生理生化特性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008
- [6] Hsiao T C. Plant responses to water stress[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1973, 24: 519-570
- [7] 石超, 唐婉, 马玉磊, 等. 4 种连翘属植物对土壤含水量变化的生理反应[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 8-11
- [8] 郝建军, 康宗利, 于洋. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [9] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008
- [10] 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
- [11] 王琪, 于晓南. 3 种彩叶树对低温的生理响应及抗寒性评价[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(5): 104-109
- [12] 尹春英. 青杨组不同种对干旱胁迫的反应差异[D]. 成都: 中国科学院成都生物研究所, 2005
- [13] 梁松洁. 北方地区 8 种藤本忍冬抗旱性比较研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004
- [14] 王霞, 侯平, 尹林克, 等. 水分胁迫对柽柳植物可溶性物质的影响[J]. 干旱区研究, 1999, 16(2): 6-11
- [15] 彭志红, 彭克勤, 胡家金, 等. 渗透胁迫下植物脯氨酸积累的研究进展[J]. 中国农学通报, 2002, 18(4): 80-83
- [16] 曹帮华. 刺槐抗旱抗盐特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005
- [17] 李德全, 邹琦, 程炳嵩, 等. 土壤干旱下不同抗旱性小麦品种的渗透调节和渗透调节物质[J]. 植物生理学报, 1992, 18(1): 37-44
- [18] 李跃强, 宣维健, 盛承发. 植物的低温蛋白[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1034-1039
- [19] 康俊梅, 樊奋成, 杨青川, 等. 干旱对苜蓿叶片可溶性蛋白的影响[J]. 草地学报, 2005, 13(3): 199-202
- [20] 徐莲珍, 蔡靖, 姜在民, 等. 水分胁迫对 3 种苗木叶片渗透调节物质与保护酶活性的影响[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 12-16
- [21] 孙国荣, 张睿, 姜丽芬, 等. 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
- [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] 高建社, 王军, 周永学, 等. 5 个杨树无性系抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 112-116
- [24] 卢从明, 张其德. 水分胁迫对光合作用影响的研究进展[J]. 植物学通报, 1994, 11(S): 9-14
- [25] 张超. 6 种绣线菊(*Spiraea* Linn.) 的干旱适应性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008
- [26] 姚苗笛. 芍药切花品种引种及繁殖研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
- [27] 于晓南, 宋焕芝, 王琪. 北美新芍药品种引种适应性初报[J]. 林业实用技术, 2011(12): 50-51
- [28] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [29] 苏华, 李永庚, 苏本营, 等. 地下水位下降对浑善达克沙地榆树光合及抗逆性的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(3): 177-186
- [30] 王艳慧, 高洪文, 王赞, 等. 胶质苜蓿种质资源苗期抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(3): 443-447
- [31] 何玮, 范彦, 徐远东, 等. 红三叶苗期抗旱性指标筛选及综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(4): 572-577
- [32] Raviv M, Blom T J. The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses[J]. Sci Hort, 2001, 88(4): 257-276
- [33] Gigon A, Matos A R, Laffray D, et al. Effect of drought stress on lipid metabolism in the leaves of *Arabidopsis thaliana* (Ecotype Columbia)[J]. Ann Bot, 2004, 94: 345-351
- [34] Nayer M, Reza H. Drought-induced accumulation of soluble sugars and proline in two maize varieties[J]. World Appl Sci J, 2008, 3(3): 448-453
- [35] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317-347
- [36] Hong D Y, Pan K Y, Zhou S L, et al. Peonies of the world[M]. Surrey: Royal Botanic Gardens Kew, 2010
- [37] Martin P. Peonies[M]. North America: Timber Press Inc., 1997
- [38] 蒲光兰, 袁大刚, 胡学华, 等. 土壤干旱对 3 个杏树品种生理生化特性的影响[J]. 浙江林学院学报, 2006, 22(4): 375-379
- [39] 王海珍, 梁宗锁, 郝文芳, 等. 白刺花(*Sophoraviciifolia*) 适应土壤干旱的生理学机制[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 106-110