

网络出版时间:2020-04-28 17:30 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2020.11.009
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200428.0926.009.html

3 种耧斗菜属植物幼苗对不同水分处理的形态生理响应及其抗性

陈丽飞,孟 缘,陈翠红,李家琦,王 薇,王冯熠,李晨赫,周蕴薇

(吉林农业大学 园艺学院,吉林 长春 130118)

【摘要】【目的】比较东北地区 3 种耧斗菜属植物幼苗在不同水分处理下的抗性,探索水分管理阈值,为其栽培管理提供理论依据。【方法】以 3 种耧斗菜属植物(尖萼耧斗菜、小花耧斗菜、耧斗菜)幼苗为材料,通过盆栽控水试验,设土壤相对含水量分别为 $(90\pm 5)\%$ (T1)、 $(70\pm 5)\%$ (T2)、 $(50\pm 5)\%$ (T3)和 $(30\pm 5)\%$ (T4)4 个处理,每 5 d 测定 1 次植株的形态,试验进行 10,15,20 d 时测定生理指标,试验 10 d 采样后对 T3、T4 组幼苗进行复水处理,比较 3 种耧斗菜属植物幼苗在不同水分处理下的表现及复水效果,采用隶属函数法比较 3 种耧斗菜属植物幼苗的抗性。【结果】3 种耧斗菜属植物幼苗在 T2 处理下外观评分、株高和冠幅均达到最大值;处理 10 d 时随着土壤含水量的下降,细胞膜透性、丙二醛含量、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量、花青素含量、SOD 活性和 POD 活性均呈先下降后上升趋势,最低值基本出现在 T2 组;可溶性蛋白、叶绿素含量均呈先上升后下降趋势,最高值均出现在 T2 组;T3、T4 组幼苗复水后部分生理指标有所恢复。不同水分处理下 3 种耧斗菜属植物的抗性强弱依次为尖萼耧斗菜>耧斗菜>小花耧斗菜。【结论】土壤相对含水量 $(70\pm 5)\%$ 为 3 种耧斗菜属植物幼苗生长的最佳水分条件,若考虑节水因素最低可降至 $(50\pm 5)\%$ 。

【关键词】 耧斗菜属植物;植物幼苗;水分处理;生理响应

【中图分类号】 S682.1⁺90.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)11-0077-10

Morphological physiological responses and resistance of seedlings of 3 *Aquilegia* L. species to different water treatments

CHEN Lifei, MENG Yuan, CHEN Cuihong, LI Jiaqi, WANG Wei, WANG Fengyi,
LI Chenhe, ZHOU Yunwei

(College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: 【Objective】The stress resistance of seedlings of three *Aquilegia* species in northeast China were compared and the water management threshold was explored to provide basis for planting and management of *Aquilegia* species. 【Method】Seedlings of 3 *Aquilegia* species (*A. oxysepala*, *A. parviflora* and *A. viridiflora*) were used to estimate the damage level and stress resistance by pot experiment under four water treatments including relative water contents of $(90\pm 5)\%$ (T1), $(70\pm 5)\%$ (T2), $(50\pm 5)\%$ (T3) and $(30\pm 5)\%$ (T4). Morphological indexes were measured every 5 days, while physiological indexes were measured on the days of 10, 15 and 20. Re-watering was conducted after 10 days for groups T3 and

【收稿日期】 2019-10-09

【基金项目】 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20180668KJ);吉林省林业厅科技推广示范项目(JLT2019-17);吉林省科技厅科技支撑计划重点项目(20190304008YY);优质特色寒地花卉资源评价与品种创制(吉林农业大学校内启动基金项目-博士启动基金);吉林省自然科学基金 2020 年度项目

【作者简介】 陈丽飞(1979—),女,吉林梅河口人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事观赏植物资源研究。

E-mail: zexichen@163.com

【通信作者】 周蕴薇(1970—),女,吉林九台人,教授,博士,博士生导师,主要从事观赏植物资源研究。E-mail: 844648283@qq.com

T4. The performance and re-watering effects of seedlings of *Aquilegia* species were compared under different water treatments and the stress resistance was compared by membership function. 【Result】 The maximum values of all seedlings in visual score, plant height and crown diameter appeared in the T2 group. With the reduction of relative water content in substrate, electrolyte leakage, contents of malondialdehyde, soluble sugar, proline, and anthocyanin, and activities of SOD and POD decreased firstly and then increased on day 10. Most minimum values appeared in the T2 group. The contents of soluble protein and chlorophyll increased firstly and then decreased, with the maximum values in the T2 group. Physiological indexes in groups T3 and T4 recovered partially after re-watering. Resistance was in the order of *A. oxypetala* > *A. viridiflora* > *A. parviflora*. 【Conclusion】 The best relative water content of substrate was $(70 \pm 5)\%$ for *Aquilegia* seedlings, and no less than $(50 \pm 5)\%$ for water-saving.

Key words: *Aquilegia* L. species; seedling; water treatment; physically response

近年来,我国东北地区年降雨量和可利用水资源总体呈下降趋势^[1-2],同时受到经济发展和人口增长的多重影响,三江平原湿地面积每年以 5 万 km² 的速度锐减^[3],导致东北地区农作物、经济林木以及观赏植物面临的干旱问题日益严重。此外,东北地区降水量时空分布不均,自 1987 年气温突变后,降水波动幅度显著增加^[4],出现洪涝灾害的风险加大,尤以 7 月份为东北局部地区特大洪涝灾害或旱害的高发时段^[5]。为了改善在多变气候下东北地区的生态环境,确定观赏植物对水分的耐受极限以及筛选耐旱、耐涝植物材料,成为观赏园艺的重要课题。

耧斗菜属(*Aquilegia* L.)植物为毛茛科(Ranunculaceae)多年生宿根草本植物,原产于欧洲和北美,现广泛分布于北半球国家。耧斗菜属植物叶型优美,花型独特,花色繁多,适应性强,是花坛花境与景观地被的优秀观赏花卉。目前国内外对耧斗菜属植物的研究主要集中在活性成分的定性定量分析^[6-7]以及种质资源多样性评价^[8-9]上,对耧斗菜抗旱栽培生理研究主要有 PEG 模拟干旱胁迫对耧斗菜叶片^[10]、根^[11]微观结构和种子萌发的影响^[12-13],以及尖萼耧斗菜^[14]、华北耧斗菜^[15]对干旱胁迫的生理响应方面,而对东北地区常见耧斗菜幼苗在不同水分处理下形态变化及生理响应的比较与抗性筛选尚未见报道。

本研究以东北地区常见的尖萼耧斗菜(*A. oxypetala*)、小花耧斗菜(*A. parviflora*)和耧斗菜(*A. viridiflora*)的 1 年生实生苗为材料,结合盆栽控水法,测定在不同水分处理下植株的生长状态和生理生化指标,分析并比较了 3 种耧斗菜属植物幼苗的受损程度和抗性,以期为其后续的栽培管理、园林应用及耧斗菜属植物的种质资源改良与创新提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2019 年 4—7 月在吉林农业大学设施农业基地的园艺温室内进行。供试小花耧斗菜、尖萼耧斗菜和耧斗菜种子,购于江苏省沭阳县思途园林绿化苗木场。2019 年 4 月将种子播种于育苗穴盘内,基质为草炭/沙子(体积比 3:1),播种后进行正常的栽培管理。当幼苗长至四叶一心时,于 6 月 25 日选择长势良好、株高和冠幅一致、无病虫害的正常幼苗植株,移栽至 9 cm×8 cm 的育苗钵中,基质为园土/草炭/珍珠岩(体积比 3:2:1)。每盆 1 株,缓苗 1 周后备用。

1.2 试验设计

采用控制土壤相对含水量法进行水分处理,共设定 4 个水分梯度,土壤相对含水量分别设为 $(90 \pm 5)\%$ (T1)、 $(70 \pm 5)\%$ (T2)、 $(50 \pm 5)\%$ (T3) 和 $(30 \pm 5)\%$ (T4)。每品种每处理 10 盆,重复 3 次。2019 年 7 月 6 日开始试验,每天 18:00 采用称重法称取钵、托盘、基质、植株的总质量并补充每日散失水分,使水分维持在各梯度范围内。试验开始后每 5 d 记录生长参数,在试验进行 10, 15, 20 d (10 d 采样后以 T2 组为基准对 T3 和 T4 组进行复水)时取下幼苗自下往上第 4、5 片叶放入冰盒中,带回实验室测定生理指标。每组测定重复 3 次。

1.3 测定指标及方法

(1)形态指标。株高、冠幅均用最小单位为 1 mm 的直尺测定,株高为从盆土表面到植株最高点的长度;冠幅为植株在东南方向、西北方向宽度的平均值。植株的外观评价参考 Niu 等^[16]的评分体系:5 分,未受损;4 分,轻微受损,整体生长状况仍较好;3 分,轻度受损,少于 50% 的叶片受损;2 分,中度受

损,50%~90%的叶片受损;1分,重度受损,90%以上的叶片受损;0分,植株死亡。

(2)生理指标。细胞膜透性采用电导率法测定,丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定,可溶性糖含量采用蒽酮法测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定,游离脯氨酸含量采用磺基水杨酸提取法测定,叶绿素含量采用丙酮-乙醇提取法测定,均参照文献[17]的方法进行。花青素含量参考王贵等[18]的方法测定。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定,以抑制 NBT 光还原 50%的酶量作为 1 个酶活力单位(U),SOD 活性以酶活力单位比每克鲜质量(U/g)表示[19];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,以 470 nm 波长下每 min 吸光值变化 0.01 的酶量作为 1 个酶活力单位(U),POD 活性以酶活力单位比每克鲜质量(U/g)表示[17]。

1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 20 进行数据统计分析,用单因素方差分析法 one-way ANOVA 和最小显著差异法 LSD 分析差异显著性,显著性水平 $P < 0.05$ 。制图采用 Microsoft office Excel 2007。

通过模糊数学中的隶属函数[20]方法,用试验开始 10 d 时的外观评价、株高、冠幅、叶绿素含量、花青素含量、丙二醛含量、细胞膜透性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量及 SOD、POD 活性 12 项指标,对 3 种耧斗菜属植物幼苗的抗性进行综合评价与比较。

对与抗旱性成正比的指标按式(1)计算,与抗旱性成反比的指标按式(2)计算。

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

$$R(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{j \min}) / (X_{j \max} - X_{j \min}) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为*i*种供试植物的*j*指标值, $X_{j \min}$ 为*j*指标的最小值, $X_{j \max}$ 为*j*指标的最大值, $R(X_{ij})$ 为*i*种供试植物*j*指标的抗性隶属值。

抗性隶属值计算公式为:

$$\bar{X}_i = \sum R(X_{ij}) / n$$

式中: \bar{X}_i 为平均抗性隶属值,平均抗性隶属值越大,抗性越强; n 为指标数量。

2 结果与分析

2.1 不同水分处理对 3 种耧斗菜属植物形态特征及外观评价的影响

3 种耧斗菜属植物在不同水分处理下,T2、T3 组植株叶片浓绿,叶柄挺拔,生长状态良好。T4 组处理初期(5 d)老叶变黄,处理中期(10 d)老叶枯黄,幼叶萎蔫,复水后整体长势有所恢复。T1 组植株受损最严重,处理初期(5 d)叶片出现黄边;处理中期(10 d)叶片枯黄,叶缘紫红色,植株萎蔫;处理后(20 d)叶片如薄纸状,易碎裂,严重时全株腐烂死亡。T4 组外观变化表明 3 种耧斗菜属植物均出现旱害症状,T1 组叶片外观变化表明 3 种耧斗菜属植物均出现涝害症状。3 种耧斗菜属植物的外观评价变化如图 1 所示,处理 10 d 时 T2 组评分均高于其他处理组,T3、T4 组外观评分均有下降趋势;T4 组 10 d 时与 0 d 相比降幅从大到小依次为:小花耧斗菜>耧斗菜>尖萼耧斗菜,分别下降了 40.00%,38.80%和 26.66%。复水后 T3、T4 组幼苗的外观评分均有所回升,尖萼耧斗菜复水 10 d 后外观评分 T3 组与 T2 组最为接近。试验过程中 T1 组幼苗的外观评分均保持下降趋势,且处理 5 d 后均低于其他处理组,耧斗菜处理 20 d 时 T1 组幼苗腐烂死亡。

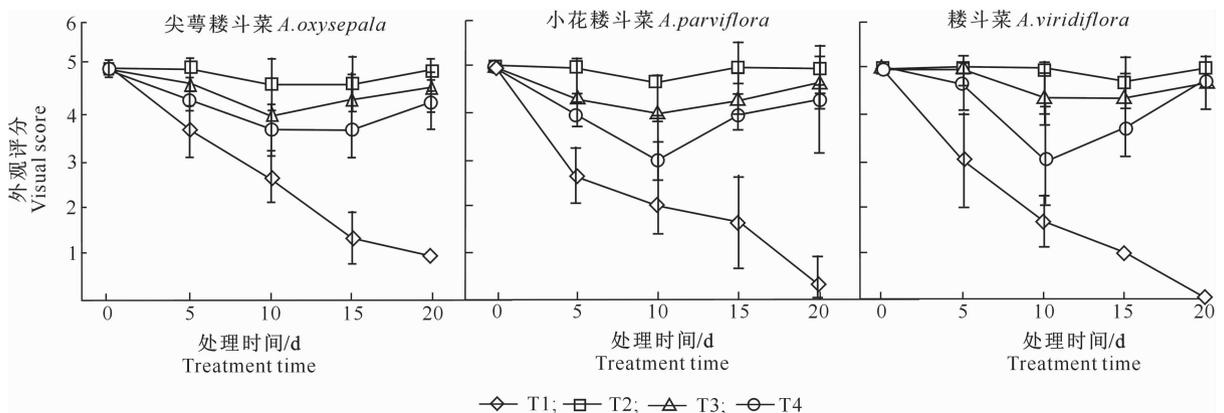


图 1 不同水分处理及复水对 3 种耧斗菜属植物幼苗外观评分的影响

Fig. 1 Effects of different water treatments and re-watering on visual score of three *Aquilegia* seedlings

由图 2 可知,3 种耧斗菜属植物在处理 0 d 时各组株高、冠幅无明显差异;10 d 时 T2 组与 T1 组株高差值从大到小依次为:小花耧斗菜>耧斗菜>尖

萼耧斗菜,分别高出 120.06%,98.87%和 52.25%;复水后 T3、T4 组的株高、冠幅增幅明显加大,但与 T2 组仍存在差距。

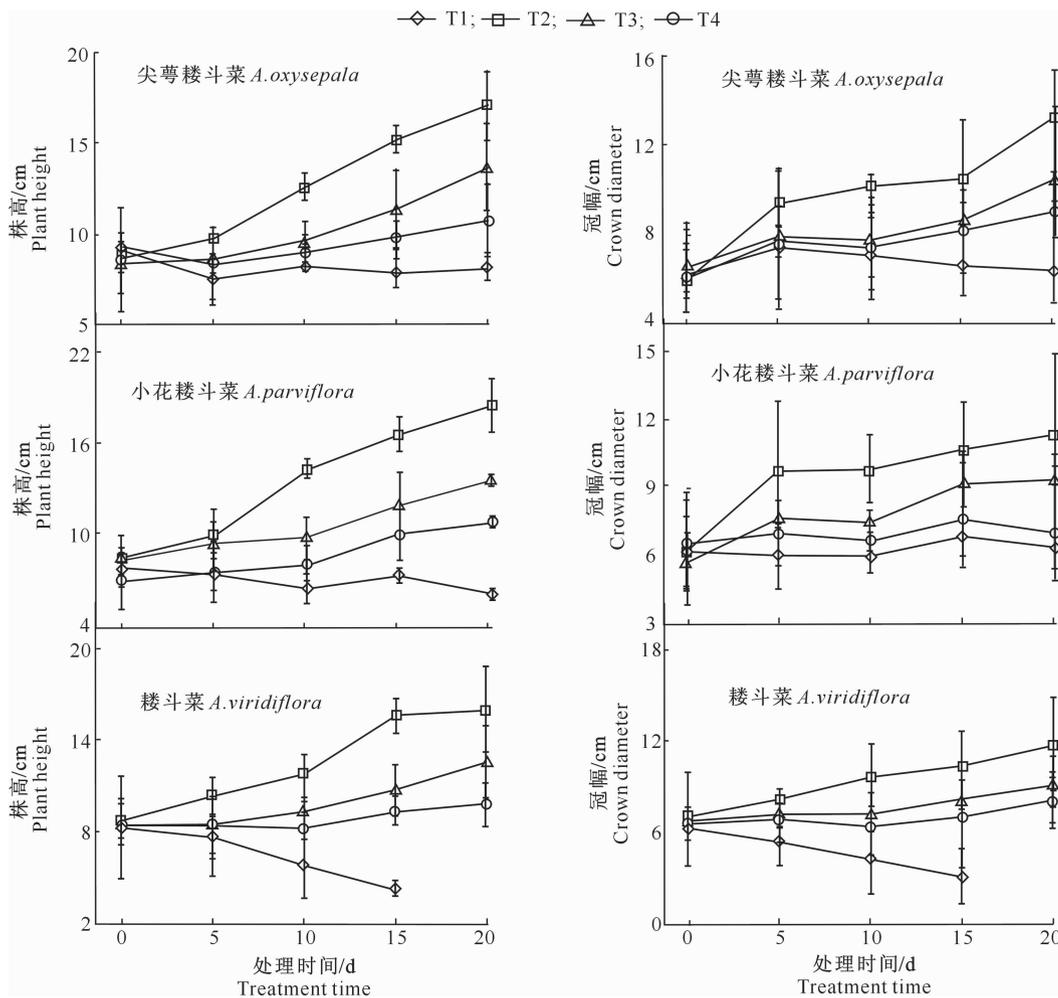


图 2 不同水分处理及复水对 3 种耧斗菜属植物幼苗株高和冠幅的影响

Fig. 2 Effects of different water treatments and re-watering on plant height and crown diameter of three *Aquilegia* seedlings

2.2 不同水分处理对 3 种耧斗菜属植物细胞膜透性和丙二醛含量的影响

由表 1 可知,处理中期(10 d)随着土壤相对含水量的降低,3 种耧斗菜属植物的细胞膜透性先下降后上升,最小值均出现在 T2 组,相比 T1 组下降幅度从大到小依次为:小花耧斗菜>耧斗菜>尖萼耧斗菜,分别下降了 75.24%,72.87%和 71.17%;T3 组细胞膜透性比 T2 组稍高,但仅耧斗菜两组差异显著。复水 10 d 后,3 种耧斗菜属植物 T4 组细胞膜透性均恢复至 T2 组水平。

处理 10 d 时,随着土壤相对含水量的降低,3 种耧斗菜属植物丙二醛含量均先下降后上升,最低值均出现在 T2 组;T3 处理组略高于 T2 组,但均无显著差异;相比 T1 组,T2 组下降幅度从大到小依次为:耧斗菜>小花耧斗菜>尖萼耧斗菜,分别下降了

83.33%,79.31%和 77.33%。复水后,3 种耧斗菜属植物 T4 组的丙二醛含量均较处理 10 d 时有所下降,但与 T2 组无显著差异。

2.3 不同水分处理对 3 种耧斗菜属植物渗透调节物质含量的影响

由图 3 可知,处理 10 d 时随着土壤相对含水量的下降,3 种耧斗菜属植物幼苗可溶性糖含量均先下降后上升,最低值出现在 T2 组,相比 T1 组降幅从大到小依次为:尖萼耧斗菜>小花耧斗菜>耧斗菜,分别下降了 74.65%,69.92%和 59.13%。复水 5 d 后,3 种耧斗菜属植物 T3、T4 组可溶性糖含量均较处理 10 d 时下降;复水 10 d 后,小花耧斗菜 T3 组可溶性糖含量低于 T2 组 26.59%,而耧斗菜 T4 组低于 T2 组 14.04%。

表 1 不同水分处理及复水对 3 种楼斗菜属植物幼苗细胞膜透性和丙二醛含量的影响
Table 1 Effects of different water treatments and re-watering on electrolyte leakage and malondiadehyde content of three *Aquilegia* seedlings

物种 Species	处理 Treatment	细胞膜透性/% Electrolyte leakage			丙二醛含量/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$) Content of malondiadehyde		
		10 d	15 d	20 d	10 d	15 d	20 d
尖萼楼斗菜 <i>A. oxysepala</i>	T1	25.67±4.64 a	35.27±4.51 a	39.17±1.16 a	0.075±0.007 a	0.099±0.016 a	0.215±0.027 a
	T2	7.40±1.61 c	5.87±1.81 c	7.23±0.35 b	0.017±0.009 c	0.024±0.011 b	0.025±0.008 b
	T3	7.67±0.87 c	5.40±0.78 c	7.60±1.53 b	0.018±0.009 c	0.025±0.010 b	0.026±0.010 b
	T4	13.07±0.76 b	11.23±1.99 b	8.33±2.11 b	0.037±0.009 b	0.026±0.007 b	0.017±0.010 b
小花楼斗菜 <i>A. parviflora</i>	T1	32.43±2.86 a	33.40±3.25 a	56.30±3.66 a	0.087±0.020 a	0.075±0.006 a	0.123±0.037 a
	T2	8.03±1.29 c	8.27±0.90 c	8.90±1.32 b	0.018±0.008 c	0.020±0.006 c	0.009±0.006 b
	T3	14.23±3.29 c	9.70±1.90 bc	7.03±1.36 b	0.035±0.010 bc	0.024±0.009 c	0.016±0.009 b
	T4	18.73±1.14 b	13.03±1.59 b	10.33±0.91 b	0.054±0.009 b	0.047±0.004 b	0.025±0.008 b
楼斗菜 <i>A. viridiflora</i>	T1	24.33±2.61 a	45.90±2.69 a	—	0.102±0.014 a	0.101±0.012 a	—
	T2	6.60±1.08 d	6.53±2.10 b	9.60±2.05 a	0.017±0.008 b	0.027±0.006 b	0.019±0.007 a
	T3	9.00±1.15 c	7.93±1.53 b	8.60±0.90 a	0.021±0.004 b	0.024±0.009 b	0.016±0.011 a
	T4	16.73±3.31 b	9.87±1.35 b	8.13±1.16 a	0.025±0.010 b	0.036±0.009 b	0.025±0.013 a

注:同列数据后标不同小写字母表示同一物种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters mean significant difference among different treatments for same species ($P < 0.05$). The same below.

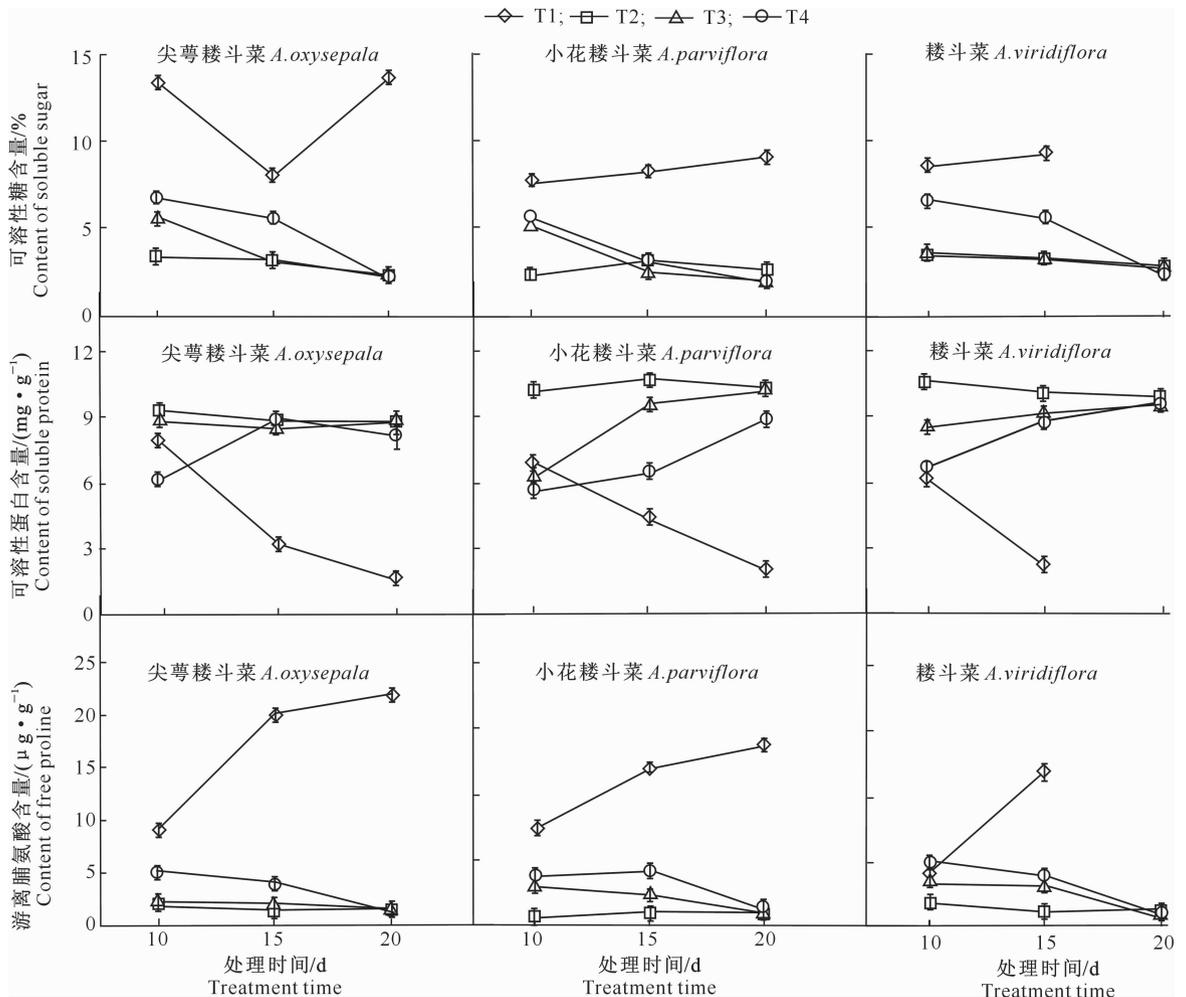


图 3 不同水分处理及复水对 3 种楼斗菜属植物幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig. 3 Effects of different water treatment and re-watering on content of osmotic adjustment substances of three *Aquilegia* seedlings

图 3 显示,处理 10 d 时随着土壤相对含水量的降低,3 种耧斗菜属植物幼苗可溶性蛋白含量均先上升后下降,最高值均出现在 T2 组,相比 T1 组增幅从大到小依次为:耧斗菜>小花耧斗菜>尖萼耧斗菜,分别增加了 71.73%,47.17%和 16.86%。复水 5 d 后,除尖萼耧斗菜外,小花耧斗菜和耧斗菜 T3、T4 组可溶性蛋白含量虽较处理 10 d 时有所回升,但与 T2 组差异仍显著。

图 3 表明,处理 10 d 时随着土壤相对含水量的下降,3 种耧斗菜属植物幼苗脯氨酸含量均先下降后上升,T2 组含量最低,T2 组相比 T1 组降幅从大到小依次为:小花耧斗菜>尖萼耧斗菜>耧斗菜,分别下降了 92.31%,78.60%和 59.45%。复水 10 d 后,3 种耧斗菜属植物 T4 组脯氨酸含量均大幅下降。

2.4 不同水分处理对 3 种耧斗菜属植物色素含量的影响

由表 2 可知,处理 10 d 时随着土壤相对含水量的降低,3 种耧斗菜属植物叶绿素含量均先上升后

下降,最高值出现在 T2 组,其较 T1 组增幅从大到小依次为:尖萼耧斗菜>小花耧斗菜>耧斗菜,分别增加了 85.98%,53.67%和 9.59%;相比 T2 组,T4 组降幅从大到小依次为:小花耧斗菜>耧斗菜>尖萼耧斗菜,分别降低了 48.96%,27.00%和 14.43%。复水 10 d 时,3 种耧斗菜属植物 T3、T4 组叶绿素含量均较处理 10 d 时有所上升,且 T3 组小花耧斗菜、耧斗菜叶绿素含量分别超出 T2 组 9.37%和 10.96%,尖萼耧斗菜 T4 组叶绿素含量超出 T2 组 18.47%。

表 2 显示,处理 10 d 时,随着土壤相对含水量的不断降低,3 种耧斗菜属植物的花青素含量均先下降后上升,最低值均出现在 T2 组,其较 T1 组降幅从大到小依次为:小花耧斗菜>尖萼耧斗菜>耧斗菜,分别下降了 88.41%,87.54%和 86.92%。复水 10 d 后除尖萼耧斗菜外,小花耧斗菜和耧斗菜 T4 组花青素含量虽较处理 10 d 时大幅下降,但仍显著高于 T2 组。

表 2 不同水分处理及复水对 3 种耧斗菜属植物幼苗色素含量的影响

Table 2 Effects of different water treatments and re-watering on pigment of three *Aquilegia* seedlings

物种 Species	处理 Treatment	叶绿素含量/(mg·g ⁻¹) Content of total chlorophyll			花青素含量/(μg·g ⁻¹) Content of anthocyanin		
		10 d	15 d	20 d	10 d	15 d	20 d
尖萼耧斗菜 <i>A. oxypepala</i>	T1	1.64±0.61 c	1.51±0.01 c	0.63±0.12 d	2.89±0.15 a	4.03±0.06 a	8.78±0.25 a
	T2	3.05±0.11 a	3.10±0.13 a	3.14±0.07 b	0.36±0.01 d	0.41±0.02 c	0.57±0.06 b
	T3	2.75±0.23 ab	2.96±0.17 a	3.06±0.10 b	1.35±0.08 c	0.39±0.02 c	0.49±0.05 b
	T4	2.61±0.25 b	2.57±0.10 b	3.72±0.02 a	2.08±0.17 b	1.52±0.13 b	0.64±0.08 b
小花耧斗菜 <i>A. parviflora</i>	T1	2.18±0.04 d	1.88±0.82 b	1.17±0.04 d	3.45±0.09 a	5.00±0.15 a	5.90±0.12 a
	T2	3.35±0.02 a	3.55±0.16 a	3.63±0.06 b	0.40±0.01 c	0.47±0.02 d	0.34±0.04 c
	T3	2.27±0.22 b	3.26±0.10 a	3.97±0.09 a	2.67±0.05 b	1.21±0.14 c	0.31±0.02 c
	T4	1.71±0.37 c	2.04±0.06 b	3.72±0.04 b	2.62±0.10 b	1.99±0.10 b	0.53±0.03 b
耧斗菜 <i>A. viridiflora</i>	T1	3.65±0.43 b	1.21±0.12 c	—	5.20±0.19 a	6.59±0.15 a	—
	T2	4.00±0.08 a	3.77±0.06 a	3.56±0.06 b	0.68±0.03 c	0.53±0.02 b	0.39±0.03 c
	T3	3.33±0.27 b	3.69±0.16 a	3.95±0.06 a	0.97±0.04 b	0.55±0.06 b	0.59±0.01 b
	T4	2.92±0.07 b	3.01±0.10 b	3.41±0.31 b	1.08±0.13 b	0.57±0.10 b	0.69±0.01 a

2.5 不同水分处理对 3 种耧斗菜属植物抗氧化酶活性的影响

由表 3 可知,处理 10 d 时随着土壤相对含水量的降低,3 种耧斗菜属植物幼苗 SOD 活性均先下降后上升,T1 组 SOD 活性最高,T2、T3 组 SOD 活性较低;与 T1 组相比,T2 组 SOD 活性下降幅度从大到小依次为:耧斗菜>小花耧斗菜>尖萼耧斗菜,分别下降了 23.85%,21.26%和 20.48%。复水 10 d 后,小花耧斗菜 T3 组、耧斗菜 T4 组 SOD 活性分别较 T2 组低 5.35%和 4.98%。

表 3 显示,处理 10 d 时,随着土壤相对含水量的降低,3 种耧斗菜属植物幼苗的 POD 活性均先下降后上升,其中 T1 组 POD 活性最高,T2、T3 组活性较低;相比 T1 组,T2 组降幅从大到小依次为:尖萼耧斗菜>小花耧斗菜>耧斗菜,分别下降了 48.27%,36.49%和 8.34%。复水 10 d 后,小花耧斗菜 T3、T4 组 POD 活性相比 T2 组分别降低 8.10%和 16.31%;尖萼耧斗菜 T3 组、耧斗菜 T4 组 POD 活性复水 10 d 与复水 5 d 相比虽然有所回落,但仍与 T2 组差异显著。

表 3 不同水分处理及复水对 3 种耧斗菜属植物幼苗抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of different water treatments and re-watering on antioxidant enzyme activity of three *Aquilegia* seedlings

物种 Species	处理 Treatment	SOD 活性/(U·g ⁻¹) SOD activity			POD 活性/(U·g ⁻¹) POD activity		
		10 d	15 d	20 d	10 d	15 d	20 d
尖萼耧斗菜 <i>A. oxysepala</i>	T1	120.55±0.10 a	115.27±0.23 b	90.27±12.84 b	868.19±0.26 a	598.81±0.04 a	898.19±0.11 a
	T2	95.86±0.13 d	102.85±0.14 d	110.31±0.18 a	449.13±0.08 b	429.34±0.24 d	428.75±0.12 d
	T3	106.56±0.19 c	109.87±0.30 c	100.10±0.20 ab	389.19±0.13 d	508.60±0.52 c	488.85±0.06 b
	T4	116.64±0.09 b	115.94±0.13 a	105.16±0.15 a	419.13±0.13 c	568.85±0.14 b	438.93±0.07 c
小花耧斗菜 <i>A. parviflora</i>	T1	129.73±0.16 a	87.25±0.69 d	79.63±0.81 c	628.73±0.16 a	538.92±0.08 a	762.14±1.31 a
	T2	102.15±0.08 d	113.63±0.08 b	111.50±0.15 a	399.32±0.07 d	349.11±0.11 d	488.64±0.12 b
	T3	105.67±0.22 c	116.85±0.09 a	105.53±0.12 b	499.12±0.09 b	448.79±0.12 c	449.04±0.05 c
	T4	124.25±0.11 b	97.92±0.19 c	112.06±0.07 a	479.08±0.09 c	469.17±0.17 b	408.95±0.07 d
耧斗菜 <i>A. viridiflora</i>	T1	124.94±0.06 a	69.94±0.11 d	—	359.23±0.10 b	808.43±0.08 a	—
	T2	95.14±0.09 c	107.34±0.10 b	123.38±0.17 a	329.26±0.10 c	368.86±0.07 d	428.75±0.06 c
	T3	91.96±0.10 d	102.94±0.06 c	115.52±0.11 c	359.26±0.09 b	479.05±0.06 c	489.23±0.14 a
	T4	110.37±0.14 b	108.88±0.22 a	117.24±0.57 b	449.05±0.05 a	538.92±0.08 b	458.68±0.12 b

2.6 3 种耧斗菜属植物抗性的综合评价

为了评价在不同水分处理下未复水时 3 种耧斗菜属植物的抗逆性,用处理 10 d 的 12 项指标数据对其幼苗抗性进行综合评价,各指标隶属函数值见表 4。由表 4 可见,尖萼耧斗菜、小花耧斗菜、耧斗

菜的平均抗性隶属函数值分别为 0.564,0.479 和 0.563,即 3 种耧斗菜属植物幼苗的抗性从大到小依次为尖萼耧斗菜>耧斗菜>小花耧斗菜,与所测生理生化指标表现基本一致。

表 4 不同水分处理下 3 种耧斗菜属植物幼苗各生理指标的隶属函数值

Table 4 Subject function values of three *Aquilegia* seedlings under different water treatments

指标 Index	尖萼耧斗菜 <i>A. oxysepala</i>	小花耧斗菜 <i>A. parviflora</i>	耧斗菜 <i>A. viridiflora</i>
株高 Plant height	0.420	0.410	0.440
冠幅 Crown diameter	0.330	0.400	0.500
外观评分 Visual score	0.542	0.531	0.520
细胞膜透性 Electrolyte leakage	0.669	0.575	0.573
丙二醛含量 Content of malondialdehyde	0.667	0.560	0.710
可溶性糖含量 Content of soluble sugar	0.614	0.458	0.580
可溶性蛋白含量 Content of soluble protein	0.618	0.356	0.420
游离脯氨酸含量 Content of free proline	0.629	0.540	0.570
叶绿素含量 Content of chlorophyll	0.618	0.407	0.520
花青素含量 Content of anthocyanin	0.483	0.383	0.710
SOD 活性 SOD activity	0.431	0.518	0.590
POD 活性 POD activity	0.750	0.609	0.620
平均隶属函数 Average membership function	0.564	0.479	0.563

3 讨论与结论

3.1 3 种耧斗菜属植物栽培中的最适土壤含水量

在保证基本生长量和观赏价值的基础上,探索水分阈值及复水后的生长恢复力,对筛选抗逆园林植物具有重要意义^[21]。本试验中 3 种耧斗菜属植物幼苗均在 T2 处理下生长状态最好,株高、冠幅、外观评分均最高,因此 T2 处理为 3 种耧斗菜属植物幼苗的最佳水分管理模式;T3 处理幼苗株高、冠幅均比 T2 处理小,表明在 T3 处理下 3 种耧斗菜属植物幼苗生长轻微受阻,但从外观评分来看,T3 叶片长势良好,复水后可以迅速恢复,因此 T3 处理下 3 种耧斗菜属植物能维持正常生长。T1、T4 组幼苗

从外观上分别出现了涝害症状和旱害症状,T4 组复水后虽然外观评分有所恢复,但是株高、冠幅与 T2 组相比表现较差,因此 T1、T4 处理均不适合 3 种耧斗菜属植物幼苗的生长。

3.2 不同水分处理下 3 种耧斗菜属植物细胞及抗氧化系统的响应

细胞膜脂过氧化产物丙二醛含量和细胞膜透性的变化幅度能反映植物的抗逆性^[22]。本试验中,尖萼耧斗菜叶片中丙二醛含量、细胞膜透性波动幅度均最小,表明细胞膜受损程度较小,植物体内产生了有效的防御机制。对青藏高原 6 种植物^[23]以及糜子^[24]的研究也得到相似结论。各物种 T1 组幼苗的丙二醛含量和细胞膜透性值均最高,表明 T1 处理

对 3 种耧斗菜属植物的膜系统造成的损害程度最大。

干旱胁迫下叶绿体结构受损会使叶片叶绿素含量下降^[25],其含量及变化反映植物受损情况及抗旱能力的大小,变化幅度大的抗性较低^[26]。本试验中各物种 T2 组幼苗叶绿素含量均最大,表明 T2 处理更适合 3 种耧斗菜属植物幼苗的生长;处理 10 d 时,T4 组尖萼耧斗菜叶绿素含量相比 T2 组降幅最小,表明尖萼耧斗菜抗旱能力较强。复水后耧斗菜、小花耧斗菜和尖萼耧斗菜 T3、T4 组叶绿素含量均有所恢复,复水后 10 d 有的甚至超过 T2 组,表明 3 种耧斗菜属植物的叶绿素含量均出现补偿效应,这与前人对豌豆^[27]和百合^[28]的研究结论相似。

抗氧化酶系统可有效清除水分胁迫下产生的过量自由基,使代谢恢复平衡^[29]。本试验中 T2 组幼苗 SOD 和 POD 活性均较低,表明 T2 处理对 3 种耧斗菜属植物的胁迫最小;随着土壤相对含水量的降低,3 种耧斗菜属植物幼苗的抗氧化酶活性均上升,这与华北耧斗菜^[15]、蚕豆^[30]和马齿苋^[31]在逆境下的反应相似。处理后期 T1 组幼苗 SOD 活性降低,表明过量的自由基导致代谢失衡,这与前人对茄子^[32]和日本莢蒾^[33]的研究结论相似。

3.3 不同水分处理下 3 种耧斗菜属植物渗透调节系统的响应

为了在逆境胁迫下维持细胞膨压,植物体内会主动积累一些有机渗透调节物质,如可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸等^[34-35]。在本试验中,3 种耧斗菜属植物的可溶性糖和游离脯氨酸含量在逆境下均上升,说明这 2 种物质在 3 种耧斗菜属植物的抗逆过程中具有重要作用,这与郑德承^[14]和杨阳等^[11]的研究结论相似;而在逆境下 3 种耧斗菜属植物可溶性蛋白含量均下降,这与前人对香柏^[36]的研究结果相似,但与对大花耧斗菜^[10]的研究结果存在差异,可能是物种或苗龄不同所致,可溶性蛋白在耧斗菜抗逆中的作用还有待进一步研究。

花青素是一类高水溶性色素,可降低细胞水势来抵御逆境^[37-38],花青素含量较低的品种有较强的抗性^[39]。本试验中,随着土壤相对含水量的下降,3 种耧斗菜属植物的花青素含量均发生显著变化,均以 T1 组花青素含量最高,且因受到胁迫而变红的叶片也表现出过高的花青素含量^[40],说明花青素在耧斗菜抗涝中起到重要作用。

综上所述,过高或过低的土壤含水量均会对 3 种耧斗菜属植物幼苗造成损害,(70±5)%的土壤相

对含水量为 3 种耧斗菜属植物幼苗生长的最适水分条件,若考虑节水因素最低可降至(50±5)%;花青素与耧斗菜属植物的抗涝关系更为密切;可溶性蛋白在耧斗菜属植物渗透调节中的作用还有待进一步研究。通过隶属函数值得出 3 种耧斗菜属植物抗性由强到弱依次为尖萼耧斗菜>耧斗菜>小花耧斗菜。

[参考文献]

- [1] 刘志娟,杨晓光,王文峰,等.气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J].应用生态学报,2009,20(9):2199-2206.
Liu Z J, Yang X G, Wang W F, et al. Characteristics of agricultural resources in three provinces of northeast China under global climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [2] 安刚,孙力,廉毅.东北地区可利用降水资源的初步分析[J].气候与环境研究,2005,10(1):132-139.
An G, Sun L, Lian Y. A primary analysis of utilizable precipitation in northeast China [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(1): 132-139.
- [3] 赵秀兰.近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(9):144-149.
Zhao X L. Influence of climate change on agriculture in northeast China in recent 50 years [J]. Journal of Northeast Agriculture University, 2010, 41(9): 144-149.
- [4] 李邦东,周旭,赵中军,等.近 50 年中国东北地区不同类型和等级降水事件变化特征[J].高原气象,2013,32(5):11-15.
Li B D, Zhou X, Zhao Z Z, et al. Change features of different types and grades of precipitation event in northeast China in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(5): 11-15.
- [5] 李叶妮,孙卫国,朱红,等.我国东北地区主要城市气温和降水量序列的多尺度分析[J].科学技术与工程,2015,15(9):23-31.
Li Y N, Sun W G, Zhu H, et al. Multi-time scale analysis on the variations of temperature and precipitation of main urban in northeast of China [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9): 23-31.
- [6] Mushtaq S, Aga M A, Qazi P H, et al. Isolation, characterization and HPLC quantification of compounds from *Aquilegia fragrans* Benth: their *in vitro* antibacterial activities against bovine mastitis pathogens [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 178: 9-12.
- [7] Noutsos C, Perera A M, Nikolau B J, et al. Metabolomic profiling of the nectars of *Aquilegia pubescens* and *A. canadensis* [J]. PLoS One, 2015, 10(5): e0124501.
- [8] Lega M, Fior S, Li M, et al. Genetic drift linked to heterogeneous landscape and ecological specialization drives diversification in the alpine endemic columbine *Aquilegia thalictroides* [J]. Journal of Heredity, 2014, 105(4): 542-554.
- [9] Bartkowska M P, Wong A, Sagar S P, et al. Lack of spatial

- structure for phenotypic and genetic variation despite high self-fertilization in *Aquilegia canadensis* (Ranunculaceae) [J]. *Hereditas*, 2018(121): 605-615.
- [10] 王金耀, 杨阳, 向云荣, 等. PEG 模拟干旱胁迫对楼斗菜叶片解剖结构的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(12): 121-124.
Wang J Y, Yang Y, Xiang Y R, et al. Effects of PEG simulated drought stress on the anatomical structure of *Aquilegia* leaves [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018, 46(12): 121-124.
- [11] 杨阳, 熊远兵, 郝晓泳. 干旱胁迫对楼斗菜根解剖结构及生理特性的影响 [J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(3): 1-7.
Yang Y, Xiong Y B, Hao X Y. Effect of drought stress on anatomical structure of columbine root and physiological characteristics [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2018, 39(3): 1-7.
- [12] 杜艳, 王娟, 陈冲, 等. 干旱胁迫对两种不同基因型楼斗菜种子萌发特性的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2017(1): 61-64.
Du Y, Wang J, Chen C, et al. Effect of drought stress on seed germination of two different genotypes *Aquilegia vulgaris* [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2017(1): 61-64.
- [13] 郝丽, 任瑞芬, 任才, 等. 干旱及盐胁迫对两种楼斗菜种子萌发的影响 [J]. *中国农学通报*, 2017, 33(27): 82-87.
Hao L, Ren R F, Ren C, et al. Effects of drought and salt stress on seed germination of two kinds of *Aquilegia viridiflora* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(27): 82-87.
- [14] 郑德承. 尖萼楼斗菜个体发育节律及抗旱性研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
Zheng D C. Study on ontogenetic rhythm and drought resistance of *Aquilegia oxysepala* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.
- [15] 李森, 袁晓娜, 侯非凡, 等. 华北楼斗菜 (*Aquilegia yabeana* Kitag) 的引种驯化及耐旱性评价 [J]. *河北农业大学学报*, 2015, 38(2): 48-71.
Li S, Yuan X N, Hou F F, et al. The introduction, domestication and drought tolerance assessment of *Aquilegia yabeana* Kitag [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2015, 38(2): 48-71.
- [16] Niu G, Rodriguez S D. Salinity tolerance of *Lupinus havadii* and *Lupinus texensis* [J]. *Hortscience*, 2007, 42(3): 526-528.
- [17] 张治安, 张美善, 蔚荣海. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
Zhang Z A, Zhang M S, Wei R H. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.
- [18] 王贵, 李宏伟, 林凡云, 等. 强光诱导小麦叶片花青素积累的研究 [J]. *西北植物学报*, 2010, 30(4): 754-761.
Wang G, Li H W, Lin F Y, et al. High light induced anthocyanin accumulation in wheat seedlings [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2010, 30(4): 754-761.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Gao J F. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [20] 王勇, 韩蕊莲, 梁宗锁. 水分胁迫对 4 种菊科蒿属植物抗氧化特性的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(10): 178-186.
Wang Y, Han R L, Liang Z S. Anti-oxidative responses to soil water stress for four *Artemisia* species [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2010, 38(10): 178-186.
- [21] 王莺璇. 7 种百合科园林地被植物的抗旱性研究 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2012.
Wang Y X. Study on the drought resistance of seven ground cover plants of Liliaceae [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2012.
- [22] Gao S, Wang Y, Yu S, et al. Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of two *Adonis* species in northeast China [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 259: 108795.
- [23] 潘昕, 邱权, 李吉跃, 等. 干旱胁迫对青藏高原 6 种植物生理指标的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3558-3567.
Pan X, Qiu Q, Li J Y, et al. Physiological indexes of six plant species from the Tibetan Plateau under drought stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3558-3567.
- [24] 贾根良, 代惠萍, 冯佰利, 等. PEG 模拟干旱胁迫对糜子幼苗生理特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2008, 28(10): 2073-2079.
Jia G L, Dai H P, Feng B L, et al. Biochemical characteristics in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) seedlings under PEG simulated drought stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2008, 28(10): 2073-2079.
- [25] Nahar K, Hasanuzzaman M, Alam M M, et al. Glutathione-induced drought stress tolerance in mung bean: coordinated roles of the antioxidant defence and methylglyoxal detoxification systems [J]. *AoB Plants*, 2015, 7: 69.
- [26] 柴春荣, 穆立蕾, 梁鸣, 等. 北方 6 种绿化灌木水分胁迫的生理响应 [J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(6): 12-15.
Chai C R, Mu L Q, Liang M, et al. Physiological responses of six northern greening shrubs to water stress [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(6): 12-15.
- [27] 张红萍, 李明达. 水分胁迫后复水对豌豆叶片叶绿素含量的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 178-181.
Zhang H P, Li M D. Effects of water stress and rewatering on chlorophyll content in pea leaves [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 178-181.
- [28] 李文英. 干旱胁迫对百合生长及生理生化的影响 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.
Li W Y. Effects of drought stress on growth and physiological biochemical characteristics of lily [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2018.
- [29] 张迎新, 李长海, 周玉迁. 水分胁迫对蛇莓、娟毛葡萄、委陵菜抗