

屋顶绿化 5 种常绿植物的抗旱性研究

杨 壹,刘建军\*

(西北农林科技大学 风景园林艺术学院,陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**为了筛选更多耐粗放管理且抗旱性强的屋顶绿化常绿植物,选取在西安露地广泛应用且须根发达无主根的 5 种常绿灌木:金叶女贞、金边黄杨、南天竹、海桐、红叶石楠进行干旱胁迫,通过观察植株外部形态特征的变化,并对其叶片的生理指标:相对含水量、细胞质膜透性、叶绿素、丙二醛、脯氨酸的含量进行测定,利用隶属函数值法进行综合评价。结果表明,5 种常绿灌木的抗旱性排序依次为金边黄杨>海桐>红叶石楠>金叶女贞>南天竹,应用于屋顶绿化时,金叶女贞、南天竹应加强灌溉措施。总体而言说明 5 种常绿灌木基本能适应西安市的气候条件和屋顶环境。

**关键词:**屋顶绿化;常绿植物;抗旱性

**中图分类号:**S731.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)01-0073-07

Drought Resistance of Five Kinds of Roof Greening Evergreen Plants

YANG Yi,LIU Jian-jun\*

(College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to select more roof greening plants with strong drought resistance and adaptability to low level management, five evergreen shrubs without main roots that are widely used in open field greening in Xi'an were selected as research objects, including *Ligustrum × vicaryi*, *Buxus megistophylla*, *Nandina domestica*, *Pittosporum tobira*, and *Photinia × fraseri*. The drought resistance of five shrub species were evaluated by measuring their morphological changes, water content, cytoplasmic membrane permeability, chlorophyll content, malondialdehyde content and proline content under the simulated drought conditions. The comprehensive evaluation using membership functions showed that the order of drought resistance from strong to weak was *B. megistophylla*>*P. tobira*>*P. × fraseri*>*L. × vicaryi*>*N. domestica*. The results indicated that irrigation measures should be strengthened when the shrub species with weak drought resistance were used in roof greening, such as *L. × vicaryi* and *N. domestica*. In short, the five evergreen shrub species could basically adapt to the climatic conditions and roof environment of Xi'an.

**Key words:** roof greening; evergreen plant; drought resistance

当前,经济大发展快速推动着我国城市化进程,空气污染、交通堵塞、噪音超标、城市内涝、热岛效应等各种城市问题接连出现,城市生态系统变得越来越脆弱。国际生态和环境组织提出,要使城市获得最佳的环境,人均占有绿地面积需要达到 60 m<sup>2</sup><sup>[1]</sup>,据《西安统计年鉴》数据显示,截至 2017 年末西安市人均公园绿地面积仅为 12.04 m<sup>2</sup>,可见城市水平方

向发展已不能满足城市绿化的需要,为了实现绿色生态城市的目标,弥补地面绿化空间的不足,“第五立面”索取绿色应运而生,屋顶绿化和垂直绿化成为增加城市绿量的重要方式<sup>[2]</sup>。

由于屋顶特殊的环境条件使可应用在屋顶绿化的木本植物非常有限,以往的文献中较多研究地被植物的抗性,关于屋顶常绿乔灌木的耐热、抗旱性等

收稿日期:2019-04-08 修回日期:2019-09-06  
基金项目:西安市社会科学基金项目:秦岭林药植物资源挖潜及开发技术中试推广(K3130216010)。  
作者简介:杨 壹,女,硕士,研究方向:园林植物栽培及生理。E-mail:827338289@qq.com  
\* 通信作者:刘建军,男,博士,教授,博士生导师,研究方向:城市绿地生态系统服务功能评价。E-mail:lj@nwsuaf.edu.cn

缺乏系统研究。殊不知,常绿植物一年四季都能进行光合作用释放氧气,蒸腾作用也相对频繁,降温增湿效果明显,同时,常绿乔灌木拥有更好的景观效果,尤其在北方的秋冬季节是主要的绿色来源<sup>[3]</sup>。西安市在地理位置上属于西北地区,其气候特点决定了绿色屋顶植物健康生长的难度,为建立科学的屋顶绿化常绿木本植物选择体系,必须重视对其适应性和观赏性研究。因此,基于对西安市现有不同类型、不同功能的 13 个屋顶绿化(花园式 7 个,简单式 6 个)的植物种类、生长势、养护管理进行调研后,选取 5 种常绿灌木综合分析其抗旱性,从而长效发挥生态效益,为西安市及周边地区屋顶绿化的全面发展提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间、地点

试验于 2018 年 9 月 9 日至 10 月 7 日在陕西省杨陵区西北农林科技大学南校区林学院雨棚(通风透光)内进行干旱胁迫,以隔绝外部水分防止自然降水影响数据。

杨陵(34°14'N,107°59'E)属东亚暖温带半湿润半干旱气候区,具有春暖多风,夏热多雨,秋热凉爽多连阴雨,冬寒干燥等明显的大陆性季风气候特征。2013—2017 年,年均气温 13.9℃~14.7℃,年均日照时数 2 018.7~2 191.9 h,平均风速 1.9~2.2 m·s<sup>-1</sup>,年均降水量 387~616 mm,相对湿度 63%~68%,无霜期 195~228 d,年总太阳辐射量 480.57 MJ·m<sup>-2</sup>。东风和西风为区内常年主导风向,干旱是最严重的灾害性天气。

### 1.2 试验材料

选取在西安露地广泛应用且须根发达无主根的 5 种常绿灌木金叶女贞(*Ligustrum×vicaryi*)、金边黄杨(*Buxus megistophylla*)、南天竹(*Nandina domestica*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、红叶石楠(*Photinia×fraseri*)进行干旱胁迫,均为 2 a 生苗。

### 1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 采用连续干旱的方法进行胁迫<sup>[4]</sup>。根据西安市的气候特点以及控水要求,以 7 d 为一个测定周期,胁迫时间分别为 0(CK)、7、14、21、28 d,试验前 3 d 对所有植株进行连续浇水处理,使每盆基质达到田间持水量,此后断水使各植物在自然状态下生长。7:30—8:30 选取生长健壮、无病虫害且相同部位的功能叶片,测定各项土壤含水量及生长生理指标,每个处理每项指标重复 3 次。

1.3.2 植株形态指标测定 依据 5 种植物的长势、叶片质地和颜色变化、叶片萎蔫以致干枯等变化情

况,设置 5 个等级进行评定:S. 植株观赏性能好,正常生长,叶色鲜亮饱满,无变色及死亡;A. 植株观赏性较好,生长缓慢,叶色基本正常,叶片轻微卷曲;B. 植株观赏效果一般,部分叶片轻度卷曲、萎蔫、变薄、发黄;C. 植株观赏效果较差,部分枝条叶片中度卷曲、萎蔫、变薄、黄化脱落;D. 植株失去观赏价值,整个植株失水严重,部分死亡。

1.3.3 植株生理指标测定 叶片相对含水量(RWC)采用烘干法<sup>[5]</sup>;细胞质膜透性(EC)的测定采用电导率法<sup>[6]</sup>;叶绿素含量的测定采用浸提法<sup>[7]</sup>;丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法<sup>[8]</sup>;脯氨酸(Pro)含量的测定采用茚三酮比色法。

1.3.4 植物抗旱能力隶属度的评价 采用 Excel 2007 录入数据、SPSS23 进行方差分析和多重比较、SigmaPlot 软件绘制图表,然后用模糊数学中隶属函数法对参试植物抗旱性进行综合评判。具体计算方法如下:

如果指标与抗旱性呈正相关, $R(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ;如果指标与抗旱性呈负相关, $R(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

式中, $R(X_{ij})$  为  $i$  植物  $j$  指标的隶属函数值; $X_{ij}$  为  $i$  植物  $j$  指标的测定值; $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别为指标的最大值和最小值<sup>[9]</sup>。将 5 种植物的隶属函数值进行计算,取平均值,均值越大抗旱性越强,并对其平均值进行排序,得出结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫土壤含水量的变化

土壤是植物赖以生存的基础,测定干旱胁迫下的土壤水分能够了解不同阶段土壤水分状况以及变化趋势。由图 1 可见,土壤含水量随干旱时间的持续逐渐平缓下降,最终保持在 30%~40%。金边黄杨的土壤含水量在干旱 28 d 与对照相比降低了 49.11%,红叶石楠降低了 56.94%,南天竹降低了 58.10%,金叶女贞降低了 61.35%,海桐降低了 64.15%,金边黄杨的土壤含水量下降速度慢于其他 4 种常绿灌木,红叶石楠下降的速度最快。

### 2.2 干旱胁迫对植物形态的影响

植物生长过程对缺水最为敏感,即抗性强弱最先可将外部形态的变化作为直观依据。由表 1 可见,在干旱期间各植物都出现了旱害症状。金边黄杨的受害程度相对较轻,胁迫第 28 天仍能保持一定观赏价值,只出现叶质变薄、叶片稍微下垂的情况,说明它抗旱性最强。海桐的抗旱能力次之,28 d 时失水较为严重,观赏性较差。南天竹在胁迫 21 d

时,少部分叶片干枯黄化但不反卷,28 d 时失水严重。红叶石楠试验开始时植物形态欠佳,胁迫 14 d 失水状况明显,28 d 时叶柄开裂,失去观赏价值。金叶女贞受干旱胁迫的变化较大,从胁迫第 7 天开始

就出现叶片下垂、萎蔫的情况,28 d 时金叶女贞更为严重,下一个周期观察植物时发现金叶女贞、红叶石楠植株全部死亡,其他植物复水后也均未恢复,最终死亡。

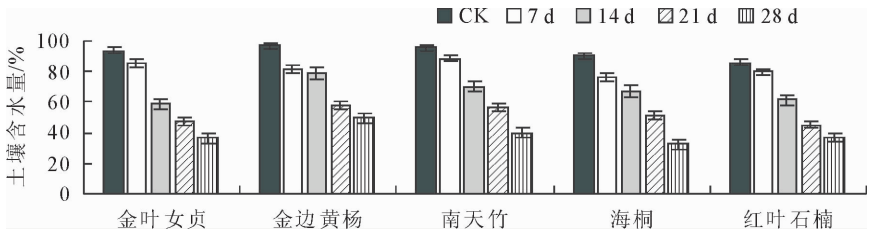


图 1 干旱胁迫下植物土壤含水量的变化  
Fig. 1 Effect of drought stress on soil water

表 1 干旱胁迫下植物形态表现

植物种类	胁迫时间				
	CK	7 d	14 d	21 d	28 d
金叶女贞	S	A	B	C	D
金边黄杨	S	S	A	B	B
南天竹	S	A	A	B	C
海桐	S	S	A	B	C
红叶石楠	A	B	C	C	D

2.3 干旱胁迫对叶片相对含水量的影响

水分是植物生长活动周期中不可或缺的物质,相对含水量能够反映植物的生理生化代谢活动,能体现植物保水力和需水情况,从而显示出适应干旱环境的能力,抗旱力弱的植物水分亏损严重,相对含水量下降速率快<sup>[10]</sup>。由图 2 可知,5 种植物的 RWC 随干旱程度加深总体呈降低态势,胁迫开始时,各植物间相对含水量有所不同,是受植物自身叶片的厚度、体内结构所决定的。胁迫 7 d 时,除金叶女贞、

红叶石楠的 RWC 下降外,其余略有升高,可能干旱初期呼吸短期上升导致根系吸水力增强,说明短期干旱对它们影响不大。胁迫 14 d 时,RWC 均有不同程度下降,金叶女贞降幅最大,超过 50%,抗旱能力较差。胁迫 21 d 时,金叶女贞、金边黄杨和海桐的 RWC 有所上升,可能是受当时降水影响,空气湿度增加导致叶片吸水,而红叶石楠的 RWC 下降,降幅达到 30%,说明对水分更为敏感。胁迫 28 d 时,RWC 继续下降,金边黄杨和南天竹的 RWC 在 50% 以上,对于干旱的适应力较强。总体而言,金边黄杨的 RWC 在整个胁迫期间降幅较平缓,叶片持水能力最强,对于干旱适应性稳定;南天竹、海桐的 RWC 也处于较高水平,但后期降幅较大,抗旱能力次之;金叶女贞、红叶石楠的 RWC 从中期开始变化显著,28 d 时较对照分别降低了 63.46% 和 63.02%,它们的叶片持水能力和抗旱能力相对较弱。

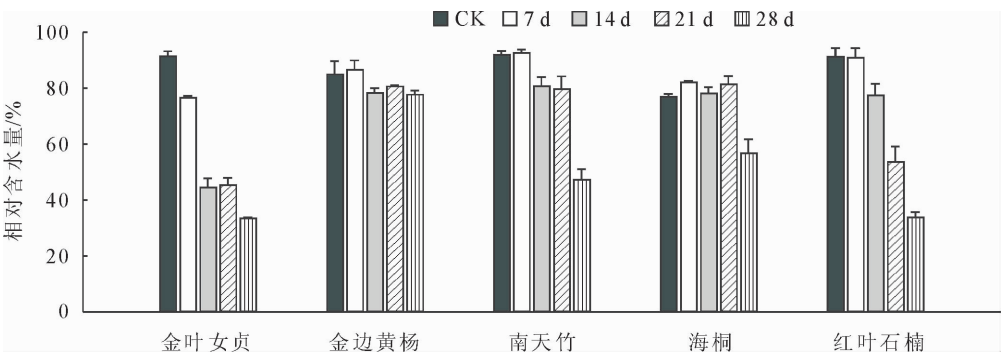


图 2 干旱胁迫下叶片相对含水量的变化  
Fig. 2 Changes on relative water content of the leaves under drought stress

对不同植物在不同干旱胁迫下的叶片相对含水量进行方差分析,结果表明植物主效应 ( $F = 49.64$ )、时间主效应 ( $F = 143.67$ ) 和植物与时间交互效应 ( $F = 16.31$ ) 均达到了极显著水平 ( $P < 0.01$ )。采用 LSD 法对植物主效应做多重对比可以

得出,金边黄杨的叶片含水量最高,金叶女贞的叶片含水量最低。由于自然条件的不确定性,时间主效应呈先下降后上升再下降的变化趋势。

2.4 干旱胁迫对叶片质膜透性的影响

植物膜系统被认为对逆境伤害最为敏感。在不

利条件下,细胞中氧自由基的含量增加,发生膜过氧化作用,从而损害膜系统<sup>[11]</sup>。抗旱力较差的植物其细胞外渗液 EC 值就越大,抗旱能力强的植物在干旱胁迫超出一定限度后,外渗液的 EC 值才发生相对明显的变化。由图 3 可知,干旱时间的持续,金叶女贞叶片的 EC 值逐渐上升,干旱中期起保持较快增长,14~28 d 时 EC 值相比对照增加了 89.68%~180.09%,可见其细胞膜透性受害较重,抗旱性较弱;金边黄杨和海桐叶片的 EC 值整体呈先降后升的趋势,整个干旱期间增幅较小,质膜稳定性较高,说明它们的抗旱能力较强;南天竹和红叶石楠前期的 EC 值有所增长,且南天竹的 EC 值增长较快,增

加了 182.32%,可能是其对缺水环境敏感、质膜的稳定性降低<sup>[12]</sup>,之后 EC 值出现不同程度的下降,说明植物通过自身调节逐渐适应干旱条件,此后电导率又升高,植物的细胞膜稳定性因旱害程度的加深而逐渐丧失。

对不同植物在不同时间胁迫下相对电导率进行方差分析,植物主效应( $F=312.32$ )、时间主效应( $F=50.34$ )及植物与时间交互效应( $F=27.44$ )均达到极显著水平( $P<0.01$ ),采用 LSD 法对植物主效应做多重对比可以得出,南天竹的叶片相对电导率最大,海桐的叶片相对电导率最小。5 种常绿灌木叶片相对电导率时间主因素的变化呈上升趋势。

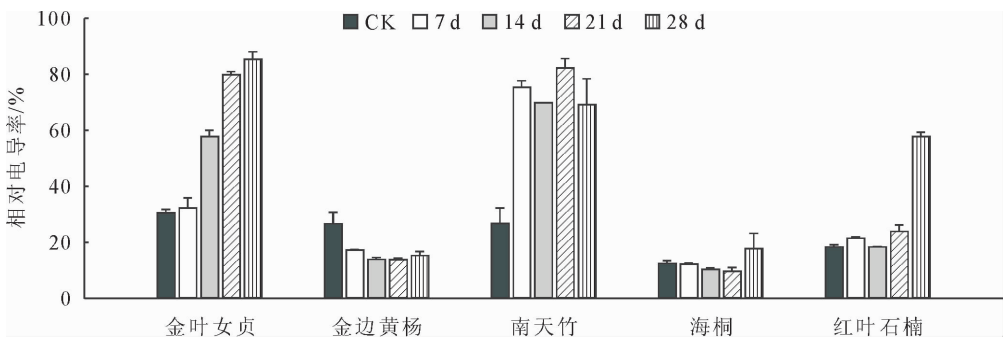


图 3 干旱胁迫下植物相对电导率的变化

Fig. 3 Changes of relative conductivity of the plants under drought stress

2.5 干旱胁迫对叶片叶绿素含量的影响

叶绿素含量反映植物的光合速率以及受环境因子影响的程度。通常,植物在极端缺水环境下生长会使叶绿素迅速分解,含量也会相应降低<sup>[13]</sup>。由图 4 可知,连续缺水后,5 种植物叶绿素总量的变化有所差异,但总体上都呈下降趋势。南天竹和海桐在胁迫 7 d 时,叶绿素含量上升,说明在轻度干旱时影响较小,在整个胁迫期间叶绿素含量变幅平稳。金边黄杨在整个胁迫期间,叶绿素含量变化较小,表明

在缺水下生长受干旱影响小,表现出较强抗性。金叶女贞在干旱前 21 d,叶绿素含量变化不大,说明可以忍受一定时间的缺水,28 d 时叶绿素含量大幅上升,植物体内水分蒸发的速度快于叶绿素降解速度,产生“浓缩”现象,但是由于植物的不同,叶绿素“浓缩”现象出现的时间稍有不同。红叶石楠在干旱 7 d 时,叶绿素含量急剧下降,导致植物光合作用能力下降,表明植物受到严重的干旱伤害,在干旱 21 d 时出现叶绿素“浓缩”现象。

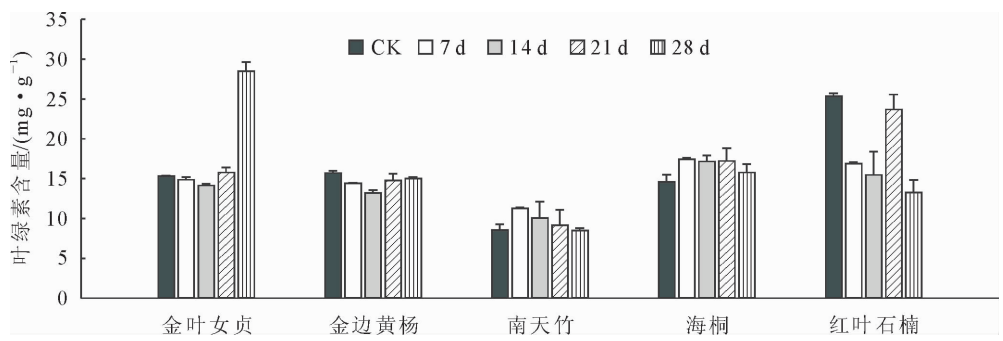


图 4 干旱胁迫下叶绿素含量的变化

Fig. 4 Changes of chlorophyll content of the plants under drought stress

对不同植物在不同时间胁迫下叶绿素含量进行方差分析,植物主效应( $F=152.34$ )、时间主效应( $F=6.60$ )及植物与时间交互效应( $F=30.23$ )均达

到极显著水平( $P<0.01$ ),采用 LSD 法对植物主效应做多重对比可以得出,红叶石楠的叶绿素含量最大,南天竹的叶绿素含量最小。5 种常绿灌木叶绿

素含量时间主因素的变化呈先下降再上升的趋势。

2.6 干旱胁迫对叶片丙二醛含量的影响

丙二醛是植物在不利因素中受损害时膜脂过氧化作用的最终产物,因此膜系统的损伤状态及植物对干旱条件的抵御强弱可根据 MDA 积累程度来确定。MDA 水平与植物的抗旱性是负相关,即 MDA 增加愈多,细胞膜被破坏的愈严重。由图 5 可知,不同处理时间下植物 MDA 的变化有所差异,随着干旱时间的持续植物体内的动态平衡被破坏。其中金叶女贞和南天竹的 MDA 呈不断上升趋势,南天竹的 MDA 在干旱后期快速上升,至试验结束后比对照升高 120.65%,说明其细胞质膜受伤害程度较为严重,金叶女贞在干旱胁迫期间 MDA 基本没变化,受干旱胁迫影响较小。金边黄杨和海桐的 MDA 值

呈先降再升趋势,可能由于短期内缺水,植物为维持体内平衡做出抵御作用。红叶石楠在胁迫 7 d 时,叶片积累了大量的 MDA,但是之后又迅速下降为之前的平均水平,说明其干旱初期没有较好应对干旱环境,致使叶片膜系统受损,随着时间的推移不断自身调节又达到了平衡的状态。

对不同植物在不同时间胁迫下丙二醛含量进行方差分析,植物主效应( $F=367.72$ )、时间主效应( $F=14.32$ )及植物与时间交互效应( $F=37.27$ )均达到极显著水平( $P<0.01$ ),采用 LSD 法对植物主效应做多重对比可以得出,南天竹的丙二醛含量最大,金叶女贞的丙二醛含量最小。5 种常绿灌木丙二醛含量时间主因素的变化呈先下降再上升后下降的趋势。

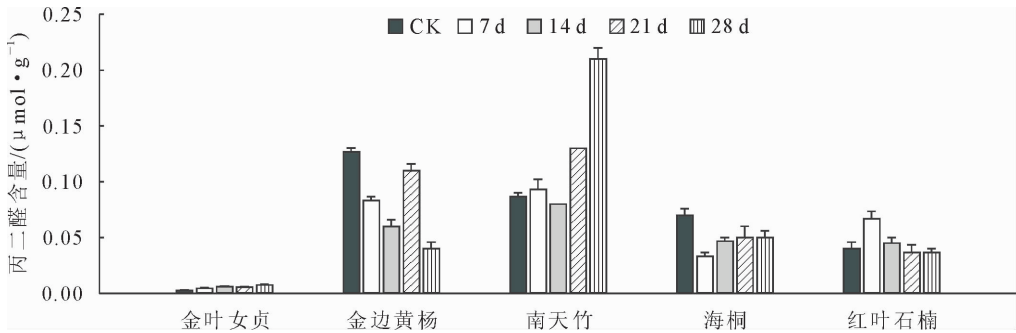


图 5 干旱胁迫下丙二醛含量的变化

Fig. 5 Changes of malondialdehyde content of the plants under drought stress

2.7 干旱胁迫对叶片脯氨酸含量的影响

脯氨酸是植物抗逆性重要有效的渗透调节物质,与植物的抗旱能力呈正相关,一般来说抗旱性强的植物在缺水时脯氨酸含量的增加幅度大于抗旱性弱的植物,因而测定脯氨酸含量一定程度上可了解植物遭受干旱胁迫的程度以及抵抗能力<sup>[14]</sup>。由图 6 可知,5 种植物的脯氨酸的含量总体均呈上升趋势,脯氨酸大量积累以防止植物水分大量散失。南天竹、金边黄杨、金叶女贞和红叶石楠在干旱胁迫期间 Pro 值不断上升,至试验结束 28 d 时,叶片的 Pro 值分别为对照的 3.29、6.96、26.97 倍和 27.48 倍,说明这 4 种植物在干旱胁迫下具有较高的渗透调节机制,抗旱能力相对较强。南天竹叶片内的 Pro 值明显高于其他植物,可能是由于本身体内存在色素,对试验造成一定影响。红叶石楠最大 Pro 值出现迟且含量相对高,说明抗旱能力相对较强,金叶女贞的 Pro 上升比较平缓,受干旱胁迫的影响较小,植物体内受伤害的程度较轻。海桐的 Pro 值先降再升,表明其在缺失时细胞内自我调节是一个动态的过程。水分轻度胁迫基本对植物没有影响,甚至促进生长,

所以 Pro 值降低;随着失水严重,植物受到影响,Pro 值上升,以调节植物体内的平衡

对不同植物在不同时间胁迫下脯氨酸含量进行方差分析,植物主效应( $F=660.95$ )、时间主效应( $F=307.42$ )及植物与时间交互效应( $F=73.897$ )均达到极显著水平( $P<0.01$ ),采用 LSD 法对植物主效应做多重对比可以得出,南天竹的脯氨酸含量最大,金叶女贞的脯氨酸含量最小。5 种常绿灌木脯氨酸含量时间主因素的变化呈先下降再上升后下降的趋势。

2.8 综合评价分析

通过隶属函数综合评价分析见表 2,5 种常绿灌木抗旱性由强到弱排序为:金边黄杨>海桐>红叶石楠>金叶女贞>南天竹。其中金边黄杨、海桐、红叶石楠的抗旱隶属值均>0.5,属于抗旱能力较强植物,金边黄杨抗旱性最强。金叶女贞、南天竹的抗旱隶属值<0.5,与抗旱能力较强植物的隶属值差距较大,属于抗旱能力较弱植物。可以看出用模糊数学中隶属函数分析法,对植物的多个指标进行综合分析,能够对不同植物抗旱性进行较客观的评价。

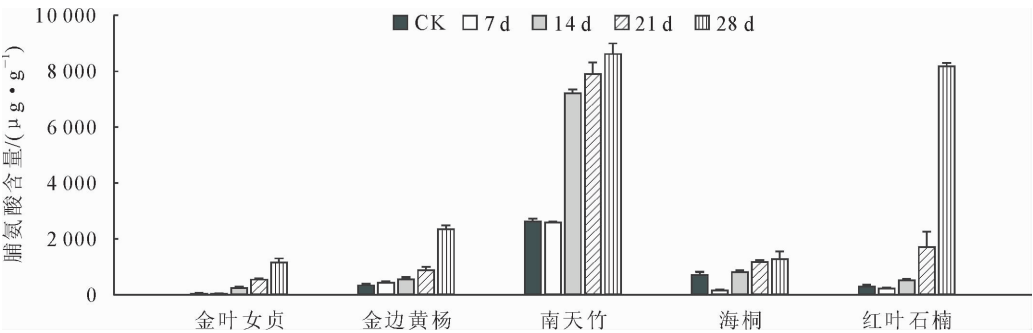


图 6 干旱胁迫下脯氨酸含量的变化

Fig. 6 Changes of Proline content of plants under drought stress

表 2 抗旱能力综合评价结果

Table 2 Comprehensive appraisal of drought stress on roof greening plants

植物种类	RWC	EC	叶绿素含量	MAD	Pro	总值	均值	排序
金叶女贞	0.000 0	0.000 0	0.998 6	1.000 0	0.000 0	1.998 6	0.399 7	4
金边黄杨	1.000 0	1.000 0	0.895 3	0.839 5	0.159 4	3.894 2	0.778 8	1
南天竹	0.310 6	0.231 6	0.000 0	0.000 0	1.000 0	1.542 3	0.308 5	5
海桐	0.525 0	0.964 3	1.000 0	0.790 1	0.017 8	3.297 3	0.659 5	2
红叶石楠	0.007 7	0.394 9	0.654 3	0.855 8	0.941 0	2.853 7	0.570 7	3

3 结论与讨论

3.1 结论

对西安市屋顶绿化常绿灌木进行试验选择研究,植物抵御干旱是从植物的形态、结构到各生理指标的综合变化过程<sup>[15]</sup>,试验测定了干旱胁迫下土壤相对含水量及各植物的形态、生理生化变化,运用隶属函数综合评价法得出 5 种常绿灌木的抗旱性由强到弱排序为:金边黄杨>海桐>红叶石楠>金叶女贞>南天竹。金边黄杨、海桐的各项生理指标变化幅度相对较小,在抗旱方面存在明显优势,红叶石楠的抗性次之,金叶女贞、南天竹相对较弱,应用于屋顶绿化中夏季干旱时及时补充水分。总之,这 5 种常绿灌木在西安市屋顶绿化中具有一定应用潜力,基本能适应西安的气候条件和屋顶干旱环境。

3.2 讨论

3.2.1 试验地的环境 本研究试验地由于条件限制,在陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学南校区进行,杨陵距西安市 80 km,近 5 a 来,年平均气温比西安市气温低 1.3℃,年降水量比西安市稍低,年日照时数、平均风速等与西安市基本一致。试验在开展之前对西北农林科技大学文科楼(楼高约 24 m)地下与屋顶 2018 年 5 月至 2019 年 1 月的气象环境因子进行了测定与比较,得出:5—9 月屋顶的月平均最高温度比地面高,8 月比地面高出 3.6℃,其他月份相差 0.6℃~2.9℃;10 月至次年 1 月屋顶气温<地面气温,1 月份比地面低 3.9℃,月

平均最低气温差别不大;屋顶相对湿度比地面低 2.30%~8.74%;屋顶风速比地面高出 0.1~0.42 m·s<sup>-1</sup>。根据差异设计试验环节,使得结果具有一定的可靠性、可信度。试验在露天雨棚中进行,通风透光,一方面避免屋顶风雨双重作用影响干旱胁迫试验数据的准确性,另一方面能够真正掌握植物本身对于干旱环境的抵御能力。

3.2.2 植物外部形态变化与抗旱性 依据 5 种植物的外部形态特征设置 5 个等级进行观察记录,得出了 5 种常绿灌木抗旱性的基本情况,与其最终得出的综合评价结果基本一致,说明植物外部形态的变化可以直观的反映参试植物的抗旱能力。

3.2.3 植物的生理指标与抗旱性 植物的抗旱性是植物在受到胁迫时体内作出的一种综合性表现,难以利用单一指标判断植物的综合抗干旱适应能力,目前多采用隶属函数综合评价法来消除单个指标带来的局限性<sup>[16]</sup>。不同植物的抗旱性都有其主导的几个因子,研究表明,除丙二醛含量外对其他 4 项生理指标的变化对红叶石楠抗旱性影响较大;相对含水量、相对电导率和叶绿素含量的变化对金叶女贞抗旱性影响较大;相对电导率、丙二醛和脯氨酸含量的变化对南天竹抗旱性影响较大;金边黄杨、海桐抗旱性对丙二醛含量变化较为敏感。

大量试验证明叶片相对含水量是研究植物抗旱性的重要指标,试验测得各植物叶片相对含水量随着胁迫时间的增加逐渐降低,其中金边黄杨在胁迫过程中基本保持 70%以上的相对含水量,表现出较

强的抗旱性。叶片相对电导率经常用来衡量植物在干旱条件下的生理指标,方便简单且结果准确,试验中金叶女贞、南天竹的相对电导率较高,细胞膜受到严重伤害;干旱条件下会导致已合成的叶绿素快速分解,含量也就相应降低,即金叶女贞的叶绿素含量出现“浓缩”现象;MDA 是脂质过氧化的最终产物,本试验由于植物的不同,MDA 含量变化不尽相同,其中金叶女贞的 MDA 含量最少,说明其抗旱性较强,南天竹含量最多,抗旱性最弱;从理论上讲,脯氨酸是反映植物抗旱性强弱的渗透调节物质之一,但曾鸣等<sup>[17]</sup>提出在评价脯氨酸积累与抗旱性的关系时,应以相对变化值进行比较为宜。

3.2.4 参试植物与屋顶绿化 目前实施的屋顶绿化多以建筑荷载小、施工管理简便的简单式屋顶绿化为主,生态效益相对薄弱,研究发现采用乔灌草复合结构的屋顶绿化所发挥的生态效益是简单式屋顶绿化的 2.6 倍<sup>[18]</sup>。经过整个试验研究,证实了 5 种常绿灌木在西安市屋顶绿化中的可行性。通过筛选适合屋顶绿化的常绿木本植物,配合已研究的草本地被植物,乔灌草藤合理搭配,将会取得更好的生态效益和经济效益。由于这 5 种灌木都是较佳的常绿观叶植物,可为后期屋顶绿化植物配置方面的景观设计提供参考,以丰富季相景观减少秋冬季萧条之感,希望这次研究的结果能为西安市屋顶绿化建设提供理论依据,从而加快西安市及周边地区屋顶绿化建设的步伐。

参考文献:

[1] 许萍,车伍,李俊奇.屋顶绿化改善城市环境效果分析[J]. 环境保护,2004(7):41-44.  
XU P,CHE W,LI J Q,Analysis on improvement of urban environment made by green roof[J]. Nature Ecological Conservation,2004(7):41-44. (in Chinese)

[2] 王雅楠.屋顶绿化技术分析及节水型应用模式设计[D]. 北京:中国林业科学研究院,2012.

[3] 陈芳洲.西安市区主要公园冬季植物景观调查与评价[D]. 北京:北京林业大学,2015.

[4] 曾红,温庚金,罗旭荣,等.4 种轻型屋顶绿化植物抗旱能力的综合评价[J]. 草业科学,2016,33(6):1084-1093.  
ZENG H,WEN G J,LUO X R,*et al.* Comprehensive evaluation of four light green roof plants on drought resistance[J]. Pratacultural Science,2016,33(6):1084-1093. (in Chinese)

[5] 张志良.植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,1990.

[6] 中国科学院上海植物生理研究所,上海植物生理学会.现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1999.

[7] 刘萍,李明军.植物生理学实验技术[M]. 北京:科学出版社,2007.

[8] 王学奎,黄建良.植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2015.

[9] 郑涛,樊军锋,高建社,等.11 个白杨派无性系抗旱性综合评价[J]. 西北林学院学报,2019,34(4):101-106.  
ZHENG T,FAN J F,GAO J S,*et al.* On the comprehensive evaluation of drought resistance of 11 poplar clones[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(4):101-106. (in Chinese)

[10] 杜旻昱.南昌主城区屋顶绿化植物景观评价与适应性研究[D]. 南昌:江西农业大学,2017.

[11] 蔡庆生.植物生理学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.

[12] 徐静平.屋顶绿化木本植物的抗逆性研究[D]. 保定:河北农业大学,2011.

[13] 黄颜梅,张健,罗承德.树木抗旱性研究(综述)[J]. 四川农业大学学报,1997,15(1):51.  
HUANG Y M,ZHANG J,LUO C D. Literature review on tress's drought resistance capacities[J]. Journal of Sichuan Agricultural University,1997,15(1):51. (in Chinese)

[14] 王三根.植物生理生化[M]. 北京:中国林业出版社,2013.

[15] 徐振华,刘俊,徐静平,等.屋顶绿化木本植物的抗旱性研究[J]. 中国农学通报,2012,28(1):311-316.  
XU Z H,LIU J,XU J P,*et al.* The study on drought resistance of roof greening woody plants[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2012,28(1):311-316. (in Chinese)

[16] 董晓晓,刘雪,蒋亚蓉,等.干旱胁迫对 24 种宿根花卉生长的影响[J]. 西北林学院学报,2019,34(3):125-131.  
DONG X X,LIU X,JIANG Y R,*et al.* Effect of drought stress on the growth of twenty four perennials[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(3):125-131. (in Chinese)

[17] 曾鸣,蔡霖生.柏木抗旱性与脯氨酸变化的关系[J]. 四川农业大学学报,1990,8(3):183-187.  
ZENG M,CAI L S. The relationship between drought resistance and the accumulation of free proline in cypress seedlings[J]. Journal of Sichuan Agricultural University,1990,8(3):183-187. (in Chinese)

[18] 韩丽莉,单进,李连龙.国内外种植屋面发展现状与前景展望[J]. 中国建筑防水,2009(2):1-5.  
HAN L L,SHAN J,LI L L. Current status and prospects of planted roof at home and abroad[J]. China Building Waterproofing,2009(2):1-5. (in Chinese)