

冬季垂直栽培条件下三种常绿灌木生长和生理特性研究*

杨佳颖^{1,2}, 王志高², 朱锦茹², 袁位高², 吴初平², 江波²

(1. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州市, 310000; 2. 浙江省林业科学研究院, 杭州市, 310000)

摘要:加强冬季垂直绿化植物筛选和应用研究有助于提高我国南方冬季园林绿化水平。以滨柃(*Eurya emarginata*)、含笑花(*Michelia figo*)和红花檵木(*Loropetalum chinense var. rubrum*)3种常绿灌木为研究对象,采用生态基质和轻基质进行垂直栽培,通过对控水和复水处理中株高增长量、总生物量、根冠比、叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和可溶性蛋白(SP)含量等抗旱性能指标的测定与分析,筛选最佳栽培基质和水分管理措施。结果表明,三种植物抗旱性综合评价由大至小依次为滨柃、红花檵木和含笑花,且采用轻基质栽培滨柃和红花檵木,以及采用生态基质栽培含笑花有利于提高杭州冬季常规温度下的栽培效果,其生物量和根冠比分别提高 1.6%~36.8%和 20.2%~41.1%,灌溉周期可以达到 20 天左右。

关键词:垂直绿化;栽培基质;木本植物;抗旱性能

中图分类号:S688.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2021)12-0072-09

杨佳颖, 王志高, 朱锦茹, 袁位高, 吴初平, 江波. 冬季垂直栽培条件下三种常绿灌木生长和生理特性研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 72-79, 86

Yang Jiaying, Wang Zhigao, Zhu Jinru, Yuan Weigao, Wu Chuping, Jiang Bo. Growth and physiological characters of three evergreen shrubs under vertical cultivation conditions in winter [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 72-79, 86

0 引言

园林是农业中一个重要组成部分,同时二者也是相辅相成。城市园林绿化状况已经成为衡量城市生态环境质量和现代化进程的重要标志^[1],充分利用城市垂直空间、发展垂直绿化是解决城市建设用地与园林绿化用地之间矛盾、增加城市绿化面积的有效途径。我国在城市园林绿化发展初期,因受垂直栽培技术限制,园林垂直绿化中植物选择主要以藤本和草本植物为主^[2-4]。选种育苗是农业产生效益最有效、最直接的一项措施,同样在园林绿化中随模块化种植技术的进步,选择绿量大、生态效益高,且花、果和叶景观均较好的木质非藤本植物已成为园林垂直绿化苗木应用的一个新的发展方向。可促使传统农业经济作物增加新方向,实现农林紧密结合。

目前垂直绿化方面的研究主要集中在夏季,冬季较少,但部分垂直绿化在冬季出现明显落叶现象,应用效果有限^[5]。对我国南方地区冬季温和少雨,比较适宜垂直绿化的应用^[6]。冬季垂直绿化在实现建筑物防

寒保暖、降低采暖能耗、提高生态和景观效益具有重要意义^[7]。灌溉技术是限制农林业发展的重要因素^[8]。尽管植物在冬季水分蒸发少,需水量相应较小,但水分缺乏仍然会影响到树木的抗寒能力和来年的生长发育,因此冬季的水分管理在垂直绿化中仍然非常重要。植物的根冠比等生长指标以及叶片叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和可溶性蛋白(SP)含量可作为植物抗旱性能的评价指标^[9-10]。叶绿素是植物进行光合作用的关键物质,叶绿素含量的高低影响植物光合速率^[11],干旱胁迫下叶绿素含量越高即表明植株在逆境下保持光合作用的能力越强。当植物受到干旱胁迫时会产生活性氧以及自由基打破细胞正常代谢,SOD和POD活性的积累会产生相应协同作用,可保护植物体内细胞不受活性氧和自由基的攻击^[12-13]。植物体内积累的SP含量越高,越有利于抵抗受干旱胁迫造成水分亏缺对植物生命活动的威胁。研究表明,栽培基质对提高垂直绿化植物耐旱性具有重要的影响^[14-17],不同基质的特性不同,将不同特性的基质与不同的植物进行组合,对比选

收稿日期:2021年11月9日 修回日期:2021年12月6日

* 基金项目:浙江省省属科研院所扶持专项(2020F1065-7)

第一作者:杨佳颖,女,1997年生,湖南永州人,硕士研究生;研究方向为生态修复。E-mail: 932501666@qq.com

通讯作者:江波,男,1963年生,浙江浦江人,博士,研究员;研究方向为森林生态学。E-mail: jiangbof@126.com

出最优组合,便于更好的进行栽培种植。

滨桧、含笑花和红花檵木均具有一定抗旱能力,其中滨桧在浙江沿海山坡和海岸边岩石缝中分布较多,有抗风、耐旱等特点;含笑花花期有淡淡的清香,不仅在感官上有良好的体验,同时还具有一定的药用价值;红花檵木则为常用的园林绿化树种,叶和花均具有较高的观赏价值。本文在杭州冬季常规温度下,研究了上述三种常绿灌木在两种栽培基质中的抗旱能力,以期筛选出种植效果好、经济成本低的栽培模式。

1 材料与方法

1.1 试验材料

滨桧、含笑花和红花檵木均选用生长稳定、无病虫害、长势基本一致的 2 年生实生幼苗作为供试材料。其中滨桧幼苗平均苗高 38.7 ± 3 cm(称 P1);含笑花和红花檵木幼苗平均苗高分别为 56.3 ± 5 cm、 38.3 ± 5 cm,分别称 P2、P3。

生态基质为“轻型保水仿生土壤”(称 S1),主要成分为改性建筑废弃物和椰糠,容重为 0.51 g/cm³、pH 值为 6.5、通气孔隙度为 28.5%;轻基质为“金色 3 号”(称 S2),主要成分为蛭石、泥炭、珍珠岩等,容重为 0.28 g/cm³、pH 值为 6.3、通气孔隙度为 15.2%。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验于 2020 年 12 月—2021 年 2 月在大棚内模拟垂直环境下进行。试验开始前,对滨桧、含笑花和红花檵木 3 种植物分别采用生态基质和轻基质进行盆栽,缓苗一个月后进行试验。

每种基质设置控水和复水 2 个处理,每个基质处理设置 20 盆植株,试验开始时浇透水。控水处理组后期停止浇水进行自然干旱处理;根据前期预试验的结果,复水处理组在控水 20 d 时进行复水,使土壤完全浇透。分别于试验开始 0 d(控水当天,CK)、40 d(复水后 20 d)进行不同处理组的各项生长指标测定,其中生长量在控水试验结束当天进行采样测定;分别于 0 d、10 d、20 d(复水 0 d)、30 d(复水后 10 d)和 40 d(复水后 20 d)随机摘取每处理的叶片进行各项生理生化指标测定。

1.2.2 测定项目及方法

基质含水率测定:生态基质和轻基质的含水率采用烘干法测定。于试验前后分别使用铝盒装取土样,放入烘箱中 105 °C 烘干 12 h 至恒重,获得 2 种基质控水第 0 d 和第 40 d 的基质相对含水率。

植物生长指标测定:每隔 10 d 对植物进行测定(不采样),每次 3 个重复。观察记录参试植株株高、地径、冠幅。在胁迫处理 40 d 后,每个水分处理选 3 株,

全株挖起,清洗干净、吸干水分,并将根、茎、叶分开,放入恒温箱中 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘至恒重并分别称重,计算根冠比。SOD 活性采用黄嘌呤氧化酶法进行测定,POD 活性采用愈创木酚法进行测定,SP 含量采用考马斯亮蓝染色法进行测定,SPAD 含量采用丙酮浸提法提取。

1.2.3 抗旱性综合评价

采用模糊函数的隶属函数法对 3 种植物进行抗旱性综合评价^[18]。

当抗旱指标与抗性呈正相关时

$$X_u = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

当抗旱指标与抗性呈负相关时

$$X_u = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: X_u ——抗旱指标隶属函数值;

X ——抗旱指标的测量值;

X_{\max} ——抗旱指标测量值的最大值;

X_{\min} ——抗旱指标测量值的最小值。

将不同测定指标进行隶属函数值计算,再取平均值,最后均值越大表示抗旱性越强。采用不同基质盆栽植物抗旱性指标隶属函数值的平均数进一步评价 3 种植物在不同基质下的抗旱性。

1.3 统计分析

采用配对 t 检验法比较控水组和复水组的指标差异,数据分析在 Excel 2019 和 SPSS 21.0 中进行分析。

2 结果与分析

2.1 生态基质和轻基质的储水能力及试验树种的耗水率比较

不同树种在不同基质下控水前后的基质含水率如表 1 所示。

表 1 不同树种在不同基质下控水前后的基质含水率
Tab. 1 Water content of different tree species under different substrates before and after water control

栽培模式	基质含水率/%	
	干旱胁迫 0 d	干旱胁迫 40 d
P1S1	56.72a	53.01b
P1S2	82.69a	77.62b
P2S1	55.20a	50.21b
P2S2	76.42a	69.35b
P3S1	53.02a	48.18b
P3S2	81.42a	70.19b

注:同行数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。栽培模式指植株+基质的形式,如 P1S1 指滨桧+生态基质,P1S2 指滨桧+轻基质,下同。

从表 1 可看出,栽培 3 种植物的轻基质初始含水率

均高于生态基质,且经过冬季 40 d 的干旱胁迫后仍高于生态基质($P < 0.05$),说明轻基质的储水能力优于生态基质。其中,栽培滨铃的生态基质和轻基质的含水率分别较初始值下降 3.71%和 5.07%,栽培含笑花和红花檵木的生态基质和轻基质的含水率分别较初始值下降 5.00%和 7.07%、4.83%和 11.23%。总体来看,滨铃的耗水率最低,含笑花次之,红花檵木的耗水率最高。

2.2 水分管理和栽培基质对植物生长指标的影响

从表 2 可以看出,控水和复水对两种栽培模式下三种植物的株高增长量、总生物量和根冠比影响较大,与栽培基质有密切关系。从株高增长量可看出,滨铃控水处理在生态基质中更高,在轻基质中复水组更优;含笑

花在生态基质复水组中生长最好,受胁迫的影响最低;红花檵木在两种栽培模式下均为复水组最优。除 P1S2 和 P2S1 模式中的生物量外,复水组总生物量要高于控水组;生态基质中的总生物量均值除含笑花外均高于轻基质组,复水处理一定情况下会使总生物量增加。与复水处理相比,控水处理显著提高了 P1S1 模式根冠比,但降低了 P3S1 模式的根冠比($P < 0.05$)。生态基质中滨铃的根冠比均显著高于轻基质($P < 0.05$),与水分管理无关;控水处理中,红花檵木在轻基质中的具有更大的根冠比($P < 0.05$)。从植物生长指标来看,滨铃在生态基质中栽培具有更好抗旱性能,而红花檵木更适于在轻基质栽培,含笑花在两种基质中的差异不明显。

表 2 不同水分管理和栽培模式中植物的生长指标比较

Tab. 2 Comparison of growth indices under different water management and cultivation mode

栽培模式	水分管理	株高增长量/cm	总生物量/g	根冠比/%
P1S1	控水	1.81±1.70cde	30.05±8.90abc	0.64±0.33a
	复水	0.55±0.46e	44.45±11.89abc	0.57±0.02ab
P1S2	控水	1.72±2.05de	36.84±19.34abc	0.27±0.08abc
	复水	2.48±1.63bcde	32.50±13.73abc	0.40±0.18abc
P2S1	控水	3.18±2.69bcd	42.45±1.87abc	0.34±0.03abc
	复水	2.91±0.74bcd	65.87±38.38a	0.40±0.07abc
P2S2	控水	1.31±1.42de	61.94±26.08ab	0.33±0.02abc
	复水	1.61±1.69de	66.91±15.32a	0.30±0.09abc
P3S1	控水	2.38±1.45bcde	11.11±1.52bc	0.11±0.02c
	复水	5.19±0.87a	11.87±4.80bc	0.19±0.16bc
P3S2	控水	3.85±1.25abc	9.10±1.25c	0.17±0.12bc
	复水	4.35±1.54ab	10.51±6.20c	0.15±0.03bc

注:株高增长量、总生物量、根冠比同列不同的字母表示有差异水平($P < 0.05$)。

2.3 不同水分管理和栽培模式中生理生化指标的比较

2.3.1 对叶绿素含量的影响

三种植物叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素的含量在不同水分管理和栽培模式中存在差异,干旱胁迫会导致植物叶片的叶绿素含量持续降低,而复水可提高其叶绿素含量,且复水后叶绿素含量的下降速率降低(图 1),表明适当的水分管理有利于提高冬季植物叶绿素含量。不同栽培模式中,滨铃在生态基质中经复水后叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量下降的速率低于轻基质($P < 0.05$);含笑花在生态基质中经复水后的叶绿素含量升高,而在轻基质中呈现下降的趋势;红花檵木叶绿素含量在生态基质经复水后仍呈下降趋势,在轻基质中则表现出先升高后下降的特征。从复水后叶绿素含量变化来看,滨铃和含笑花对生态基质较为适应,而红花檵木较为适宜在轻基质中栽培。

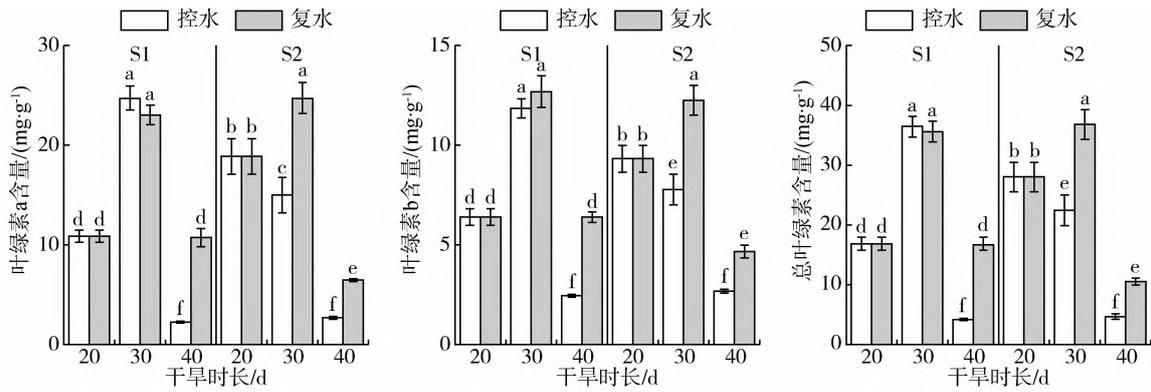
2.3.2 对 SOD 活性的影响

从图 2 可看出,复水有助于提高叶片 SOD 酶活性,或减缓了后续 SOD 酶活性降低的速率,表明适当

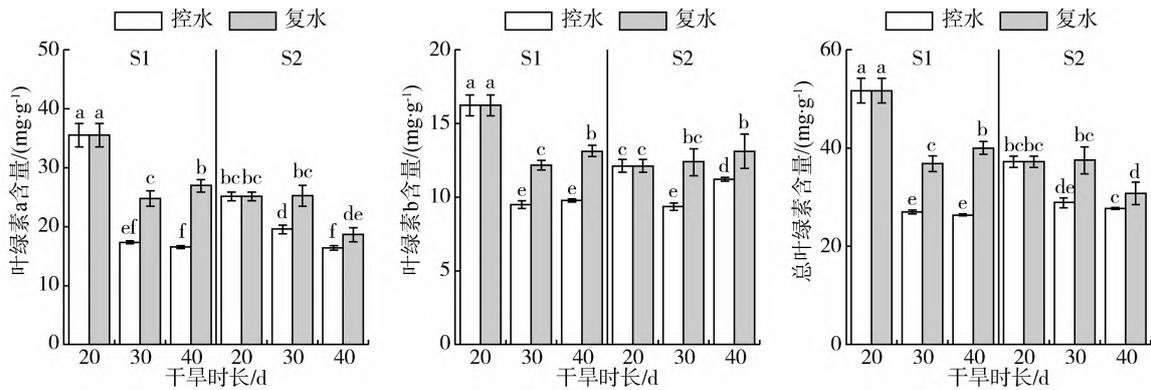
水分管理措施有助于降低干旱胁迫对植物伤害。不同栽培模式中,滨铃在生态基质中经干旱胁迫后叶片 SOD 酶活性显著高于轻基质,但复水后的下降速率较快;而含笑花在轻基质中的 SOD 酶活性无论是干旱胁迫还是复水都表现出升高的趋势;红花檵木在两种基质中 SOD 酶活性变化趋势差异不显著($P > 0.05$)。因此,在轻基质中栽培滨铃和含笑花有助于减轻干旱胁迫对植物的伤害,而红花檵木在两种基质中差异不明显。

2.3.3 对 POD 活性的影响

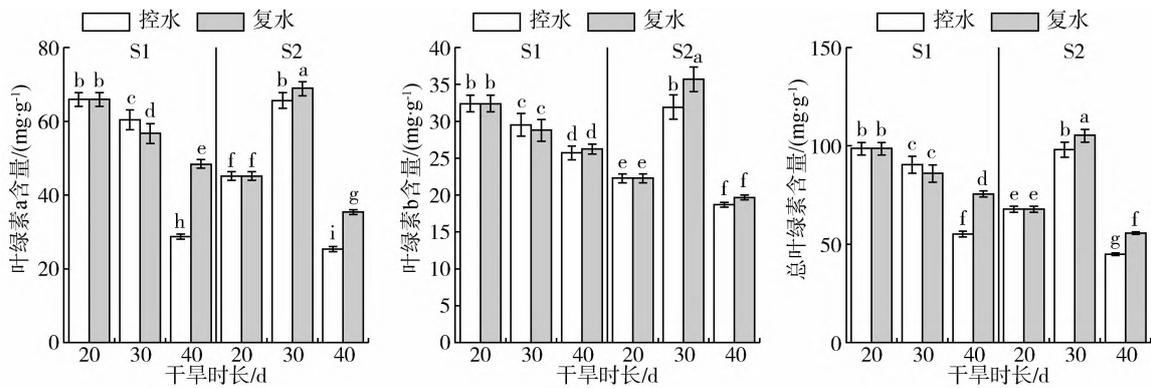
从图 3 可看出,水分管理措施对三种植物叶片 POD 活性的影响较为明显,复水措施有助于提高 POD 酶活性,进而减缓干旱对植物的伤害。不同栽培模式中,滨铃叶片 POD 活性在生态基质和轻基质中变化趋势相似,但复水后轻基质 POD 活性增高幅度较大,而含笑花和红花檵木在轻基质中经复水后的 POD 活性提高显著($P < 0.05$)。从 POD 活性的角度看,三种植物在轻基质中栽培的效果相对较好。



(a) 滨柃干旱胁迫后叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的变化



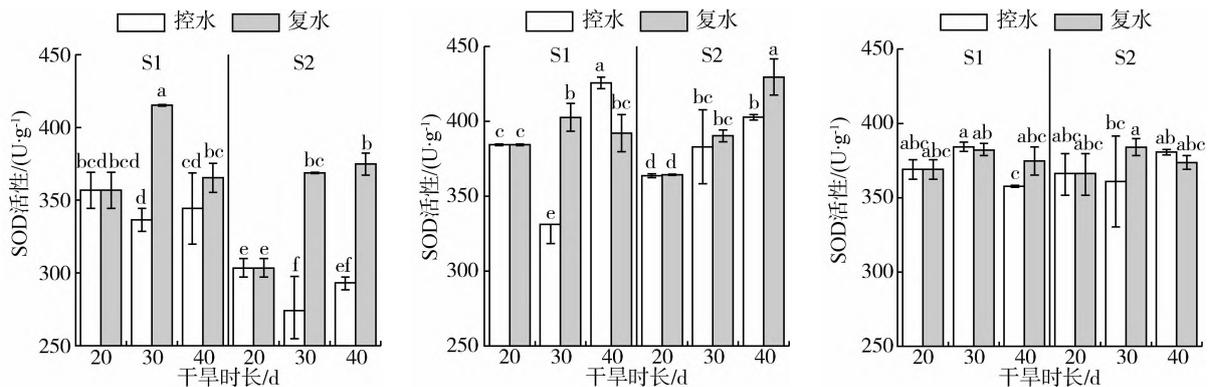
(b) 含笑花干旱胁迫后叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的变化



(c) 红花檵木干旱胁迫后叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的变化

图 1 不同树种在不同基质下控水前后的叶绿素含量比较

Fig. 1 Comparison of chlorophyll content of different tree species before and after water control in different substrates



(a) 滨柃干旱胁迫后 SOD 活性

(b) 含笑花干旱胁迫后 SOD 活性

(c) 红花檵木干旱胁迫后 SOD 活性

图 2 不同树种在不同基质下控水前后的 SOD 活性比较

Fig. 2 Comparison of SOD activities of different tree species before and after water control in different substrates

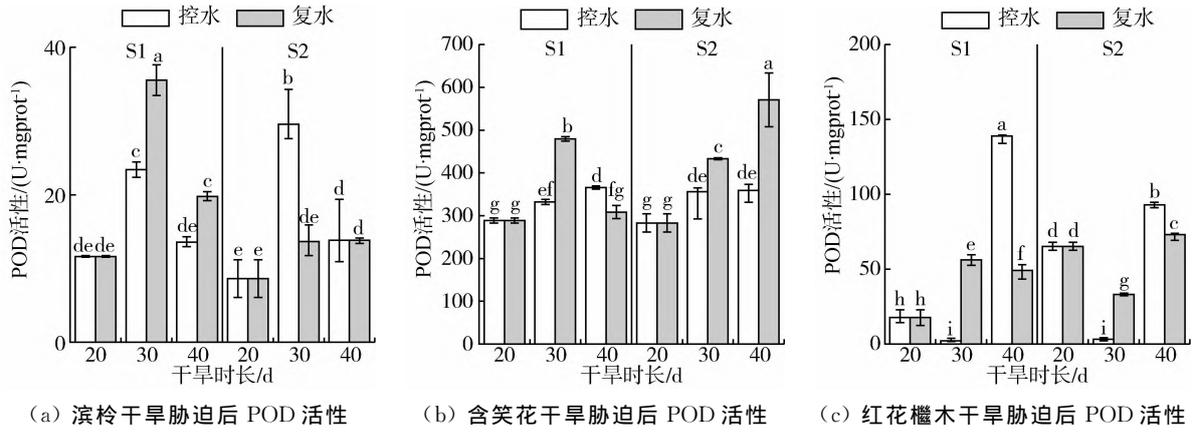


图3 不同树种在不同基质下控水前后的POD活性比较

Fig. 3 Comparison of POD activities of different tree species before and after water control in different substrates

2.3.4 对SP含量的影响

除在生态基质中栽培的红花榿木外,与干旱胁迫相比,复水有助于降低叶片SP含量(图4)。不同的栽培模式中,轻基质中栽培的滨桉经复水后SP含量降幅大于生

态基质。红花榿木在两种基质中经干旱胁迫后SP含量均显著增加($P < 0.05$),复水后生态基质栽培的植株叶片SP含量仍然增加,而轻基质则下降。分析可得三种植物在轻基质中栽培有助于提高干旱胁迫对植株的影响。

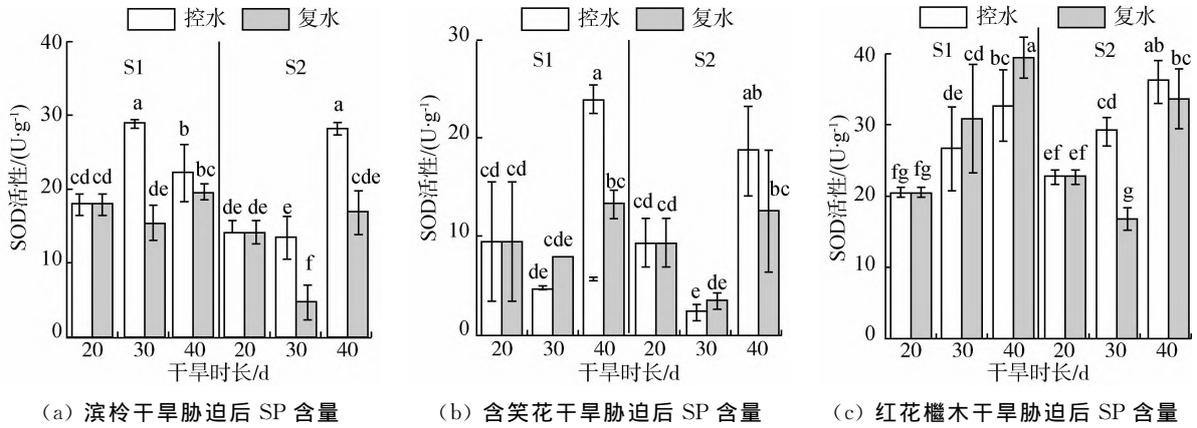


图4 不同树种在不同基质下控水前后的SP含量

Fig. 4 SP content of different tree species before and after water control under different substrates

2.4 不同栽培模式下植物抗旱性能的综合评价

由于植物抗旱性指标较多,仅从单一指标进行抗旱性评价过于片面,采用隶属函数法可套用公式将植

物各类指标进行同一层面的量化。本研究采用植物的生理生化指标从内在对三种植物的抗旱性能进行了评价(表3)。

表3 不同栽培模式中植物抗旱性能综合评价

Tab. 3 Comparison of membership function values of three plants in different culture substrates

指标	P1		P2		P3	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
叶绿素 a	1.000 0	0.984 5	0.462 9	0.470 0	0.000 0	0.125 2
叶绿素 b	1.000 0	0.991 6	0.687 9	0.627 0	0.000 0	0.307 8
总叶绿素	1.000 0	0.987 8	0.568 1	0.543 4	0.000 0	0.210 5
SOD 活性	0.615 9	1.000 0	0.000 0	0.169 8	0.512 5	0.339 9
POD 活性	1.000 0	0.999 2	0.000 0	0.019 8	0.646 5	0.776 3
SP 含量	0.207 2	0.539 8	0.294 2	0.000 0	0.792 3	1.000 0
隶属函数平均值	0.803 9	0.917 2	0.335 5	0.305 0	0.325 2	0.460 0
抗旱性排序	2	1	4	6	5	3

其测定值经过计算后所得隶属函数值进行累加, 取均值再进行排序, 隶属函数均值越大越耐旱, 结果可对 6 种栽培模式进行抗旱性排序, 再将同种植物不同基质下的隶属函数均值分别累加后再取均值可得 3 种植物的抗旱性排序。结果表明, 不同栽培模式下滨铃和红花檵木在轻基质中的抗旱性强于生态基质, 而含笑花在生态基质中抗性较强。3 种树种的抗旱能力从高到低依次为滨铃、红花檵木、含笑花。

3 讨论

干旱胁迫对植物的外观形态、生物量产生重要的影响^[19], 对垂直绿化植物的应用效果影响较大, 也是限制垂直绿化管理成本的关键因素。本研究表明, 滨铃、含笑花和红花檵木 3 种常绿灌木在杭州冬季常规温度下, 通过运用不同的垂直栽培模式和水分管理措施有助于提高其在垂直绿化方面的生态和景观效益、降低维护费用。

采用隶属函数综合评价植物的抗旱性可以客观的评价植物的抗旱性^[18, 20]。隶属函数法评价表明, 滨铃抗旱性最强, 红花檵木次之, 含笑花的抗旱性最弱, 其中, 滨铃和红花檵木在轻基质中的抗旱性强于生态基质, 而含笑花在生态基质中抗性较强。但是从生长和生理指标评价三种植物在两种基质中的抗旱性存在一定差异。

本研究采用的 2 种基质的性质有所差别, 其中生态基质的含水率较低, 但通透性较好, 而轻基质的含水率较高, 但通透性较差。冬季通透性强的基质有利于植物根系的生长。冬季复水处理可以增加植物株高增长量和总生物量, 促进植物恢复正常生长。灌木植物会通过增加根系生物量, 提高根冠比增强对干旱的适应性^[21]。从根冠比大小的角度来看, 滨铃在生态基质中栽培具有更好抗旱性能, 红花檵木更适于在轻基质栽培, 而含笑花在两种基质中的差异不明显。从不同基质中复水后叶绿素含量变化来看, 滨铃和含笑花对生态基质较为适应, 而红花檵木较为适宜在轻基质中栽培。干旱胁迫下^[22]和冬季低温^[23]都会造成叶绿素含量的降低。试验期间平均最高温度 10℃~14℃, 平均最低温度 3℃~7℃, 温度变化幅度较小, 可排除温度差异对叶绿素含量变化趋势的影响, 叶绿素含量的不同变化趋势可能与水分缺乏导致的叶绿素“浓缩”^[24-25]和干旱后复水“补偿效应”使叶绿素浓度升高^[26], 以及植物自身的抗旱性能大小有关。SOD 和 POD 有助于提升植物的抗逆能力^[27]。且随着干旱胁迫的加深, 叶片缺水、光合效率下降产生活性氧和自由基破坏植物体内平衡, 随即产生 SOD 和 POD 保护植

物体, 干旱进一步加深后可能导致酶反应的底物缺乏, 从而导致酶含量会有所下降^[22]。本试验中滨铃控水组在生态基质中 POD 的活性和轻基质中的活性差异不显著, 可能是因为滨铃抗旱能力强体现在干旱中期植物体需水量不高, 对干旱的敏感性不强^[28]。而轻基质复水后 SOD 活性急速增长可能是“补偿效应”致使水分的摄入产生了 SOD 酶反应的底物造成的突增。含笑花和红花檵木的 SOD 和 POD 活性在两种基质中均处于较高的水平, 复水一定程度上可以增加 SOD、POD 的活性, 说明两种植物对于缺水较为敏感, 复水能提高植物抗旱的强度。试验中三种植株 SP 含量均存在一定量的增加, 且 SP 相对含量由大到小分别为红花檵木、滨铃、含笑花, 复水处理后三种植物在生态基质中 SP 含量要高于轻基质, 说明生态基质中植株受到干旱胁迫程度更大, 但复水处理在两种基质中对 SP 累计的影响均不明显, 其中红花檵木在生态基质中复水后 SP 含量持续增加。抗旱性强的树种在轻度干旱胁迫的情况下 SP 含量上升的幅度较大, 而重度或中度干旱胁迫则导致其含量下降^[29]。陈闻等^[30]研究表明, 滨铃叶绿素含量随干旱加重而明显下降。与胡杨等^[31]对细穗柽柳(*Tamarix leptostachya*)的研究结果一致, 与马斌等^[24]对 4 种木兰科(*Magnoliaceae*)植物的叶绿素含量和 POD 活性的研究结果一致随干旱情况增加而上升, 但对 SP 的研究结果与马斌等^[24]相反, 本试验 SP 含量随干旱胁迫增强而上升; 复水在一定程度上可提高 3 种植物的叶绿素含量及 SOD 和 POD 活性, 但对 SP 的累积效果不明显, 与张玉玉等^[32]对侧柏(*Platycladus orientalis*)、赵伟洁等^[33]对糜子(*Panicum miliaceum L.*)、牛静^[34]对棉花(*Gossypium spp*)的研究结果一致。

4 结论

1) 垂直栽培模式下, 冬季复水处理显著提高了滨铃、含笑花和红花檵木的株高、生物量和根冠比等生长指标, 其中采用轻基质栽培滨铃和红花檵木以及采用生态基质栽培含笑花生物量和根冠比分别提高了 1.6%~36.8% 和 20.2%~41.1%; 滨铃、含笑花、红花檵木干旱 40 d 后复水组总叶绿素含量比控水组分别提高 188.1%、31.8%、44.6%, 并且 SOD 活性、POD 活性、SP 含量等生理指标在复水后均有不同程度的提高, 有利于植物冬季生长。

2) 通过隶属函数法对三种植物两种基质组合的六种栽培模式进行抗旱性综合排序, 得出在生态基质中的滨铃抗旱性最强, 轻基质中的含笑花抗旱性最弱。综合评价滨铃冬季抗旱能力最强, 红花檵木次之, 含笑

花最弱,且采用储水能力相对较强的轻基质栽培滨铃和红花檵木,以及采用储水能力相对较差的生态基质栽培含笑花有利于提高其冬季栽培的抗旱能力。

3) 杭州冬季常规温度下,滨铃灌溉周期可以达到20 d以上;含笑花和红花檵木的灌溉周期不应超过20 d。

本研究从水分管理和基质选择上为进一步利用模块化设施和设施化对滨铃、含笑花和红花檵木应用于垂直绿化奠定了基础,后续的研究应进一步结合株型控制和景观营造模式,开展不同生长季节中的综合效益评价,熟化垂直绿化栽培模式。

参 考 文 献

- [1] 王雪,任吉君,梁朝信. 城市垂直绿化现状及发展对策[J]. 北方园艺, 2006(6): 104-105.
Wang Xue, Ren Jijun, Liang Chaoxin. Development and counter measures on urban vertical greening [J]. Northern Horticulture, 2006(6): 104-105.
- [2] 徐中民,陈磊,葛伦发. 北方地区立体绿化的植物选择应用及发展状况[J]. 吉林农业, 2012(3): 177.
- [3] 何健聪,张太平,李跃林,等. 我国城市垂直绿化现状与垂直绿化新技术[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 289-291.
He Jiancong, Zhang Taiping, Li Yuelin, et al. City vertical greening in China and new vertical greening techniques [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, 16(6): 289-291.
- [4] 符安. 垂直绿化在城市建设中的应用[J]. 现代园艺, 2019(12): 143-144.
- [5] 夏汉平,蔡锡安,彭彩霞. 5种爬藤植物垂直绿化的效果比较[J]. 草业学报, 2007, 16(3): 93-100.
Xia Hanping, Cai Xi'an, Peng Caixia. Comparison of five lianas for vertical greening [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(3): 93-100.
- [6] 宁博,于航,何旻,等. 南方地区垂直绿化对办公建筑能耗的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(12): 33-36, 28.
Ning Bo, Yu Hang, He Yang, et al. Influence of vertical greening on energy simulation of office building in Southern region [J]. Building Energy & Environment, 2016, 35(12): 33-36, 28.
- [7] 余杰. 墙体绿化对夏热冬冷地区建筑能耗影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Yu Jie. Research on the effect of wall greening on building energy consumption in hot summer and cold winter areas: a case study of Chengdu [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 刘旭飞,同炫玥,周伟,等. 基于多孔吸滤材料的自动灌排垂直绿化装置的结构设计和参数确定[J]. 节水灌溉, 2019(11): 85-90.
Liu Xufei, Tong Xuanyue, Zhou Wei, et al. Structural design and parameter determination of automatic irrigation and drainage vertical greening device based on porous absorbent filter material [J]. Water Saving Irrigation, 2019(11): 85-90.
- [9] 马旭俊,朱大海. 植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[J]. 遗传, 2003, 25(2): 225-231.
Ma Xujun, Zhu Dahai. Functional roles of the plant superoxide dismutase [J]. Hereditas (Beijing), 2003, 25(2): 225-231.
- [10] 董鹏,李铭,马新,等. 干旱胁迫对5个园林绿化树种生理生化特性的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 699-704.
Dong Peng, Li Ming, Ma Xin, et al. Effect of drought stress on physiological characteristics of five garden trees [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(4): 699-704.
- [11] 肖春旺,周广胜,马风云. 施水量变化对毛乌素沙地优势植物形态与生长的影响[J]. 植物生态学报, 2002, 26(1): 69-76.
Xiao Chunwang, Zhou Guangsheng, Ma Fengyun. Effect of water supply change on morphology and growth of dominant plants in Maowusu sandland [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(1): 69-76.
- [12] 王晓娟,周兰英. 干旱胁迫对红花檵木生长及生理特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2015, 33(1): 22-27, 32.
Wang Xiaojuan, Zhou Lanying. Drought effects on growth and physiological traits of Loropetalum chinense Var. rubrum [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2015, 33(1): 22-27, 32.
- [13] 赵卫星,刘喜存,李晓慧,等. 甜瓜幼苗对逆境胁迫的生理响应及抗逆性综合评价[J]. 西南农业学报, 2017, 30(2): 322-326.
Zhao Weixing, Liu Xicun, Li Xiaohui, et al. Physiological responses of muskmelon seedlings to different adversity stresses and synthetical evaluation of stress resistance [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(2): 322-326.
- [14] 冯晓燕,殷金岩,汪田野,等. 屋顶绿化基质及植物耐旱性研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10): 162-168.
- [15] 邱帅,卢山,余磊,等. 3种垂直绿化基质中园林植物干旱适应性的比较[J]. 西北植物学报, 2017, 37(2): 286-296.
Qiu Shuai, Lu Shan, Yu Lei, et al. Study on drought adaptability of landscape plants in 3 vertical greening substrates [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(2): 286-296.
- [16] 杨雪. 广州地区10种用于垂直绿化的植物绿化效果比较及种植基质筛选[J]. 广东园林, 2015, 37(5): 36-40.
Yang Xue. Comparisons of ten species vertical greening plants effects and planting medium screening in Guangzhou [J]. Guangdong Landscape Architecture, 2015, 37(5): 36-40.
- [17] 王文英. 景天属植物耐旱性评价及可移动生态型绿化基质筛选研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011.

- Wang Wenying. Studies on drought resistance evaluation of Sedum Plants and screening test of portable ecological afforestation matrixes [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2011.
- [18] 郭燕. 模拟干旱胁迫下葡萄的抗旱生理生化机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- Wu Yan. Study on physiological and biochemical mechanisms of drought resistance in grape under simulated drought stress [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [19] 鲁松. 干旱胁迫对植物生长及其生理的影响[J]. 江苏林业科技, 2012, 39(4): 51-54.
- Lu Song. Effects of drought stress on plant growth and physiological traits [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2012, 39(4): 51-54.
- [20] 陈闻, 赵颖, 叶正钱, 等. 干旱胁迫对 5 个海岛树种生长及生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(4): 490-498.
- Chen Wen, Zhao Ying, Ye Zhengqian, et al. Growth and physiological characteristics of five island tree species with drought stress [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(4): 490-498.
- [21] 邱权, 潘昕, 李吉跃, 等. 青藏高原 20 种灌木抗旱形态和生理特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(6): 562-575.
- Qiu Quan, Pan Xin, Li Jiyue, et al. Morphological traits and physiological characteristics in drought tolerance in 20 shrub species on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(6): 562-575.
- [22] 张永兵. 四种含笑抗旱性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [23] 段亮亮, 满秀玲, 刘力宁, 等. 冬季低温对沙漠植物约书亚树幼苗生理生化指标的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 242-245.
- Duan Liangliang, Man Xiuling, Liu Lining, et al. Effect of winter low temperature on physiological and biochemical indexes of desert plants Yucca brevifolia seedlings [J]. Journal of soil and water conservation, 2011, 25(6): 242-245.
- [24] 马斌, 张娅, 吴毅, 等. 干旱胁迫对 4 种木兰科树种生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 93-99.
- Ma Bin, Zhang Ya, Wu Yi, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of four Magnoliaceae species [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(11): 93-99.
- [25] 段启英, 田野, 鄂晓伟, 等. 南方型黑杨生长和生理特性对持续干旱和复水响应的性别差异[J]. 生态学杂志, 2020, 39(07): 2140-2150.
- Duan Qiyang, Tian Ye, E Xiaowei, et al. Sexual differences in growth and physiological properties of southern-type poplar clones in response to continuous drought and re-watering [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(7): 2140-2150.
- [26] 唐建, 冯娟, 刘云飞. 作物干旱复水补偿效应研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(1): 10-13.
- [27] 李海霞. 六个牡丹品种对干旱胁迫的生理响应机制及抗性评价[J]. 北方园艺, 2021(4): 64-71.
- Li Haixia. Physiological response mechanism and resistance evaluation of six peony varieties to drought stress [J]. Northern Horticulture, 2021(4): 64-71.
- [28] 高大海, 陈斌, 贺位忠. 柃木等 5 种地被植物的抗旱性研究[J]. 浙江林业科技, 2013, 33(1): 49-51.
- Gao Dahai, Chen Bin, He Weizhong. Study on drought resistance of five groundcover plants [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2013, 33(1): 49-51.
- [29] 谭晓荣, 胡韬纲, 戴媛, 等. 不同干旱方式对小麦幼苗可溶性蛋白含量及总抗氧化力的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 42-47.
- Tan Xiaorong, Hu Taogang, Dai Yuan, et al. Effect of different kinds of drought treatments on water soluble protein and total antioxidative capacity of wheat seedlings [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 29(1): 42-47.
- [30] 陈闻, 赵颖, 叶正钱, 等. 干旱胁迫对 5 个海岛树种生长及生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(4): 490-498.
- Chen Wen, Zhao Ying, Ye Zhengqian, et al. Growth and physiological characteristics of five island tree species with drought stress [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(4): 490-498.
- [31] 胡杨, 李钢铁, 李星, 等. 干旱胁迫对细穗柃柳幼苗生长和生理生化指标的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 43-50.
- Hu Yang, Li Gangtie, Li Xing, et al. Growth and physiological index of Tamarix leptostachys bunge seedlings under soil drought stress [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(6): 43-50.
- [32] 张玉玉, 王进鑫, 马戎, 等. 复水对干旱侧柏幼苗叶绿素含量的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 41(5): 1-9.
- Zhang Yuyu, Wang Jinxin, Ma Xu, et al. Effect of rewatering on chlorophyll content of platycladus orientalis seedlings after drought [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 41(5): 1-9.
- [33] 赵伟洁, 李翠, 晁桂梅, 等. 复水对水分胁迫条件下糜子生长的补偿效应[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(5): 55-65.
- Zhao Weijie, Li Cui, Chao Guimei, et al. Compensation effect of rewatering on the growth of broomcorn millet under water stress [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(5): 55-65.
- [34] 牛静. 花铃期干旱胁迫复水后棉花根系的补偿机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

Xin Pingping. Multi-factor coordination control model and method of greenhouse environment for benefit-priority [D].

Yangling: Northwest A & F University, 2019.

[14] 陈俐均, 杜尚丰, 梁美惠, 等. 温室温湿度解耦控制策

略[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 216—220.

Chen Lijun, Du Shangfeng, Liang Meihui, et al. Study on temperature and humidity control in greenhouse by using decoupling strategy [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 216—220.

Design and implementation of intelligent control system for strawberry greenhouse

Sun Changquan, Gao Juling

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Zhenjiang, 212400, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor reliability of environmental parameter acquisition and control and extensive regulation of water and fertilizer in the process of facility strawberry production, a facility strawberry intelligent production management and control system is designed and developed. The system includes two parts: information of environment growth perception system and implementation of environment control system. The multi-sensor data fusion algorithm and expert decision control system model improved the accuracy and authenticity of environmental parameter acquisition. It ensured the accurate control of environment growth and water and fertilizer demand at each growth stage of strawberry. At present, the system runs well in the strawberry glass greenhouse in the demonstration park. The utilization rate of water and fertilizer and the ability of environmental regulation have increased by 76.5% and 35.5%, respectively, and the yield and quality of strawberries have also greatly improved.

Keywords: facility strawberry; expert decision; environmental regulation; integration of water and fertilizer

(上接第 79 页)

Growth and physiological characters of three evergreen shrubs under vertical cultivation conditions in winter

Yang Jiaying^{1, 2}, Wang Zhigao², Zhu Jinru², Yuan Weigao², Wu Chuping², Jiang Bo²

(1. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Hangzhou, 310000;

2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou, 310000)

Abstract: Exploring the vertical cultivation techniques helps improve the economic, ecological, and landscape benefits of urban garden greening in south China in winter. In this study, three evergreen shrubs, *Euryaemarginata*, *Micheliafigo*, and *Loropetalumchinense var. rubrum*, were cultivated in ecological substrates and light substrates under vertical cultivation conditions. Through the determination and analysis of drought-resistant performance indexes, such as plant height growth, total biomass, root-shoot ratio, chlorophyll content, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, and soluble protein (SP) content in water control and rewater treatment, the optimal cultivation substrate and water management measures were selected. The results showed that the comprehensive evaluation of the drought resistance of the three plants in descending order was *Euryaemarginata*, *Loropetalumchinense var. rubrum*, and *Micheliafigo*, and the use of light substrate to cultivate *Euryaemarginata* and *Loropetalumchinense var. rubrum* and the use of ecological substrate to cultivate *Micheliafigo* were beneficial to cultivation. When cultivation of Hangzhou was done at a conventional temperature in winter, its biomass and root-to-shoot ratio increased by 1.6%—36.8% and 20.2%—41.1%, respectively, and the irrigation period could reach about 20 days.

Keywords: vertical greening; cultivation substrate; woody plant; drought resistance