

华南 22 种园林植物耐涝性筛选

尹婷辉, 林瑞君, 孙林, 罗炘武, 官彦章

(深圳文科园林股份有限公司, 广东省园林景观与生态恢复工程技术研究中心, 广东 深圳 518000)

摘要: 城市园林植物的耐涝性筛选及其合理应用, 对海绵城市设施功能的实现作用显著。本研究选取华南地区 22 种园林植物, 通过水淹胁迫 (0、5、10 和 15 d) 试验, 观测其叶绿素相对含量、丙二醛 (MDA) 含量、过氧化物酶活性 (POD) 活性的变化, 运用隶属函数和主成分分析法, 综合评价其耐涝性。结果表明, 对 22 种植物的耐涝性综合评价值的聚类分析可划分为 3 个抗逆级别, 分别为 I 级耐涝植物: 中华天胡荽 *Hydrocotyle chinensis*、风车草 *Cyperus involucratus*、黄蝉 *Allamanda schottii*、鸢尾 *Iris tectorum*、鹅掌柴 *Schefflera heptaphylla*、蓝花草 *Ruellia simplex*、栀子 *Gardenia jasminoides*; II 级一般耐涝植物: 茉莉花 *Jasminum sambac*、红鳞蒲桃 *Syzygium hancei*、基及树 *Carmona microphylla*、米仔兰 *Aglaia odorata*、四季桂 *Osmanthus fragrans* var. *semperflorens*、灰莉 *Fagraea ceilanica*、紫薇 *Lagerstroemia indica*; III 级不耐涝植物: 假连翘 *Duranta erecta*、红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum*、琴叶珊瑚 *Jatropha integrerrima*、变叶木 *Codiaeum variegatum*、月季花 *Rosa chinensis*、红背桂 *Excoecaria cochinchinensis*、朱槿 *Hibiscus rosa-sinensis*、龙船花 *Ixora chinensis*。I 级耐涝植物和 II 级一般耐涝植物被推荐应用于海绵城市有耐淹需求的渗透设施、渗透传输设施、贮存回用设施、净化设施等场景。

关键词: 海绵城市; 园林植物; 水淹胁迫; 耐涝性; 综合评价

中图分类号: S794.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2022) 01-0031-010

Experiment on Waterlogging Stress of 22 Garden Plant Species in Shenzhen

LIN Rui-jun, YIN Ting-hui, SUN Lin, LUO Xin-wu, GONG Yan-zhang

(Shenzhen Wenke Garden Co., Ltd., Guangdong Provincial Landscape Architecture and Ecological Restoration Engineering Technology Research Center, Shenzhen 518000, China)

Abstract: 22 garden plant species in Shenzhen, Guangdong province were selected for waterlogging stress test with 5, 10 and 15 days (0 day as ck). Determination was made on relative chlorophyll content (SPAD), malondialdehyde content (MDA) and peroxidase activity (POD) of leaves under different treatments. Waterlogging tolerance was evaluated by membership function and principal component analysis. The results showed that 22 plant species could be classified into 3 waterlogging resistance levels by D-value cluster analysis. The first level waterlogging tolerance species was *Hydrocotyle chinensis*, *Cyperus involucratus*, *Allamanda schottii*, *Iris tectorum*, *Schefflera heptaphylla*, *Ruellia simplex*, *Gardenia jasminoides*. The second level was *Jasminum sambac*, *Syzygium hancei*, *Carmona microphylla*, *Aglaia odorata*, *Osmanthus fragrans* var. *semperflorens*, *Fagraea ceilanica*, and *Lagerstroemia indica*. The third level was *Duranta erecta*, *Loropetalum chinense* var. *rubrum*, *Jatropha integrerrima*, *Codiaeum variegatum*, *Rosa chinensis*, *Excoecaria cochinchinensis*, *Hibiscus rosa-sinensis*, *Ixora chinensis*. Plants with level-I waterlogging tolerance and level-II general waterlogging tolerance are recommended for applying to infiltration facilities, infiltration transmission facilities, storage and reuse facilities, purification facilities and other situation that requires flood tolerance in sponge cities.

Key words: sponge city; garden plant; waterlogging stress; waterlogging tolerance; comprehensive evaluation

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-11-04

基金项目: 深圳市科技计划项目“专 2019N038 海绵城市生态减污技术研究及示范”项目(KCXFZ202002011006491)

作者简介: 尹婷辉, 从事植物生理生态、风景园林工作; E-mail:doria41@163.com; 通信作者: 官彦章, 高级工程师, 从事植物生态、园林植物研究等工作; E-mail:493783084@qq.com。

海绵城市(Sponge city)是指城市能够像海绵一样,在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”,下雨时吸水、蓄水、渗水、净水,需要时将蓄存的水“释放”并加以利用^[1]。海绵城市作为城市规划、设计、建设领域的探索和创新,其提出为修复水生态、涵养水资源提供了一种可行的路径。华南地区属亚热带海洋性气候,雨季集中且降雨量较大^[2],积水内涝成为城市发展面临的问题之一。结合华南地区山、林、田、湖、草自然地理格局,综合采取“渗、滞、蓄、净、用、排”等措施,构建低影响开发雨水系统(Low impact development, LID)^[3],成为海绵城市建设的主要途径。而园林植物作为低影响开发系统中重要的组成部分,在整个海绵城市功能中发挥着至关重要的作用,除了承担对城市园林景观环境的营造和对有害粉尘、气体的吸收净化的功能,亦承担对水资源的管理。因此,植物品种与应用方式的选择直接影响着海绵城市功能的实现、景观效果的长期维持。

水分条件是植物生长的重要环境因子之一,影响着植物形态、生理生化代谢及地理分布范围^[4]。中国南方地区雨量充沛,植物往往因为降雨次数多、降水强度大、土壤黏重、排水不良而易出现水涝胁迫^[5]。水淹能够直接改变土壤的物理、化学和生物学特性^[6],导致土壤供氧不足^[7],直接或间接地影响植物生理代谢,抑制生长,甚至导致植物死亡。多数研究表明,水淹会导致植物叶片叶绿素含量降低^[8],脂膜过氧化程度加剧^[9],渗透调节物质含量增加^[10],抗氧化酶活性发生不同程度的变化^[11]。华南地区高温多雨,水资源丰富,水体形式多样,滨水植物景观因兼具景观异质性和自然性的特征而成为展现城市自然生态新形象的景观类型,在城市蓝色廊道的规划和建设中得到重视^[12]。在海绵城市的构建以及滨水植物景观营造中,植物对水分的适应程度以及其耐涝性,决定了植物品种的选择及应用。本文基于海绵城市建设需要,探究海绵设施的覆盖植物的耐涝能力,通过观测水淹胁迫下的 22 种常见园林植物叶片的叶绿素相对含量、丙二醛含量、过氧化物酶等生理指标的变化,比较其耐涝性,建立植物的耐涝性综合排序^[13],为海绵城市耐涝植物的筛选与应用提供一定依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

本研究在基于深圳海绵城市建设项目调研的基础上,结合海绵城市设计图集推荐植物品种,选择深圳市常用的 22 园林植物(灌木、草本)用于水淹试验,见表 1。同一植物品种所选择的待测植物长势均一,试验材料均由深圳花卉苗圃提供。

表 1 22 种供试园林植物
Table 1 22 landscape plants for test

序号	种名	科名	属名	生长型	观赏特性
1	中华天胡荽 <i>Hydrocotyle chinensis</i>	五加科 Araliaceae	天胡荽属 <i>Hydrocotyle</i>	草本	观叶
2	风车草 <i>Cyperus involucratus</i>	莎草科 Cyperaceae	莎草属 <i>Cyperus</i>	草本	观叶
3	蓝花草 <i>Ruellia simplex</i>	爵床科 Acanthaceae	芦莉草属 <i>Ruellia</i>	草本	观花
4	鸢尾 <i>Iris tectorum</i>	鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	草本	观叶
5	黄蝉 <i>Allamanda schottii</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	黄蝉属 <i>Allamanda</i>	灌木	观花
6	鹅掌柴 <i>Schefflera heptaphylla</i>	五加科 Araliaceae	南鹅掌柴属 <i>Schefflera</i>	灌木	观叶
7	栀子 <i>Gardenia jasminoides</i>	茜草科 Rubiaceae	栀子属 <i>Gardenia</i>	灌木	观花
8	茉莉花 <i>Jasminum sambac</i>	木樨科 Oleaceae	素馨属 <i>Jasminum</i>	灌木	观花
9	红鳞蒲桃 <i>Syzygium hancei</i>	桃金娘科 Myrtaceae	蒲桃属 <i>Syzygium</i>	灌木	观花
10	米仔兰 <i>Aglaia odorata</i>	楝科 Meliaceae	米仔兰属 <i>Aglaia</i>	灌木	观叶
11	灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	龙胆科 Gentianaceae	灰莉属 <i>Fagraea</i>	灌木	观叶
12	四季桂 <i>Osmanthus fragrans</i> var. <i>semperflorens</i>	木犀科 Oleaceae	木犀属 <i>Osmanthus</i>	灌木	观花
13	基及树 <i>Carmona microphylla</i>	紫草科 Boraginaceae	基及树属 <i>Carmona</i>	灌木	观叶
14	紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	千屈菜科 Lythraceae	紫薇属 <i>Lagerstroemia</i>	灌木	观花
15	假连翘 <i>Duranta erecta</i>	马鞭草科 Verbenaceae	假连翘属 <i>Duranta</i>	灌木	观叶
16	红花檵木 <i>Loropetalum chinense</i> var. <i>rubrum</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	檵木属 <i>Loropetalum</i>	灌木	观叶
17	月季花 <i>Rosa chinensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	蔷薇属 <i>Rosa</i>	灌木	观花
18	朱槿 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	锦葵科 Malvaceae	木槿属 <i>Hibiscus</i>	灌木	观花
19	琴叶珊瑚 <i>Jatropha integerrima</i>	大戟科 Euphorbiaceae	麻风树属 <i>Jatropha</i>	灌木	观叶
20	红背桂 <i>Excoecaria cochinchinensis</i>	大戟科 Euphorbiaceae	海漆属 <i>Excoecaria</i>	灌木	观叶
21	变叶木 <i>Codiaeum variegatum</i>	大戟科 Euphorbiaceae	变叶木属 <i>Codiaeum</i>	灌木	观叶
22	龙船花 <i>Ixora chinensis</i>	茜草科 Rubiaceae	龙船花属 <i>Ixora</i>	灌木	观花

1.2 试验设计

选取生长健壮、长势一致的 22 种待测植物, 上盆种植于 21 cm×21 cm (直径×高) 的塑料花盆中, 使用深圳市当地赤红壤, 每盆装土高度为盆高 18 cm, 各盆之间保持一定距离, 避免交叉遮光。经两周缓苗期, 将待测植物正常浇水管理后 3 d (表层土壤不含水) 作为水淹胁迫基点, 分别将每种植物取 4~5 盆置于中转箱, 并保持水位在土壤表面上 2~3 cm 处, 作水淹处理 (水淹胁迫时间), 设置 4 个时间梯度, 分别为 0 d (CK)、5 d、10 d、15 d, 每个处理 3 个重复, 每个重复 10 盆。

每个处理分别于水淹处理 0 d、5 d、10 d、15 d 时取未干枯叶片测定各植物叶片叶绿素相对含量 (SPAD 值)、丙二醛 (MDA) 含量、过氧化物酶 (POD) 活性 3 个指标的含量变化, 0 d 作为对照组指示供试植物正常水分条件下的指标。

1.3 指标测定与数据处理

供测植物的 SPAD 值采用便携式叶绿素测定仪 (HM-YC) 测定^[14], POD 活性采用愈创木酚法测定^[15], MDA 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定^[16]。

采用 Excel 处理数据、制作图表, 运用 SPSS 21.0 软件进行方差分析、主成分分析和聚类分析, 运用 LSD 检验法进行多重比较检验处理间的差异显著性; 耐涝性评价采用隶属函数法进行排序, 相关计算公式如下^[17-18]:

(1) 单项指标耐涝系数 (α) 计算公式:

$$\alpha = \text{实验组指标含量} \div \text{参照组指标含量} \times 100\%$$

(2) 隶属函数值 [$U(X_i)$] 计算公式为:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中, X_i 表示第 i 个综合指标; X_{\min} 表示第 i 个综合指标的最小值; X_{\max} 表示第 i 个综合指标的最大值。

(3) 权重确定计算公式为:

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i$$

式中, W_i 值表示第 i 个综合指标在所有综合指标中的重要程度; P_i 为各品种(系)第 i 个综合指标的贡献率。

(4) 耐涝性综合评价值 (D) 计算公式为:

$$D = P_i / \sum_{i=1}^n [U(X_i) * W_i]$$

2 结果与分析

2.1 水淹胁迫对植物 SPAD 值的影响

已有研究证明, 植物的 SPAD 值与叶绿素含量存在极显著正相关关系, SPAD 值作为间接指标可以很好地反映植物叶片叶绿素含量^[19]。由表 2 可看出, 在水淹胁迫下, 变叶木、龙船花、假连翘、灰莉、月季花、红花檵木、四季桂、红鳞蒲桃、朱槿、紫薇、红背桂、琴叶珊瑚、米仔兰这 13 种植物的 SPAD 值, 随着水淹时间的增加均呈现逐渐下降的趋势, 且不同水淹时间处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 表明这类植物可能对水淹的耐受性较差, 其中, 龙船花、琴叶珊瑚、红花檵木、变叶木的 SPAD 值降幅极大, 水淹 15 d 时, SPAD 值的降幅分别为 84.34%、79.51%、78.65%、76.50%, 而红鳞蒲桃、紫薇、琴叶珊瑚、米仔兰在水淹 15 d 时与水淹 10 d 时的 SPAD 值无显著差异, 而与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 可能水淹 10 d 时已达到水淹胁迫的耐受力上限。

梔子、黄蝉、中华天胡荽的 SPAD 值在水淹 5 d、10 d、15 d 时均无显著差异, 而鹅掌柴在水淹 10 d、15 d 时无显著差异, 茉莉花、基及树则表现出水淹 15 d 时与 CK 相比无显著差异, 表明这类植物对水淹的耐受性较好, 受水分胁迫的影响时可自我调节至趋于正常状态。风车草、鸢尾、蓝花草在水淹试验过程中, SPAD 值均无显著差异, 不受水分胁迫的影响, 未产生水淹伤害, 表现出对水淹的耐受性较强。

表 2 淹水处理下 22 种植物叶片 SPAD 值的变化
Table 2 Changes of relative chlorophyll content in leaves of 22 species under different days of waterlogging stress

植物	SPAD 值/%			
	CK	水淹 5 d	水淹 10 d	水淹 15 d
梔子	44.867±0.333c	50.970±5.495ab	53.491±4.892a	50.134±1.962ab
黄蝉	32.433±2.145c	53.000±4.982a	47.727±3.458ab	44.045±3.393b
中华天胡荽	12.267±0.403c	13.533±2.478ab	13.707±5.079ab	18.052±0.655a
变叶木	36.233±1.362b	61.700±2.392a	25.690±4.608c	8.515±3.184d
鹅掌柴	41.133±0.709c	64.530±3.814a	47.040±1.541b	47.040±2.384b
龙船花	69.100±0.477a	65.270±3.866a	28.124±4.387b	10.823±1.171c
假连翘	25.167±1.066a	23.500±1.482a	19.253±2.935b	7.756±1.398c
灰莉	12.967±1.881a	13.200±6.142a	9.068±3.878ab	5.068±1.049c
月季花	43.033±1.104a	36.400±5.31b	22.817±3.176c	11.093±0.887d
红花檵木	55.600±1.165a	31.067±3.75b	27.627±1.278b	11.871±1.382c
四季桂	60.900±2.592a	52.830±4.677b	36.592±1.782c	24.786±3.400d
红鳞蒲桃	62.567±2.129a	45.967±4.048b	41.235±2.484bc	35.675±3.431c
朱槿	69.867±2.096a	49.100±5.412b	30.943±4.088c	19.412±3.135d
紫薇	54.200±2.157a	36.200±3.489b	16.703±2.626c	18.753±3.082c
鸢尾	19.100±2.474a	21.600±2.914a	20.208±1.906a	22.835±1.562a
红背桂	44.467±0.696a	43.067±4.476a	30.450±5.141b	12.115±2.548c
茉莉花	9.667±2.225b	27.600±4.019a	14.308±4.638b	8.789±1.190b
蓝花草	38.300±2.076ab	41.730±2.638a	34.822±3.739b	37.565±2.074ab
琴叶珊瑚	37.067±1.697a	21.767±5.797b	9.555±3.063c	7.595±2.304c
米仔兰	47.600±2.306a	34.267±3.166b	29.929±5.39bc	23.763±3.298c
风车草	15.333±1.611a	15.660±4.687a	17.343±4.178a	19.989±2.432a
基及树	14.033±1.361c	19.733±2.408b	25.810±2.154a	13.010±1.309c

注：同行不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ），下同。

2.2 水淹胁迫对植物叶片 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂氧化的最终产物，通常将其作为脂质过氧化指标，用于表明细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境胁迫反应的强弱^[20]。MDA 参与破坏生物膜的结构和功能，植物体内 MDA 的产生和积累是植物胁迫的主要生理响应特征之一^[21]。由表 3 可知，在水淹胁迫试验中，随着水淹胁迫时间的增加，22 种植物叶片的 MDA 含量总体呈现上升趋势（见表 3）。

表 3 水淹胁迫下 22 种植物叶片 MDA 含量的变化
Table 3 Changes of MDA content in leaves of 22 species under different days of waterlogging stress

植物	MDA 含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)			
	CK	水淹 5 d	水淹 10 d	水淹 15 d
梔子	0.113±0.006b	0.116±0.005b	0.144±0.008a	0.144±0.005a
黄蝉	0.111±0.007c	0.160±0.002a	0.162±0.009a	0.144±0.006b
中华天胡荽	0.103±0.008b	0.073±0.007c	0.062±0.005c	0.118±0.009a
变叶木	0.065±0.006d	0.136±0.009c	0.233±0.009a	0.184±0.003b
鹅掌柴	0.099±0.007d	0.175±0.000a	0.137±0.005b	0.119±0.005c
龙船花	0.089±0.006d	0.129±0.003c	0.239±0.005a	0.148±0.007b
假连翘	0.010±0.007b	0.113±0.007a	0.105±0.007a	0.018±0.007b
灰莉	0.112±0.007c	0.143±0.009b	0.145±0.007b	0.163±0.002a
月季花	0.058±0.008c	0.125±0.006b	0.203±0.007a	0.115±0.007b
红花檵木	0.080±0.008d	0.143±0.008b	0.192±0.005a	0.111±0.003c
四季桂	0.034±0.006c	0.051±0.001b	0.096±0.008a	0.047±0.006b
红鳞蒲桃	0.049±0.004b	0.092±0.009a	0.088±0.004a	0.044±0.006b
朱槿	0.051±0.006c	0.084±0.008b	0.101±0.004a	0.093±0.007ab
紫薇	0.052±0.006c	0.064±0.006b	0.068±0.004b	0.078±0.002a
鸢尾	0.043±0.009b	0.069±0.005a	0.078±0.007a	0.026±0.007c
红背桂	0.311±0.003d	0.337±0.005c	0.473±0.006b	0.658±0.003a
茉莉花	0.051±0.007b	0.046±0.008b	0.057±0.007b	0.071±0.005a
蓝花草	0.034±0.008b	0.053±0.006a	0.048±0.007a	0.027±0.007b
琴叶珊瑚	0.065±0.005c	0.099±0.005b	0.108±0.004b	0.163±0.009a
米仔兰	0.066±0.006b	0.069±0.004b	0.052±0.003c	0.093±0.006a
风车草	0.030±0.003b	0.037±0.006ab	0.045±0.006a	0.034±0.004b
基及树	0.035±0.006d	0.055±0.009c	0.074±0.004b	0.123±0.007a

随着水淹胁迫时间的增加, 栀子、中华天胡荽、变叶木、鹅掌柴、龙船花、假连翘、月季花、红花檵木、四季桂、红鳞蒲桃、朱槿、鸢尾、蓝花草、风车草叶片的 MDA 含量呈现由先上升后转变为逐渐下降的趋势, 其中假连翘、红鳞蒲桃、蓝花草、风车草叶片的 MDA 含量在水淹胁迫 15 d 同 CK 相比均无显著差异, 说明这类植物在水淹逆境胁迫下, 能缓解 MDA 含量的积累, 降低水淹胁迫伤害, 主动适应水淹环境。而灰莉、红背桂、紫薇、琴叶珊瑚、基及树叶片的 MDA 含量, 随着水淹胁迫时间的增加, 呈持续上升趋势, 在水淹胁迫 15 d 时, 其叶片的 MDA 含量相较于 CK, 分别为增加了 45.54%、111.58%、50.00%、150.77%、251.43%, 说明这些植物对水淹环境的适应性较差。此外, 黄蝉、茉莉花、米仔兰这 3 种植物叶片的 MDA 含量在试验阶段表现不稳定, 增减交替变化, 在水淹胁迫处理 15 d 时与 CK 相比差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 水淹胁迫对植物叶片 POD 活性的影响

由表 4 可看出, 随着水淹胁迫时间的增加, 各类植物的 POD 活性均呈现出先增加后降低的趋势, 鸢尾、红背桂、茉莉花、蓝花草这 4 种植物在水淹胁迫第 10 d 时达到峰值, 而其余 18 种植物均表现为在水淹胁迫第 5 d 时达到峰值, 在水淹胁迫第 15 d 时降至最低。栀子、黄蝉、中华天胡荽、假连翘、红花檵木、紫薇、鸢尾、茉莉花、风车草叶片的 POD 活性在水淹胁迫 15 d 时同 CK 相比无显著差异; 其中风车草、假连翘、红花檵木、四季桂、红鳞蒲桃、紫薇从试验初期至水淹胁迫 15 d, 其叶片的 POD 活性均在 $200\text{ u}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 以内, 持续保持较低的 POD 活性。

表 4 水淹胁迫下 22 种植物叶片 POD 活性的变化
Table 4 Changes of POD activity in leaves of 22 species under different days of waterlogging stress

植物	POD 活性/($\text{u}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)			
	CK	水淹 5 d	水淹 10 d	水淹 15 d
栀子	238.650±10.717b	332.170±37.744a	273.710±17.051b	230.167±15.611b
黄蝉	1 088.750±21.051c	1 244.880±49.383a	1 181.520±30.895b	1 042.805±17.433c
中华天胡荽	543.490±21.629b	625.760±46.653a	580.330±6.516ab	542.838±6.993b
变叶木	374.150±35.746b	437.850±12.898a	356.360±10.641b	131.215±9.009c
鹅掌柴	466.110±8.129a	512.700±50.835ab	420.640±26.580b	439.022±8.209b
龙船花	621.990±37.214b	755.700±46.514a	463.590±43.270c	131.734±32.801d
假连翘	54.545±29.153ab	89.632±5.220a	50.139±38.308ab	24.456±10.672b
灰莉	200.131±19.561c	359.667±9.195a	289.861±50.136b	136.809±27.033d
月季花	258.070±4.202b	367.551±31.553a	230.270±16.720b	55.686±46.992c
红花檵木	40.700±32.744b	93.670±27.982a	12.440±27.550b	10.137±12.877b
四季桂	158.150±15.200ab	170.220±14.437a	105.699±47.983b	136.421±34.48ab
红鳞蒲桃	30.740±35.079a	56.430±44.307a	57.130±7.166a	25.183±46.624a
朱槿	654.909±28.782b	702.235±19.342a	657.673±25.432b	106.095±16.416c
紫薇	13.990±44.144b	175.690±46.879a	133.070±34.068a	8.861±13.757b
鸢尾	370.155±37.734c	456.589±51.255b	599.903±22.424a	346.173±20.751c
红背桂	110.210±43.795c	286.310±48.747b	470.200±37.375a	22.792±39.134d
茉莉花	158.433±31.374bc	198.461±5.925b	294.334±34.237a	133.246±12.933c
蓝花草	398.441±40.138b	483.560±10.104a	492.533±15.263a	399.332±41.353b
琴叶珊瑚	566.880±36.209c	821.395±31.078a	704.921±43.811b	205.777±30.534d
米仔兰	610.786±41.816a	637.581±14.674a	608.502±16.705a	529.832±40.568b
风车草	40.898±30.029b	106.400±31.461a	87.037±33.998ab	41.846±32.837b
基及树	846.052±22.733b	946.320±47.726a	903.888±20.537ab	710.737±33.94c

2.4 植物耐涝性综合评价

随着水淹胁迫时间的增加, 22 种园林植物在水淹胁迫后的叶片 POD 活性均呈现出先增加后降低的趋势,

说明植物受到水淹水胁迫后迅速启动 POD 活性进行保护, 通过不断调整 POD 活性消除自由基带来的伤害。

2.4.1 主成分分析运用 采用 SPSS 21.0 进行主成分分析, 将水淹胁迫后植物叶片的 SPAD 值、MDA 含量、POD 活性指标数据, 进行降维分析^[22-23]。分析前进行 KMO 和 Bartlett 的检验, 检验结果表明: KMO 值为 0.612>0.6, Bartlett 球形度检验 P 值为 $0<0.05$, 表明数据适合做主成分分析。

相关矩阵分析(表 6)表明, 22 种园林植物叶片的 POD 活性与 SPAD 值的相关系数为 0.848, 两者呈显著性正相关, 与 MDA 含量的相关系数为 -0.49, 两者呈负相关; MDA 含量与 SPAD 值的相关系数 -0.43, 两者呈负相关。

主成分累积贡献率(Cumulative contribution rate, CCR) 大于 80%即可认为信息具有代表性^[24]。由表 7 表明, 第一个主成分的特征根为 2.201, 解释了总变异的 73.358%; 第二个主成分解释了总变异的 21.691%。提取这 2 个主成分, 解释了 95.049%的信息, 达到较理想的数据降维效果, 可分别用这 2 个主成分对植物品种的耐涝性进行概括分析。

表 6 相关矩阵
Table 6 Correlation matrix

指标	POD 活性	SPAD 值	MDA 含量
POD 活性	1.000		
SPAD 值	0.848	1.000	
MDA 含量	-0.490	-0.430	1.000

表 7 解释的总方差
Table 7 Total variance explained

主成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差百分比/%	累积贡献率/%	合计	方差百分比/%	累积贡献率/%
1	2.201	73.358	73.358	2.201	73.358	73.358
2	0.651	21.691	95.049	0.651	21.691	95.049
3	0.149	4.951	100			

注: 提取方法为主成分分析。

表 8 成分矩阵 a
Table 8 Component matrix

初始因子	主成分 1	主成分 2
POD 活性	0.933	0.229
SPAD 值	0.912	0.314
MDA 含量	-0.707	0.707

由表 8 可知, 提取的主成分 1 将 POD 活性、SPAD 值、MDA 含量的 3 个指标信息进行了较全面的提取, 同时也显现出各指标间的显著正负相关关系, 而主成分 2 主要提取了 MDA 含量信息。根据成分矩阵的因子载荷, 计算对应的特征向量, 得到主成分的表达式:

主成分 1 计算公式:

$$Y_1=0.629\times\text{POD 活性}+0.615\times\text{SPAD 值}-0.476\times\text{MDA 含量}$$

主成分 2 计算公式:

$$Y_2=0.284\times\text{POD 活性}+0.389\times\text{SPAD 值}+0.876\times\text{MDA 含量}$$

主成分 1 计算公式中 POD 活性、SPAD 值的系数相差较小, 主成分 2 计算公式中的 MDA 含量的系数最大。

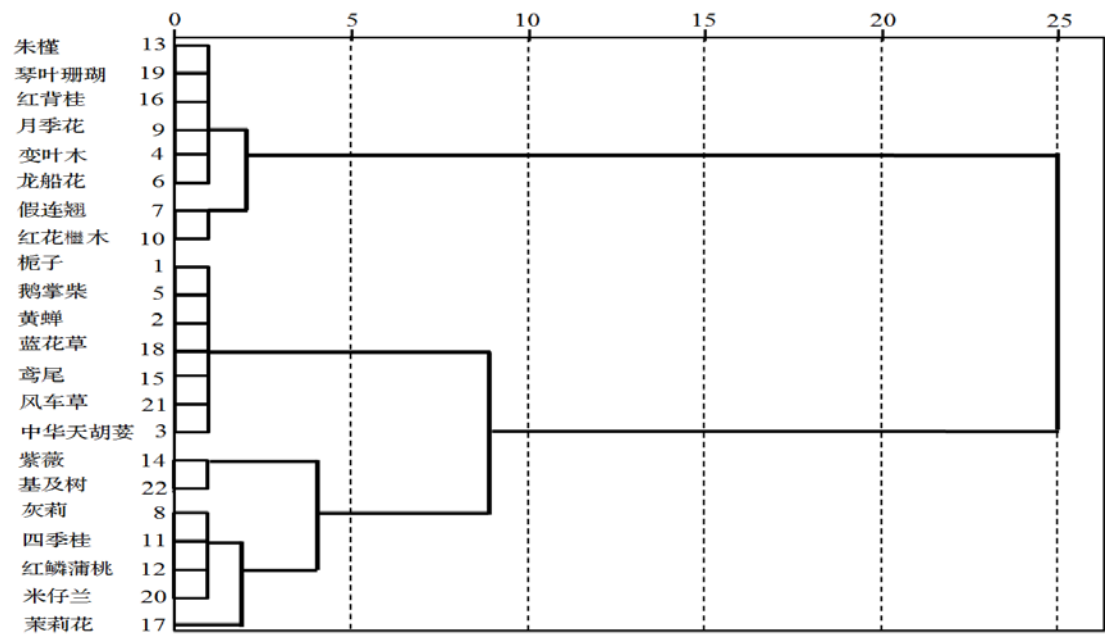
根据主成分 1、2 的贡献率, 分别为 73.358%、21.691%, 计算得到其权重分别为 0.772、0.228, 将其权重代入耐涝性综合评价(D) 计算公式, 得到其综合评分值(表 9)。

由表 9 按综合评分值的大小对 22 个树种进行排序, 其结果为: 中华天胡荽>风车草>鸢尾>黄蝉>蓝花草>鹅掌柴>栀子>茉莉花>红鳞蒲桃>米仔兰>灰莉>四季桂>基及树>紫薇>假连翘>红花檵木>月季花>朱槿>琴叶珊瑚>红背桂>变叶木>龙船花。

以综合评分值进行聚类分析, 结果如图 1。由图 1 可知, 以 $X=5$ 为参考轴, 可以将 22 种植物分为三个类别: I 级耐涝植物, 包括中华天胡荽、风车草、黄蝉、鸢尾、鹅掌柴、蓝花草、栀子 7 种; II 级较耐涝植物, 包括茉莉花、红鳞蒲桃、基及树、米仔兰、四季桂、灰莉、紫薇 7 种; III 级不耐涝植物, 包括假连翘、红花檵木、琴叶珊瑚、变叶木、月季花、红背桂、朱槿、龙船花 8 种。

表 9 22 种园林植物耐涝能力综合评价
Table 9 Comprehensive evaluation on waterlogging tolerance of 22 species

植物	POD 活性	SPAD 值	MDA 含量	主成分得分		隶属函数值		D	排序
				因子 1	因子 2	$U(X_1)$	$U(X_2)$		
中华天胡荽	0.999	1.472	1.150	2.090	0.427	1.000	0.374	0.857	1
风车草	1.023	1.304	1.118	1.930	0.261	0.961	0.331	0.818	2
黄蝉	0.958	1.358	1.295	1.750	0.480	0.918	0.387	0.797	3
鸢尾	0.935	1.196	0.602	1.972	-0.581	0.972	0.115	0.776	4
鹅掌柴	0.942	1.144	1.200	1.492	0.157	0.856	0.304	0.730	5
蓝花草	1.002	0.981	0.788	1.679	-0.467	0.901	0.144	0.728	6
栀子	0.964	1.117	1.274	1.447	0.249	0.845	0.328	0.727	7
茉莉花	0.841	0.909	1.384	0.840	0.102	0.700	0.290	0.606	8
红鳞蒲桃	0.819	0.570	0.908	0.668	-0.830	0.658	0.051	0.520	9
基及树	0.840	0.927	3.500	-0.632	2.866	0.346	1.000	0.495	10
米仔兰	0.867	0.499	1.412	0.310	-0.194	0.572	0.214	0.490	11
四季桂	0.863	0.407	1.392	0.190	-0.304	0.543	0.186	0.462	12
灰莉	0.684	0.391	1.459	-0.233	-0.390	0.441	0.164	0.378	13
紫薇	0.633	0.346	1.500	-0.425	-0.421	0.395	0.156	0.341	14
假连翘	0.448	0.308	1.796	-1.052	-0.235	0.245	0.204	0.235	15
红花檵木	0.249	0.214	1.385	-1.284	-1.028	0.189	0	0.146	16
琴叶珊瑚	0.363	0.205	2.500	-1.859	0.515	0.051	0.396	0.130	17
变叶木	0.351	0.235	2.824	-2.070	0.951	0	0.508	0.116	18
月季花	0.216	0.258	1.980	-1.709	-0.246	0.087	0.201	0.113	19
红背桂	0.207	0.272	2.114	-1.802	-0.067	0.064	0.247	0.106	20
朱槿	0.162	0.278	1.814	-1.671	-0.492	0.096	0.138	0.105	21
龙船花	0.212	0.157	1.661	-1.630	-0.751	0.106	0.071	0.098	22
权重				0.772	0.228				



注: 使用平均联接 (组间) 的树状图, 重新调整距离聚类合并。

图 1 22 种植物综合评分值 D 值聚类分析图

Figure 1 Clustering chart of comprehensive evaluation of 22 species

3 结论与讨论

3.1 讨论

城市化的发展带来系列的城市水危机,如水质污染、洪水、城市内涝化、地下水位下降等^[25]。随着城市发展速度的加快,城市水问题日趋严重^[26]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》^[27]提出,建设源头减排、蓄排结合、排涝除险、超标应急的城市防洪排涝体系,推动城市内涝治理取得明显成效。让城市像海绵一样“呼吸吐纳”,营造山清水秀的生态环境,建设高品质的现代都市。因此,在新型城镇化建设过程中,海绵城市低影响开发建设模式得到了推广和应用,加大城市径流雨水源头减排的刚性约束,优先利用自然排水系统,建设生态排水设施,充分发挥城市绿地、道路、水系等对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用,使城市开发建设后的水文特征接近开发前,有效缓解城市内涝,削减城市径流污染负荷,节约水资源,保护和改善城市生态环境。本试验研究了 22 种华南地区常用灌木及草本植物在水淹条件下的生长适应性,从中筛选出适合海绵城市建设(低影响开发雨水系统构建)的植物种类。在水淹胁迫下,22 种植物的正常的生理代谢受到抑制,产生了系列的生理生化等变化,体现了植物对环境胁迫的反应以及对环境改变的适应结果^[27-28]。测定植物的 MDA 含量、POD 活性以及 SPAD 值是筛选与检验植物适应水淹逆境胁迫的重要方式^[28-29,31-32]。

在耐涝试验的整个过程中,22 种试验植物均未出现死亡植株。其中,以中华天胡荽、风车草、鸢尾为代表的水生植物长势好,其各项指标浮动较小,数据分析结果基本符合这类水生植物的生长特性,中华天胡荽在水淹胁迫 5 d 时开始萌发地下横走茎,节间逐渐地生根和长叶。黄蝉、蓝花草虽不是水生植物,但植株长势健康,表现出较强的耐涝能力,在实际应用中容易扦插生根,而鹅掌柴、栀子虽然生长形态未受到影响,但不及水生植物状态好。龙船花、变叶木、朱槿在水淹胁迫过程中,未发育新叶,成叶逐渐失绿变黄,表现出不同程度的萎蔫、卷曲、下垂等症状,直至试验末期,叶片凋萎脱落,长势极弱。其他试验植物在生长、形态等方面,试验时叶片出现部分萎蔫症状,但未严重影响其生理活动。

植物在受到水淹胁迫时,光合速率下降、光合产物的运输减慢、根系严重缺氧、叶片气孔关闭、CO₂ 扩散的气孔阻力不断增加,影响光呼吸相关酶活性,叶绿素含量持续下降^[13]。在水淹试验过程中,超过一半的植物(如龙船花、琴叶珊瑚、红花檵木、变叶木等)随着水淹胁迫时间的增加,表现出 SPAD 值逐渐下降的趋势,且与 CK 相比差异显著,所涉及的这类植物的叶片表现出萎蔫、卷曲,甚至凋落,一定程度上反映其水淹耐受性较弱。而栀子、黄蝉、中华天胡荽、鹅掌柴、基及树能在水淹试验的持续过程中,出现不同程度上的 SPAD 值的缓和,甚至与水淹中期或水淹初期的 SPAD 值之间无显著差异。风车草、鸢尾、蓝花草的 SPAD 值在水淹胁迫试验中一直呈现无显著差异,生长状态未受水分胁迫的影响,未产生水淹伤害,表现出对水淹的耐受性较强。

MDA 为膜脂过氧化物的产物,其含量高低亦可反映植物的受害程度^[32-33],一般用来评价植物在逆境下发生膜脂过氧化作用的强弱^[18]。栀子、中华天胡荽、变叶木、鹅掌柴、龙船花、假连翘、月季花、红花檵木、四季桂、红鳞蒲桃、朱槿、鸢尾、蓝花草、风车草叶片的 MDA 含量随着水淹胁迫时间的增加呈先上升后下降的趋势,且保持较低的水平,说明其细胞膜受损程度较小,尤其是假连翘、红鳞蒲桃、蓝花草、风车草叶片的 MDA 含量在水淹胁迫处理末期(15 d 时)与 CK 相比均无显著差异,耐涝能力较强。灰莉、红背桂、紫薇、琴叶珊瑚、基及树叶片的 MDA 含量随着水淹胁迫时间的增加呈持续上升趋势,在水淹胁迫处理末期(15 d 时)相较于 CK 均差异显著($P<0.05$),其 MDA 含量分别增加了 45.54%、111.58%、50.00%、150.77%、251.43%,表明这类植物对水淹的环境的适应性较差。黄蝉、茉莉花、米仔兰叶片的 MDA 含量不稳定,呈波动式增减,但在水淹胁迫处理末期(15 d 时)与 CK 相比差异显著($P<0.05$),其降幅分别为 29.7%、39.22%、40.91%,表明这类植物自身可能在通过渗透调节以适应水分胁迫。

水淹胁迫致使植物根部缺氧,导致植物氧代谢失调,活性氧累积而引起细胞损伤^[20]。水淹条件下植物会启动一系列保护酶调整和降低活性氧含量^[5]。在本研究中,随着水淹胁迫时间增长,22 种植物叶片的 POD 活性均呈现出先增加后降低的趋势,其中 80%以上植物的 POD 活性在水淹胁迫 5 d 时达到峰值,并在水淹胁迫 15 d

时降至最低。而栀子、黄蝉、中华天胡荽、假连翘、红花檵木、紫薇、鸢尾、茉莉花、风车草的 POD 活性在水淹胁迫 15 d 时与 CK 相比无显著差异。

植物的抗涝能力主要取决于植物的形态结构和生理代谢对缺氧的适应能力^[33-34,36-37]。耐涝植物一般可以通过通气组织、皮孔增生、不定根等形态学特征增强其抗涝性。在本水淹实验中,黄蝉、栀子等植物在水淹胁迫 5 d 时均出现明显的不定根和皮孔增生现象,而风车草、中华天胡荽、蓝花草的自身茎中长满的气室,可以储藏空气,在水淹缺氧时仍不受影响,均表现出其较强的耐涝性。中华天胡荽叶片的 MDA 含量在水淹胁迫 5 d 时与 CK 相比差异显著($P<0.05$),在水淹胁迫 10 d 时二者之间无显著差异,而在水淹胁迫 15 d 时 MDA 含量则表现出与 0 d、5 d、10 d 时的差异显著($P<0.05$);中华天胡荽的 SPAD 值在水淹胁迫 5 d、10 d、15 d 时均无显著差异,而其 POD 活性在水淹胁迫 15 d 时与 CK 的活性同样无显著差异,在耐涝能力综合评价的综合排序中处于第一位。研究发现,黄蝉、蓝花草、栀子和鹅掌柴的耐涝能力综合评价的排名紧接中华天胡荽,在聚类分析中划分为与水生植物同一类的 I 级耐涝,较其他植物而言具有较强的耐涝能力,这是由于植物耐涝性机制相对复杂,单个形态、生理指标具有局限性,因此必须综合分析植物形态、生长或生理代谢等各方面的变化,最理想的方式是从基因水平上最终加以确认,才能科学评价植物的耐涝性^[37-38]。

在城镇化建设及推进建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市的发展过程中,海绵城市建设——低影响开发雨水系统,对设施覆盖的植物提出了耐淹、耐旱、耐污染、耐荫等不同需求,以便因地制宜地推荐植物应用于不同场景的海绵设施。科学地评价植物是否适合海绵城市建设,不能以单一指标而论,需要研究者从植物的耐旱性、耐热性、耐寒性、耐阳性、耐荫性、耐涝性、净化能力、耐贫瘠性、抗风性、耐污染性、抗病虫害性、株型整体性、叶期、花期、繁殖难易程度、生长速度、根系性状、耗能程度和管理养护程度等方面^[38]进行综合评价。本研究对 22 种园林植物的耐涝性进行试验筛选,以期能为海绵城市建设的适宜植物名录提供量化的数据参考。

3.2 结论

通过对 22 种植物耐涝能力综合评价以及耐涝性综合评价的聚类排序,将其分别划分为三个类别:I 级耐涝植物,包括中华天胡荽、风车草、黄蝉、鸢尾、鹅掌柴、蓝花草、栀子 7 种植物;II 级较耐涝植物,包括茉莉花、红鳞蒲桃、基及树、米仔兰、四季桂、灰莉、紫薇 7 种植物;III 级不耐涝植物,包括假连翘、红花檵木、琴叶珊瑚、变叶木、月季花、红背桂、朱槿、龙船花 8 种植物。园林植物作为重要的城市海绵体组成部分,作用体现在“滞、渗、吸、净”等方面。本试验筛选出的耐涝性植物(I 级耐涝植物和 II 级较耐涝植物)推荐适用于海绵城市主要设施类场景中:渗透设施类如下沉式绿地、生物滞留设施、渗透塘;渗透传输设施类,如植草沟;贮存回用设施类有湿塘、雨水湿地;净化设施类的植被缓冲带、人工土壤渗透设施。结合李灿等研究 5 种热带花灌木对旱涝胁迫的生理的结果分析,栀子、红鳞蒲桃耐涝不耐旱,可配置于滨水绿带、淡水湿地旁;黄蝉既耐涝又耐旱,花期长,观赏性强,可配置于雨水花园和滨水河带等环境^[18]。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设评价标准: GBT51345—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 蒋沂孜, 刘安, 刘梁, 等. 华南地区城市道路雨水径流对降雨特征的响应机制[J]. 环境工程, 2013, 31: 303—304.
- [3] 深圳市市场监督管理局. 海绵城市建设项目施工、运行维护技术规程: DB4403/T 25—2019[S/OL]. [2019-01-12]. <http://www.doc88.com/p-1942900854445.html>.
- [4] 李霞, 阎秀峰, 于涛. 水分胁迫对黄槿幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2353—2356.
- [5] 齐琳, 马娜, 吴雯雯, 等. 无花果品种幼苗淹水胁迫的生理响应与耐涝性评估[J]. 园艺学报, 2015, 42(7): 1273—1284.
- [6] KRAMER G F, NORMAN H A, KRIZEK D T, et al. Influence of UV-B radiation on polyamines, lipid peroxidation and membrane lipids in cucumber[J]. Phytochem, 1991, 30: 2101—2108.
- [7] Jackson M B, Armstrong W. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence[J]. Plant Biol, 1999, 1: 274—287.
- [8] ASHRAF M, MEHMOOD S. Effects of waterlogging on growth and some physiological parameters of four Brassica species[J]. Plant Soil, 1990,

- 121 (2): 203–209.
- [9] ARBONA V, HOSSAIN Z, LÓPEZ-CLIMENT M F, et al. Antioxidant enzymatic activity is linked to waterlogging stress tolerance in citrus[J]. *Physiol Plant*, 2008, 132 (4): 452–466.
- [10] OLGUN M, KUMLAY A M, ADIGUZEL M C, et al. The effect of waterlogging in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Acta Agr Scand, Sec B: Soil Plant Sci*, 2008, 58 (3): 193–198.
- [10] 卓仁英, 陈益泰. 木本植物抗涝性研究进展[J]. *林业科学*, 2001, 2 (16): 215–221.
- [12] 翁殊斐, 朱锦心, 苏志尧, 等. 岭南地区滨水绿地植物景观质量评价[J]. *林业科学*, 2017, 53 (1): 21.
- [13] 王萍, 胡永红, 王丽勉, 等. 观赏植物耐涝性鉴定指标的种类及其评价方法[J]. *北方园艺*, 2007 (11): 78–81.
- [14] 李辉, 白丹, 张卓, 等. 羊草叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关分析[J]. *中国农学通报*, 2012, 28 (02): 27–30.
- [15] 邱勇波. 矮牵牛耐热性形态及生理指标的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [16] 赵世杰, 许长城, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. *植物生理学通讯*, 1994, 30 (3): 207–210.
- [17] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. *中国农业科学*, 2003 (11): 1378–1382.
- [18] 潘向艳. 杂交鹅掌楸不同无性系对淹水胁迫的反应[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [19] 王瑞, 陈永忠, 陈隆升, 等. 油茶叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 22 (2): 77–80.
- [20] 潘澜, 薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2012, 31 (10): 2662–2672.
- [21] 刘正兴, 肖玉菲, 莫云善, 等. 澳洲茶树对淹水胁迫的生长和生理响应[J]. *广西林业科学*, 2020 (01): 81–85.
- [22] 刘大海, 李宁, 晁阳. 统计分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 115–146.
- [23] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. *统计研究*, 2005, 03: 65–69.
- [24] 李红宇, 李逸, 司洋, 等. 北方粳稻耐盐碱相关性状主成分分析及综合评价[J]. *核农学报*, 2020, 34 (8): 1862–1871.
- [25] 王建. 论海绵城市理论及其在城市规划中的实践构想[J]. *工程技术 (引文版)*, 2016 (7): 112.
- [26] 张亮, 俞露, 任心欣, 等. 基于历史内涝调查的深圳市海绵城市建设策略[J]. *中国给水排水*, 2015, 31 (23): 120–124.
- [27] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[Z]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2021.
- [28] 苏慧敏, 何丙辉, 蔡兴华, 等. 水分胁迫对太阳扇扦插苗形态和生理特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30 (10): 2188.
- [29] 生利霞, 王倩, 孟祥毅. 植物耐涝分子机理研究进展[J]. *分子植物育种*, 2017, 12 (7): 2823–2828.
- [30] 曹秋艳, 周润嫦. 基于“海绵城市”理念的四种园林植物耐水湿性研究——以韶关市为例[J]. *韶关学院学报*, 2016 (12): 40–44.
- [31] 毕舒贻, 黄晖, 温暖玲, 等. 海绵城市建设中 22 种园林植物耐淹性比较[J]. *亚热带植物科学*, 2020, 049 (001): 15–20.
- [32] 官彦章, 毛君竹. 七种华南园林植物对水淹胁迫的生理响应分析[J]. *绿色科技*, 2020 (23): 41–43.
- [33] VILLAGRA J B, CAVAGNA R O. Water stress effects on the seedling growth of *Prosopis argentina* and *Prosopis alata*[J]. *J Arid Environ*, 2005, 64 (3): 237.
- [34] 姚喜军, 杜中华. 植物抗水淹性研究进展[J]. *内蒙古林业科技*, 2011, 37 (4): 57–60.
- [35] 谭淑端, 朱明勇, 张克荣, 等. 植物对水淹胁迫的响应与适应[J]. *生态学杂志*, 2009, 28 (9): 1871–1877.
- [36] 梁行行, 陈爽, 赵冰, 等. 7 种灌木幼苗耐淹性比较研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35 (2): 61–67.
- [37] 甘美娜, 吴新旺, 简向阳, 等. 华南地区 7 种旱生园林灌木的耐淹性研究[J]. *广东园林*, 2017 (2): 58–64.
- [38] 王丽, 李瑞莲, 周仲华, 等. 植物抗涝性研究进展[J]. 2013, 27 (1): 75–79.
- [39] 李灿. 2020 年 5 种热带花灌木对旱涝胁迫的生理和形态响应及园林应用[J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2020, 35 (2): 318–323.