

应对气候变化的上海抗涝性园林树种选择

张德顺¹, 陈陆琪瑶¹, 罗静茹², 刘鸣³, 姚驰远¹

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 四川省国土空间规划院, 四川 成都 610036; 3. 德累斯顿工业大学, 塔兰特 01735)

摘要: 通过淹水模拟实验, 对上海25种常见园林树种的受害程度以及叶绿素、电导率、比叶质量、净光合速率、丙二醛含量、脯氨酸含量等7项指标进行测定, 确定待测树种抗涝性的优化链。结果表明: 可从光合作用水平上进行抗涝性初步预判, 优先考虑叶绿素、比叶质量和净光合速率指标; 依据抗涝性大小可将25种树种分为强抗涝型、较抗涝型、一般抗涝型和不抗涝型4种类型。

关键词: 园林植物; 抗涝性; 树种选择; 气候变化

中图分类号: TU986

文献标志码: A

Landscape Tree Selection for Waterlogging Resistance in Response to Climate Change in Shanghai

ZHANG Deshun¹, CHEN Luqiyao¹, LUO Jingru², LIU Ming³, YAO Chiyuan¹

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Sichuan Provincial Institute of Land and Space Planning, Chengdu 610036, China; 3. Dresden University of Technology, Tharandt 01735, Germany)

Abstract: Twenty-five popular landscape trees in Shanghai were selected and seven indicators of victimization, chlorophyll, electrical conductivity, specific leaf mass, net photosynthetic rate, malondialdehyde and proline content were measured in the flood simulation experiments. Then, the resistance spectrums of the 25 landscape trees were scheduled. Finally, a method for predicting the resistance of landscape trees via the level of photosynthesis was put forward, giving priority to chlorophyll, specific leaf mass and net photosynthetic rate indicators. According to the level of waterlogging resistance, 25 tree species were divided into four types: strong waterlogging resistance, relatively waterlogging resistance, general waterlogging

resistance and weak-waterlogging resistance.

Key words: landscape plants; waterlogging resistance; tree species selection; climate change

气候变暖背景下, 我国极端天气事件的发生变得更加频繁^[1]。20世纪90年代后, 夏季降水出现大幅增加趋势, 强降水频率上升导致长江中下游流域和东南沿海地区的洪涝和城市内涝事件也随之加重^[2-4]。

上海作为东部沿海城市, 地处长江入海口, 地势低洼, 夏季台风暴雨一直是城市面临的主要气象灾害之一^[5-7], 海平面的上升和地质沉降等不利因素的影响使城市内涝灾害愈演愈烈^[8]。城市内涝发生频率的增大和水涝时间的延长不仅给社会经济带来严重损失, 还对城市园林树木的健康生长造成潜在威胁。因此, 对上海园林树木进行抗涝性研究十分必要并具有实际意义。合理选择树种不仅可以降低园林树木的死亡率, 稳定城市景观风貌, 还能缓解由内涝灾害引起的城市生态安全问题, 提高生态系统服务功能^[9]。

为了解常见园林树种的抗涝能力, 国内外已有学者通过人工模拟淹水环境, 分析了胁迫过程中植株生物量、光合作用、气体交换、酶活性、激素含量等形态生理生态指标的变化, 得出树种耐淹性能、淹水胁迫的影响以及抵御淹水胁迫的有效途径, 相关研究涉及包括香樟(*Cinnamomum camphora*)、落羽杉(*Taxodium distichum*)、乌桕(*Triadica sebifera*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)和喜树(*Camptotheca acuminata*)等在内的数十种园林绿化树种^[10-21]。然而, 关于园林树种抗涝性的研究大多关注少数物种

收稿日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(31770747, 32071824)

第一作者: 张德顺(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 农学博士, 主要研究方向为园林植物设计与生态规划。

E-mail: zds@tongji.edu.cn

通信作者: 姚驰远(1990—), 女, 理学博士, 主要研究方向为城市生态、绿地健康与园林植物应用。

E-mail: cyyao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

的部分生理过程,不能全面提供与树木生长息息相关的各项因子的实证性数据分析,更缺少关于园林树种适应性选择的机制探讨,无法对城市绿地规划做出正确的树种选择。

以上海市25种常见园林树种为研究对象,以适应未来气候变化的抗涝性筛选为目标,通过淹水胁迫实验对各树种做出客观可信的抗涝性评价,为抗涝性园林树种的筛选及绿地生态系统韧性提升提供参考依据。

1 实验地点

实验地点位于上海市奉贤区的上海市园林科学规划研究院邬桥实验基地内。基地地势平坦,平均海拔4.0~4.5 m。年均气温17.6℃,最热月平均气温28.1℃,最冷月平均气温-2.1℃。年均降雨日117 d,年均降雨量1 106.5 mm。

2 实验对象

选择25种上海市常用园林树种作为研究对象,其中常绿树种6种,落叶树种19种,如表1所示。

3 实验方法

2015年3月起在同一环境条件下培育盆栽1年生实生苗,至9月进行淹水模拟实验,分为淹水组和对照组进行。淹水组随机选取每种3株带盆一起放入大塑料桶中,然后进行淹水胁迫,淹水高度至离土面15 cm处止。分别于7、14、21、28、35 d测定实验苗的受害程度以及叶绿素、电导率、比叶质量、净光

合速率、丙二醛含量、脯氨酸含量等7项指标,每次测定均使用当日采集的鲜叶或直接进行活体测定,重复3次。对照组则正常培育,数据测定方法同淹水组。

在淹水胁迫下,植物形态结构、高生长和生物量积累变化明显,光合作用、酶促防御系统、呼吸代谢等生理反应也有相应的变化^[10]。采用变异系数衡量受淹水胁迫后各变量的波动变化,变异系数越高,表明植物对淹水逆境的不适反应越敏感、越剧烈,反之,则表明植物能快速适应。变异系数计算式如下所示:

$$\alpha_{cv} = \frac{\sigma_{sd}}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中: α_{cv} 为变异系数; σ_{sd} 为标准差; \bar{x} 为均值。

3.1 受害程度

叶片受害程度根据7级评价标准对不同时间节点的苗木做出评价(见表2)。植物对涝害胁迫的响应是动态变化的,IV和V是处在临界状态中的2个等级,后者受淹程度更严重。

受涝害指数Z计算式如下所示:

$$Z = \sum_{i=1}^n R_i \frac{A_i}{A} \quad (2)$$

式中:Z为受涝害指数(WI); R_i 为受淹级数; A_i 为各等级受淹株数;A为调查总株数。

3.2 叶绿素(chlorophyll, CHL)测定

使用SPAD-502PLUS叶绿素荧光测定仪进行现场测定,每次均选择第5、6个叶位的叶片,避开叶脉,多次测定后取平均值。

3.3 电导率(electrical conductivity, EC)测定

采集相同叶位的新鲜叶片用纯水洗净后吸干水分,再用直径0.6 cm的打孔器打出无叶脉的叶圆片

表1 抗涝性测定树种名录

Tab. 1 List of tree species tested for waterlogging resistance

序号	树种	学名	序号	树种	学名
1	香樟	<i>Cinnamomum camphora</i>	14	乌桕	<i>Triadica sebifera</i>
2	香泡	<i>Citrus medica</i>	15	紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i>
3	桂花	<i>Osmanthus fragrans</i>	16	朴树	<i>Celtis sinensis</i>
4	女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	17	榆树	<i>Ulmus pumila</i>
5	南方红豆杉	<i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	18	'金色普林斯顿'挪威槭	<i>Acer platanoides</i> 'Princeton Gold'
6	广玉兰	<i>Magnolia grandiflora</i>	19	金丝楸	<i>Catalpa bungei</i> 'Jinsi'
7	英国悬铃木	<i>Platanus acerifolia</i>	20	碧桃	<i>Amygdalus persica</i> 'Duplex'
8	落羽杉	<i>Taxodium distichum</i>	21	无患子	<i>Sapindus saponaria</i>
9	垂柳	<i>Salix babylonica</i>	22	复羽叶栎树	<i>Koelreuteria bipinnata</i>
10	木瓜	<i>Chaenomeles sinensis</i>	23	香椿	<i>Toona sinensis</i>
11	绚丽海棠	<i>Malus</i> 'Radiant'	24	银杏	<i>Ginkgo biloba</i>
12	白蜡	<i>Fraxinus chinensis</i>	25	金枝槐	<i>Sophora japonica</i> 'Golden Stem'
13	光皮徕木	<i>Cornus wilsoniana</i>			

表2 受淹级数的评价标准说明

Tab. 2 Description of evaluation criteria for flooded series

受淹级数	评价标准说明
I	出现受涝症状叶片数小于总叶片数的10%
II	出现受涝症状叶片数占总叶片数的10%~20%
III	出现受涝症状叶片数占总叶片数的21%~40%
IV	出现受涝症状叶片数占总叶片数的41%~80%
V	受涝脱落叶片数小于总叶片数的25%
VI	受涝脱落叶片数占总叶片数的25%~50%
VII	受涝脱落叶片数大于总叶片数的50%

10片,放入容量10 mL的洁净试管中,加入6 mL纯水,浸没样本25 min,充分摇匀后使用DDS-IIA直读电导仪测定溶液电导率 S_1 。封口后进行沸水浴15 min,冷却静置至室温,充分摇匀后测煮沸电导率 S_2 。计算相对电导率,即 S_2/S_1 的值。

3.4 比叶质量(specific leaf mass,SLM)测定

采集同一叶位的新鲜叶片2~3片,通过描形计算叶面积 $a(\text{cm}^2)$,再使用电子天平测定叶片质量 $w(\text{g})$,则比叶质量为 w/a 的值($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)即为单位面积的叶片质量。

3.5 净光合速率(net photosynthetic rate,Pn)测定

使用Licor-6400型光合作用仪进行净光合速率的测定。于晴朗无风日在09:00~12:00进行测定,气温为27~35℃,CO₂体积分数设定为400 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$,光通量密度设定为800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,选取第5、6个叶序的功能叶,测定净光合速率。

3.6 丙二醛(malondialdehyde,MDA)测定

用纯水洗净叶片并吸干水分,称取剪碎的试材1 g,加入2 mL质量分数为10%的三氯乙酸溶液(TCA)和少量石英砂,研磨至匀浆,再加8 mL TCA进一步研磨,匀浆在转速4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、温度4℃的离心机中离心10 min,上清液为样品提取液。在2 mL上清液(对照组中加2 mL蒸馏水)中加入2 mL质量分数为0.6%的硫代巴比妥酸溶液(TBA),混合物于沸水浴上反应15 min,冷却后再次离心。取上清液测定532、600、450 nm波长下的消光度 D ,丙二醛的含量 M_{MDA} ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)可由下式得出:

$$M_{\text{MDA}} = (6.452(D_{532} - D_{600}) - 0.559D_{450}) \frac{V_T}{V_S w} \quad (3)$$

式中: V_T 为提取液总体积,mL; V_S 为测定用提取液体积,mL; w 为样品鲜重,g。

3.7 脯氨酸(proline,Pro)测定

首先制作脯氨酸标准曲线,然后测定样品。采集同一叶位的叶片用纯水洗净并吸干水分,称取0.5 g叶片并剪碎,置于容量为10 mL的试管中,将5

mL质量分数为3%的磺基水杨酸溶液加入试管中,沸水浴10 min,冷却后过滤于干净的试管中,得到提取液。吸取2 mL提取液于带塞试管中,加入2 mL冰醋酸和2 mL质量分数为2.5%的酸性茚三酮试剂,进行30 min沸水浴后得到红色溶液。冷却后加入4 mL甲苯并充分振荡,静置片刻,取上清液至容量为10 mL的离心管中,在4℃转速为4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的离心机中离心5 min。吸取离心后的上清液置于比色杯中,以甲苯溶液为空白对照,测定520 nm波长处的吸光度值,再在标准曲线中查得脯氨酸含量。叶片中脯氨酸含量 M_{PRO} ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)计算式如下所示:

$$M_{\text{PRO}} = P \frac{V_T}{V_S w} \quad (4)$$

式中: P 为脯氨酸质量, μg 。

4 结果与分析

4.1 各变量的种间差异性分析

4.1.1 形态差异性分析

淹水胁迫下,植物形态会发生适应性变化,树木受到淹水胁迫后引起的形态变化主要表现为:顶芽坏死或新叶形成受阻;叶片变黄,出现渍斑,叶缘枯焦直至叶片失水;叶片由茎基部开始逐渐变黄、坏死并脱落;植株生长缓慢甚至停滞;茎基部皮孔增大,生成有利于吸收氧气的不定根^[11]。

按形态变化的变异系数可以较清晰地反映各种种对淹水胁迫的响应程度(见图1)。在整个淹水过程中,落羽杉、香泡和垂柳3种树种在形态上几乎未发生变化,表现出较强的抗涝性。落羽杉不断萌发新叶,叶片数量变多,垂柳在淹水21 d后开始出现大量不定根。

香樟、木瓜、紫薇、白蜡、绚丽海棠、光皮辣木、英国悬铃木和桂花在淹水14 d后,不再形成新叶,部分顶芽坏死,淹水30 d后叶片变色,其中白蜡在淹水7 d后茎基部就开始出现皮孔,光皮辣木和香樟前期生长良好,后期部分叶片出现红色斑点。南方红豆杉、榆树、广玉兰和香椿在淹水21 d天后出现大规模叶片变色萎蔫并脱落的现象,深淹水平下的植株变化更为明显。银杏、乌桕、朴树、金丝楸、女贞和碧桃在淹水7 d后开始出现适应性变化,后期出现整个植株叶片全部变黄、枯焦或脱落的情况,28 d后出现部分植株死亡现象,35 d后受涝植株大量死亡。复羽叶栎树、无患子、金枝槐和‘金色普林斯顿’挪威槭等在淹水7 d时叶片就出现受涝害症状,叶片变色,出现渍斑,淹水

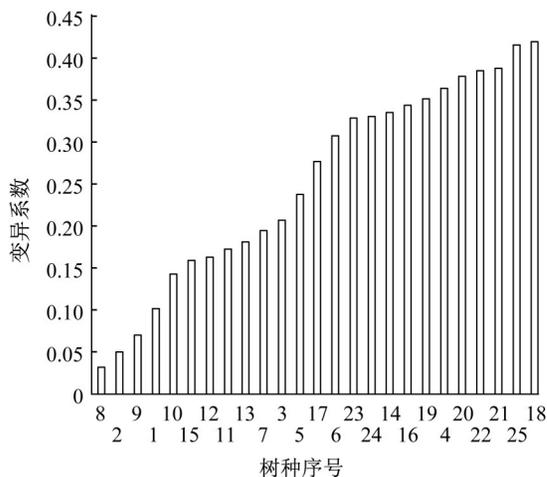


图 1 淹水胁迫下树种间形态变化的变异系数

Fig. 1 Variation coefficient of morphology among trees under flooding stress

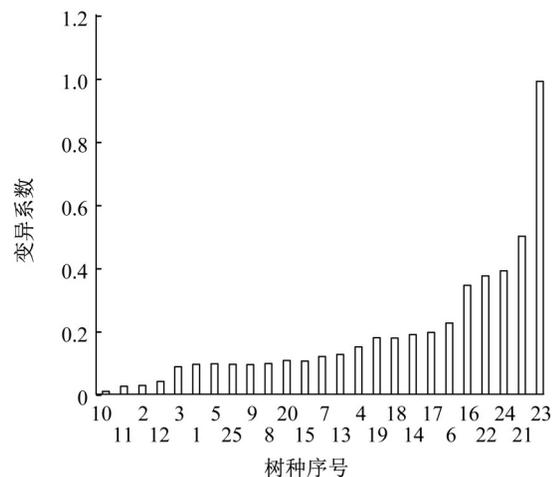


图 2 淹水胁迫下树种间叶绿素变异系数

Fig. 2 Variation coefficient of chlorophyll among trees under flooding stress

21 d后叶片开始大量脱落并出现部分植株死亡。

4.1.2 叶绿素差异性分析

植物在淹水胁迫下,由于根系缺氧限制了有氧呼吸和叶片光合作用,与光合作用相关的酶活性受到影响,加之根系活力降低阻碍矿物质吸收,造成叶片营养不良,导致叶绿素合成能力下降,叶片变色,叶绿素含量减少,因此叶绿素含量可以在一定程度上反映植物的抗涝能力。

由图 2 可知,木瓜、绚丽海棠、香泡和白蜡在整个淹水过程中叶绿素含量无明显变化;桂花、香樟、南方红豆杉、金枝槐、垂柳、落羽杉、碧桃、紫薇、英国悬铃木、光皮楸木和女贞的叶片叶绿素含量呈缓慢下降趋势,其中碧桃在 14 d 后就开始出现叶片变黄掉落症状;金丝楸、‘金色普林斯顿’挪威槭、乌桕、榆树和广玉兰在淹水前 2 周叶绿素含量呈下降趋势,而后叶绿素含量或上升或持平,最终达到稳定,28 d 后叶子开始脱水枯焦;朴树、复羽叶栎树、银杏、无患子和香椿的叶片叶绿素含量急剧下降,叶片逐渐变黄、枯焦直至脱落。

4.1.3 电导率差异性分析

植物在淹水胁迫下导致植物细胞膜脂过氧化,改变细胞质膜透性,通常表现为选择透性丧失,电解质和某些小分子有机物的大量渗漏。受涝伤害越大,植物细胞质膜透性越大,细胞外渗物越多,电导率越高,因此可以通过电导率来评价植物细胞膜的伤害程度。

白蜡、光皮楸木、朴树和英国悬铃木的电导率随淹水时间呈现较少的波动,具有较高的适应性。金丝楸、榆树、木瓜、南方红豆杉和落羽杉等 10 种树种

的电导率在整个淹水过程中有一定波动,表现出较强的抗涝性。垂柳、绚丽海棠、复羽叶栎树、碧桃和‘金色普林斯顿’挪威槭等 10 种树种波动较大;银杏的波动最大,表现出低抗涝性。淹水胁迫下的树种间电导率变异系数如图 3 所示。

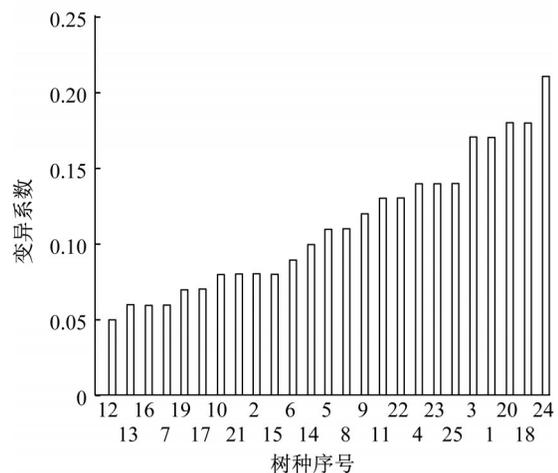


图 3 淹水胁迫下树种间电导率变异系数

Fig. 3 Variation coefficient of electrical conductivity among trees under flooding stress

4.1.4 比叶质量差异性分析

植物受到淹水胁迫后,由于光合作用受阻,生长速率减慢,生物量累积减少,同时由于根系缺氧影响水分吸收导致叶片含水量减少,因此一些树种的叶片单位面积质量减少,叶片变薄变轻。

大部分树种的比叶质量均较高,表明淹水胁迫下,植物均处于消耗状态。落羽杉、垂柳和白蜡表现

出了良好的适应性。香椿、银杏、无患子、南方红豆杉、榆树等受涝害较为严重。淹水胁迫下的树种间比叶质量变异系数如图 4 所示。

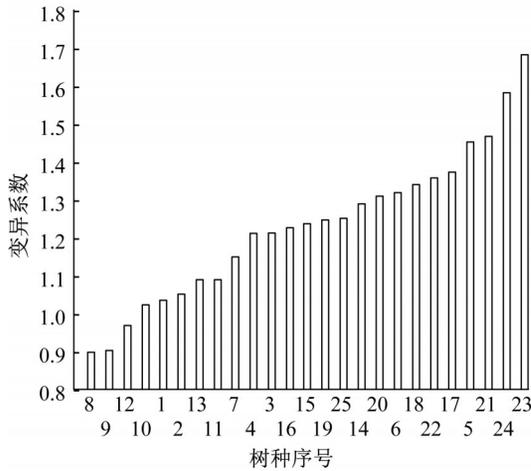


图 4 淹水胁迫下树种间比叶质量变异系数

Fig. 4 Variation coefficient of specific leaf mass among trees under flooding stress

4.1.5 净光合速率差异性分析

植物受到淹水胁迫后,高生长受到明显的抑制,净光合速率、气孔导度显著下降,胞间CO₂体积分数则随着胁迫时间的持续逐渐升高^[12]。严重淹水使植物因无法有效光合而处于长期饥饿状态,最终造成植株死亡。

淹水 35 d 时,受影响较小的有英国悬铃木、香泡、榆树、朴树、光皮徕木、绚丽海棠和木瓜,其次是香椿、紫薇、香樟、无患子和‘金色普林斯顿’挪威槭等 14 种树种,受影响较大的有银杏、金丝楸、碧桃和复羽叶栎树。淹水胁迫下的树种间净光合速率变异系数如图 5 所示。

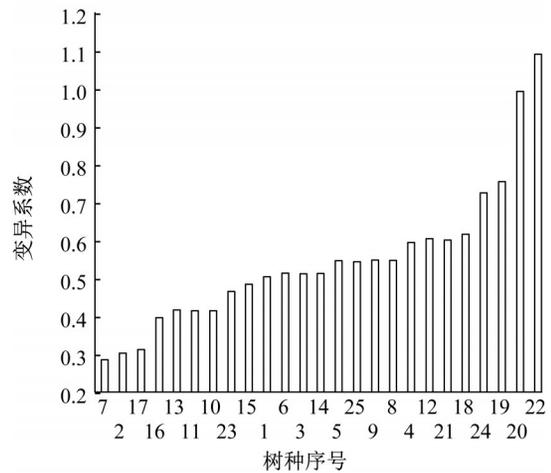


图 5 淹水胁迫下树种间净光合速率变异系数

Fig. 5 Variation coefficient of net photosynthetic rate among trees under flooding stress

4.1.6 丙二醛含量差异性分析

植物在逆境下遭受伤害时,通常会发生过氧化作用,丙二醛是膜脂过氧化作用的最终分解产物,丙二醛含量可以从抗氧化的角度反映植物遭受逆境伤害的程度。

如图 6 所示,丙二醛含量与对照组相比无明显差异的有紫薇、光皮徕木、绚丽海棠、无患子和垂柳等,表明这些树具有一定的抗涝性;丙二醛含量明显高于对照组的有榆树、‘金色普林斯顿’挪威槭、金枝槐和桂花等。

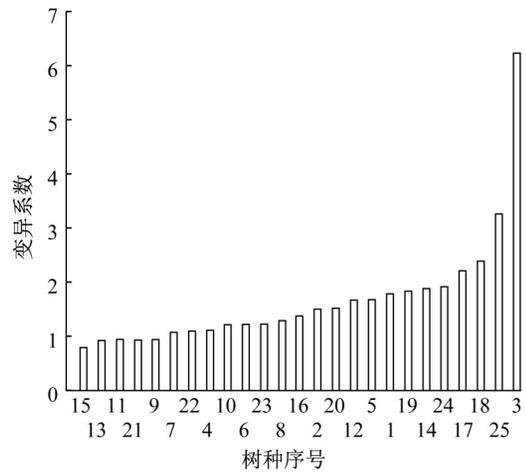


图 6 淹水胁迫下树种间丙二醛含量变异系数

Fig. 6 Variation coefficient of malondialdehyde content among trees under flooding stress

4.1.7 脯氨酸含量差异性分析

在淹水胁迫下,植物的根系活力下降导致植株缺水。脯氨酸是植物体内的一种渗透调节物质,逆

境条件下植物体内的脯氨酸含量会增加。因此,植物体内的脯氨酸含量在一定程度上可以反映植株体内的水分情况,是植物缺水情况的生理指标之一。

图 7 为淹水胁迫下的树种间脯氨酸含量变异系数。由图 7 可知,脯氨酸含量最高是银杏,其次是绚丽海棠、女贞和广玉兰,含量变化相对较小的是复羽叶栎树、榆树和香樟。

4.2 各变量之间相关性分析

变量之间相关性如表 3 所示。由表 3 可知,受涝害指数与叶绿素、比叶质量、净光合速率之间成显著负相关关系,与脯氨酸含量成显著正相关;净光合速率与叶绿素、比叶质量显著正相关,与脯氨酸含量显著负相关;丙二醛含量与其他变量均不相关。因此,通过叶绿素、比叶质量、净光合速率和脯氨酸含量 4

个变量可以有效推断植物受涝害情况。

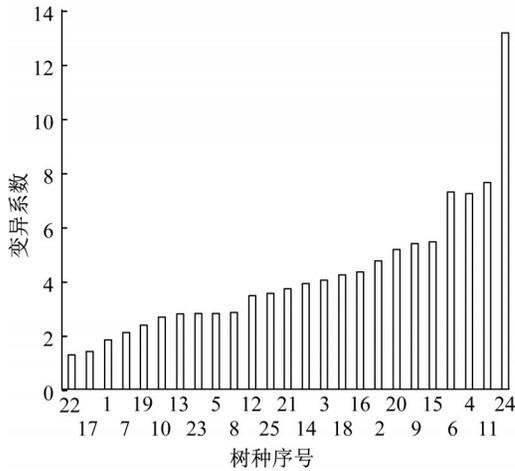


图7 淹水胁迫下树种间脯氨酸含量变异系数

Fig. 7 Variation coefficient of proline content among trees under flooding stress

4.3 主成分分析

对各变量进行主成分分析($\alpha_{KMO} = 0.735, p < 0.01$),最终选择3个特征值 $\lambda > 1$ 的公因子作为主成分,累积贡献率达到81.19%,基本概括了6个抗涝性状的主要相关信息。主成分总方差解释如表4所示。

旋转后的主成分矩阵如表5所示。由表5可知:第一主成分关联度较高的因子有受涝害指数、叶绿素、比叶质量与净光合速率,都直接与光合代谢作用有关,因此将公因子命名为树木光合因子;第二主成分中的电导率和脯氨酸含量与植物细胞质的渗透调节相关,可命名为树木渗透调节因子;第三个公因子与丙二醛含量关联度很高,丙二醛含量代表着植物细胞膜质的过氧化程度,可将第三个公因子命名为树木抗氧化因子。

表3 各变量相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of variables

变量	受涝害指数	叶绿素	电导率	比叶质量	净光合速率	丙二醛含量
叶绿素	-0.677**					
电导率	-0.246	-0.004				
比叶质量	-0.830**	0.671**	0.382			
净光合速率	-0.684**	0.546**	0.172	0.609**		
丙二醛含量	0.242	-0.068	-0.150	-0.149	-0.131	
脯氨酸含量	0.417*	-0.324	-0.418*	-0.535**	-0.464*	0.059

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

表4 主成分总方差解释

Tab. 4 Total variance of principal components

成分	提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积贡献率/%	总计	方差百分比/%	累积贡献率/%
1	3.475	49.644	49.644	3.095	44.209	44.209
2	1.230	17.573	67.218	1.550	22.139	66.348
3	0.978	13.972	81.190	1.039	14.843	81.190

表5 主成分分析旋转后的负荷矩阵

Tab. 5 Load matrix of principal component analysis after rotation

变量	主成分1	主成分2	主成分3
受涝害指数	-0.884	-0.167	0.194
叶绿素	0.891	-0.152	0.034
比叶质量	0.828	0.386	-0.072
净光合速率	0.783	0.209	-0.043
电导率	-0.016	0.921	-0.148
脯氨酸含量	-0.458	-0.674	-0.117
丙二醛含量	-0.100	-0.056	0.979

根据树种因子综合得分(见表6)可将25种树种抗涝性划分为4级:强抗涝型(I级)2种,较抗涝型(II级)8种,一般抗涝型(III级)6种,不抗涝型(IV级)9种。该结论与部分树种的抗涝性研究文献结论

基本一致。例如,香樟具有较强的抗涝性^[13],落羽杉在抗涝性方面高于乌桕^[14],但乌桕则要强于复羽叶栎树^[15],绚丽海棠具有一定的耐淹水能力^[16]等。这说明本实验得出的树种抗涝性排序相对可靠。

表6 各树种抗涝性综合评价

Tab. 6 Comprehensive evaluation of waterlogging resistance of various trees

树种	光合因子	渗透调节因子	抗氧化因子	因子综合得分	排名	抗涝性等级
落羽杉	6.981	1.148	-0.079	4.100	1	I
垂柳	6.405	-0.858	-0.273	3.204	2	I
木瓜	3.958	0.577	1.008	2.497	3	II
香泡	3.163	1.081	-0.985	1.837	4	II
香樟	3.136	0.034	0.383	1.787	5	II
绚丽海棠	3.138	0.718	-0.878	1.744	6	II
白蜡	3.197	-0.458	0.267	1.665	7	II
光皮徕木	3.423	-1.540	-0.417	1.368	8	II
英国悬铃木	1.818	0.122	-0.130	0.999	9	II
乌桕	1.425	-1.596	1.813	0.672	10	II
紫薇	1.257	-0.380	-0.576	0.476	11	III
桂花	-0.585	1.201	1.428	0.270	12	III
朴树	-1.593	0.083	1.525	-0.566	13	III
女贞	-0.901	-0.227	-0.375	-0.621	14	III
榆树	-1.381	0.619	-0.336	-0.645	15	III
南方红豆杉	-1.149	0.439	-0.786	-0.650	16	III
‘金色普林斯顿’挪威槭	-3.219	2.925	-0.302	-1.011	17	IV
金丝楸	-3.209	-0.442	2.413	-1.427	18	IV
广玉兰	-2.809	0.568	-1.187	-1.591	19	IV
碧桃	-2.891	0.134	-0.962	-1.713	20	IV
无患子	-3.267	-1.092	-0.306	-2.133	21	IV
复羽叶栾树	-3.539	-0.486	-0.650	-2.178	22	IV
香椿	-2.548	-3.365	-1.030	-2.493	23	IV
银杏	-5.948	1.060	0.293	-2.896	24	IV
金枝槐	-6.040	1.412	-0.673	-3.027	25	IV

5 结论

对各变量与因子综合得分进行相关分析发现,比叶质量和受涝害指数的相关系数最高,净光合速率、叶绿素与脯氨酸含量次之,电导率和丙二醛含量不相关。因此,在对树木抗涝性进行预判时,可以优先考虑与光合作用直接相关的叶绿素、比叶质量与净光合速率。

根据受涝害指数、叶绿素、电导率、比叶质量、净光合速率、丙二醛含量、脯氨酸含量等与植物涝害相关的指标,对25种上海常用园林树种进行抗涝性排序,依据抗涝性大小分为强抗涝型、较抗涝型、一般抗涝型和不抗涝型4个等级,其中落羽杉和垂柳抗涝性最强。

作者贡献声明:

张德顺:研究计划制定,论文撰写。

陈陆琪瑶:论文完善,插图绘制。

罗静茹:研究实施,初稿编写。

刘 鸣:研究辅助实施。

姚驰远:论文优化、修改和提升。

参考文献:

- [1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3.
DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, *et al.* National assessment report on climate change (I): history and future trends of climate change in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3.
- [2] 贺芳芳,徐家良. 20世纪90年代以来上海地区降水资源变化研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 210.
HE Fangfang, XU Jialiang. Study on the change of precipitation resources in Shanghai since 1990s [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(4): 210.
- [3] 李巧萍,丁一汇,董文杰. SRES A2情景下未来30年我国东部夏季降水变化趋势[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 770.
LI Qiaoping, DING Yihui, DONG Wenjie. Variation trend of summer precipitation in eastern China in the next 30 years under SRES A2 scenario [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(6): 770.
- [4] 江志红,李杨. 中国东部不同区域城市化对降水变化影响的对比研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(4): 601.
JIANG Zhihong, LI Yang. Comparative study on impact of urbanization on precipitation change in different regions of eastern China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(4): 601.

- [5] 房国良,高原,徐连军,等.上海市降雨变化与灾害性降雨特征分析[J].长江流域资源与环境,2012,21(10):1270.
FANG Guoliang, GAO Yuan, XU Lianjun, *et al.* Analysis of rainfall variation and catastrophic rainfall characteristics in Shanghai [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1270.
- [6] 陆敏,刘敏,权瑞松,等.上海暴雨灾害的系统特征与脆弱性分析[J].华东师范大学学报:自然科学版,2010(2):9.
LU Min, LIU Min, QUAN Ruisong, *et al.* Systematic characteristics and vulnerability analysis of rainstorm disaster in Shanghai [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2010(2): 9.
- [7] 梁萍,丁一汇,何金海,等.上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究[J].热带气象学报,2011,27(4):475.
LIANG Ping, DING Yihui, HE Jinhai, *et al.* Study on the relationship between urbanization rate and spatial distribution of precipitation in Shanghai [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(4): 475.
- [8] 王寒梅,焦珣.海平面上升影响下的上海地面沉降防治策略[J].气候变化研究进展,2015,11(4):256.
WANG Hanmei, JIAO Xun. Shanghai's land subsidence prevention strategy under the influence of sea level rise [J]. Advances in Climate Change Research, 2015, 11(4): 256.
- [9] 韩玉洁,孙海菁,朱春玲,等.上海沿海防护林树种适应性评价[J].南京林业大学学报:自然科学版,2010,34(4):165.
HAN Yujie, SUN Haijing, ZHU Chunling, *et al.* Adaptability evaluation of tree species in Shanghai coastal shelter forest [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2010, 34(4): 165.
- [10] 卓仁英,陈益泰.木本植物抗涝性研究进展[J].林业科学研究,2001,14(2):215.
ZHUO Renying, CHEN Yitai. Research progress on waterlogging resistance of woody plants [J]. Forestry Research, 2001, 14(2): 215.
- [11] 衣英华,樊大勇,谢宗强,等.模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响[J].植物生态学报,2006,30(6):960.
YI Yinghua, FAN Dayong, XIE Zongqiang, *et al.* Effects of simulated flooding on gas exchange, chlorophyll fluorescence and water potential of *Liquidambar formosana* and *Quercus variabilis* [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6): 960.
- [12] 曹福亮,蔡金峰,汪贵斌,等.淹水胁迫对乌桕生长及光合作用的影响[J].林业科学,2010,46(10):57.
CAO Fuliang, CAI Jinfeng, WANG Guibin, *et al.* Effects of flooding stress on growth and photosynthesis of *Sapium sebiferum* [J]. Forestry Science, 2010, 46(10): 57.
- [13] 黄香兰,郭淑红,薛立,等.淹水胁迫对华南地区3种园林树种生理特征的影响[J].中国农学通报,2012,28(13):24.
HUANG Xianglan, GUO Shuhong, XUE Li, *et al.* Effects of water flooding stress on physiological characteristics of three garden tree species in South China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(13): 24.
- [14] 汪贵斌,曹福亮,张晓燕,等.涝渍胁迫对不同树种生长和能量代谢酶活性的影响[J].应用生态学报,2010,21(3):590.
WANG Guibin, CAO Fuliang, ZHANG Xiaoyan, *et al.* Effects of waterlogging stress on growth and energy metabolism enzyme activity of different tree species [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 590.
- [15] 杨东,万福绪,李盟.水盐胁迫对上海4个防护林树种生长和生理特性的影响[J].水土保持研究,2014,21(1):254.
YANG Dong, WAN Fuxu, LI Meng. Effects of water and salt stress on growth and physiological characteristics of four shelter forest tree species in Shanghai [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 254.
- [16] 张虎,曹福亮,范俊俊,等.淹水胁迫对湖北海棠生长及叶绿素荧光动力学的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2018,42(1):35.
ZHANG Hu, CAO Fuliang, FAN Junjun, *et al.* Effects of flooding stress on growth and chlorophyll fluorescence kinetics of *Malus hupehensis* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2018, 42(1): 35.
- [17] 潘向艳,季孔庶,方彦.淹水胁迫下杂交鹅掌楸无性系叶片内源激素含量的变化[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(1):29.
PAN Xiangyan, JI Kongshu, FANG Yan. Changes of endogenous hormone content in leaves of hybrid *Liriodendron chinense* clones under flooding stress [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2008, 32(1): 29.
- [18] IRFAN M, HAYAT S, HAYAT Q, *et al.* Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging [J]. Protoplasma, 2010, 241(1): 3.
- [19] AHMED S, NAWATA E, HOSOKAWA M, *et al.* Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activities of mungbean subjected to waterlogging [J]. Plant Science, 2002, 163(1): 117.
- [20] 蔡金峰,曹福亮,张往祥.淹水胁迫对乌桕幼苗生长及根系无氧呼吸酶活性的影响[J].中南林业科技大学学报,2013,33(9):5.
CAI Jinfeng, CAO Fuliang, ZHANG Wangxiang. Effects of waterlogging stress on *Sapium sebiferum* seedling growth and activity of anaerobic respiration enzymes in roots [J]. Journal of Central South Forestry University of Science and Technology, 2013, 33(9): 5.
- [21] 汪贵斌,曹福亮,王媛.涝渍对3个树种生长、组织孔隙度和渗漏氧的影响[J].植物生态学报,2012,36(9):982.
WANG Guibin, CAO Fuliang, WANG Yuan. Effects of waterlogging on growth, tissue porosity and oxygen leakage of three tree species [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(9): 982.