

16种园林植物对水淹胁迫的生理响应比较

Comparative Analysis of Physiological Responses in 16 Landscape Plant Species under Waterlogging Stress

郭胜涛

GUO Shengtao

基金项目: 山西省地方标准制修订项目“海绵城市绿地建植技术规范”(编号: 2023-08363)

摘要

为科学筛选适用于山西海绵城市绿地建设的耐涝植物资源,以16种山西省常见园林植物为对象,开展可控水淹胁迫试验,系统监测了叶片游离脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)含量和相对电导率的动态变化,运用隶属函数法进行综合评价。结合各植物在试验期间的形态表现(如叶片黄化、萎蔫、脱落等)与隶属函数评价结果,将供试植物耐涝性划分为3类:耐涝性较强的常绿乔木有白皮松 *Pinus bungeana*、圆柏 *Juniperus chinensis*、油松 *Pinus tabulaeformis*、侧柏 *Platycladus orientalis*,落叶乔木有槐 *Styphnolobium japonicum*、新疆杨 *Populus alba* var. *pyramidalis*、白蜡树 *Fraxinus chinensis*;耐涝性中等的落叶乔木有银杏 *Ginkgo biloba*、栎 *Koelreuteria paniculata*、五角槭 *Acer pictum* subsp. *mono*、旱柳 *Salix matsudana*,落叶灌木有水栒子 *Cotoneaster multiflorus*、金银忍冬 *Lonicera maackii*;耐涝性弱的落叶乔木有碧桃 *Prunus persica* ‘Duplex’,落叶灌木有紫丁香 *Syringa oblata*、连翘 *Forsythia suspensa*。

Abstract

To scientifically identify waterlogging-tolerant plant species for sponge city green infrastructure in Shanxi Province, a controlled waterlogging experiment was conducted on 16 common landscape plant species in Shanxi. The dynamic changes in key physiological indices—free proline (Pro) and malondialdehyde (MDA) content, along with relative electrical conductivity in leaves—were systematically monitored, and a comprehensive evaluation was performed using the membership function method. Based on the morphological performance of each plant during the experiment (such as leaf yellowing, wilting, shedding) and the results of the subordinate function evaluation, the waterlogging tolerance of the tested plants was classified into three categories. High tolerance: evergreen trees include *Pinus bungeana*, *Juniperus chinensis*, *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis*; deciduous trees include *Styphnolobium japonicum*, *Populus alba* var. *pyramidalis*, and *Fraxinus chinensis*. Moderate tolerance: deciduous trees include *Ginkgo biloba*, *Koelreuteria paniculata*, *Acer pictum* subsp. *mono*, and *Salix matsudana*; deciduous shrubs include *Cotoneaster multiflorus* and *Lonicera maackii*. Low tolerance: deciduous trees include *Prunus persica* ‘Duplex’; deciduous shrubs include *Syringa oblata* and *Forsythia suspensa*.

文章亮点

1) 通过动态监测3项关键生理指标并结合隶属函数综合评价,系统比较了16种园林植物的耐涝能力,构建了多指标动态评价体系。2) 研究发现渗透调节与膜系统稳定性是评价植物耐涝性的关键生理依据,并将植物划分为较强、中等、弱3个耐涝等级。3) 提出植物耐涝性需区分“短期生理耐受”与“长期生态适应”,为海绵城市绿地植物配置提供了理论与实践依据。

关键词

园林植物; 水淹胁迫; 生理响应;
耐涝性; 海绵城市

Keywords

Landscape plants; Waterlogging stress; Physiological response;
Waterlogging tolerance; Sponge city

收稿日期: 2025-10-10

修回日期: 2025-12-09

山西省为温带大陆性季风气候, 各地市年降水量约 400~650 mm, 降水季节分布不均, 多集中于 6—8 月, 且占年降雨量的 60% 左右^[1]。近年来, 全省连年遭遇超长汛期, 异常偏多的降雨导致城市内涝问题日益凸显。为保障城市水安全, 有效缓解内涝灾害, 促进雨水的自然积存与渗透, 山西省正系统化全域推进海绵城市建设, 各地市相继建设了一批海绵城市绿地, 如雨水花园、下沉式绿地及生物滞留设施等。此类绿地的核心功能在于临时蓄滞与净化雨水, 其内部植物生境易遭受周期性或突发性水淹胁迫^[2-3]。因此, 筛选并合理应用耐涝性较强的植物种类, 是保障海绵城市绿地生态功能稳定与景观可持续的关键^[4]。

水淹胁迫是常见的非生物胁迫之一, 会导致土壤缺氧, 进而严重影响植物的正常生理代谢^[5]。研究表明, 水淹不仅会引起叶片黄化、脱落等形态症状, 还会引发一系列生理生化指标的显著变化^[5-6]。其中, 游离脯氨酸是重要的渗透调节物质, 其含量通常随胁迫加剧而累积; 丙二醛是膜脂过氧化的终产物, 其含量反映细胞膜受损程度; 相对电导率则直接指示细胞膜透性的变化^[5,7]。这些生理指标的变化为科学评价植物耐涝性提供了可靠依据。

不同植物因遗传特性、形态结构及代谢途径的差异, 对水淹胁迫的响应与耐受能力存在显著区别^[5,8]。目前, 国内外已有不少研究关注植物的耐涝性评价^[2,4,9-11], 但多数聚焦于草本植物或特定树种, 针对我国北方园林植物, 尤其是涵盖常绿乔木、落叶乔木及落叶灌木等多种生活型植物的系统性耐涝能力的比较研究仍较缺乏。此外, 现有研究多侧重于单一或少数生理指标, 缺乏多指标动态监测与综合评价体系的构建。因此, 本研究选取山西省常见的 16 种园林植物为研究对象, 通过可控水淹胁迫试验, 测定其游离脯氨酸、丙二醛含量及相对电导率的动态变化, 探究不同植物种类对水淹胁迫的生理响应规律, 综合评估 16 种园林植物的耐涝能力并进行分类。研究旨在为山西省及类似气候区海绵

城市绿地的植物选择与配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

研究选取槐、油松等 16 种山西省常见园林植物作为试验材料 (表 1)。供试植物均为生长健壮、规格一致的多年生实生苗, 培育于太原市园林质量植保站除害基地。2023 年春季, 将苗木移栽至口径 40 cm 的花盆中进行试验, 栽培基质为园土。

1.2 试验方法

试验于 2023 年 7 月至 8 月在太原市园林质量植保站除害基地苗圃进行。试验期间气温为 22~34℃、相对湿度为 35%~80% (数据来源于天气预报)。试验设置对照组 (CK) 与水淹胁迫组, 每组每种植物各 5 株, 设 3 次生物学重复。对照组适时适量浇水, 保持土壤湿度适宜, 以维持植株正常生长; 水淹胁迫组自 2023 年 7 月 20 日起, 将花盆整体浸没于水槽中, 保持水位高于土壤表面 5 cm。当水淹胁迫组中某植物出现 50% 以上的叶片严重黄化、萎蔫或脱落, 或茎干明显坏死时, 即

判定该植物达到耐涝极限, 停止处理并采集最终数据; 未达到终止标准的植物持续处理至 14 d 后采集最终数据。

试验依据罗祺^[7]、梁行行等^[8]的方法选取测定指标。水淹胁迫处理期间, 每 2 d 于上午 9:00—11:00 同步采集对照组与水淹胁迫组植物植株中上部的完全展开叶片, 每次采样 10 g 用于各项生理指标测定。游离脯氨酸 (Pro) 含量采用磺基水杨酸法提取、茚三酮比色法测定; 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法测定; 相对电导率使用直读电导率仪测定。

1.3 数据处理与统计分析

研究采用 SPSS 20.0 软件进行数据分析。首先进行方差齐性检验, 对不满足方差齐性的数据进行对数转换以符合正态分布; 采用单因素方差分析比较同一植物在不同胁迫时间下各生理指标的差异, 若检验结果显著 ($P<0.05$), 则进一步采用 Duncan 多重比较法进行分析; 采用独立样本 t 检验分析同一时间点下水淹胁迫组与对照组的差异。

接着参照方安等^[12]的方法采用隶属函数法对 16 种园林植物耐涝能力进

表 1 试验植物种类及规格

Tab.1 Experimental plant species and specifications

序号	植物种类	规格	类型
1	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>		
2	白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	苗高 ≥ 2.0 m, 地径 ≥ 3.0 cm	常绿乔木
3	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>		
4	圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>		
5	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	胸径 ≥ 4.0 cm, 分枝点 ≥ 2.0 m	
6	槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	胸径 ≥ 4.0 cm, 分枝点 ≥ 2.2 m	
7	碧桃 <i>Prunus persica</i> 'Duplex'	地径 ≥ 3.0 cm, 主干高 ≥ 0.5 m	
8	新疆杨 <i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i>		落叶乔木
9	旱柳 <i>Salix matsudana</i>		
10	栾 <i>Koelreuteria paniculata</i>	胸径 ≥ 4.0 cm, 分枝点 ≥ 2.2 m	
11	五角槭 <i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i>		
12	白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>		
13	水栒子 <i>Cotoneaster multiflorus</i>	苗高 ≥ 1.0 m, 主枝数 ≥ 4	
14	金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	苗高 ≥ 1.0 m, 主枝数 ≥ 5	落叶灌木
15	紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	苗高 ≥ 1.0 m, 主枝数 ≥ 3	
16	连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	苗高 ≥ 1.0 m, 主枝数 ≥ 3	

注: 本文裸子植物使用郑万钧系统, 被子植物使用 APG IV 系统。

行综合评价。隶属函数的计算公式如下：

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

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

式中 $U(X_{ij})$ 表示 i 种植物 j 指标耐涝能力隶属函数值, X_{ij} 表示 i 种植物 j 指标的测定值, $X_{j\min}$ 和 $X_{j\max}$ 表示各植物中 j 指标的最小值和最大值。当指标与耐涝性呈正相关时使用公式 (1) 计算, 反之使用公式 (2) 计算。

最后将每种植物各指标的隶属函数值进行累加求其平均数, 即综合评价函数值 D 值, D 值越高, 表明该种植物耐涝能力越强, 反之则耐涝能力越弱。研究根据 D 值排序, 并结合植物外部形态表现对 16 种植物进行耐涝等级划分。

2 结果与分析

2.1 不同园林植物生理生化指标变化

2.1.1 游离脯氨酸含量对水淹胁迫的响应

游离脯氨酸是重要的渗透调节物质, 其在植物体内的积累是应对逆境胁迫的典型生理反应。从试验结果 (表 2, 图 1) 可知, 水淹胁迫显著诱导了 16 种植物叶片中脯氨酸的积累, 但不同植物的响应动态与积累幅度存在明显差异, 反映出其耐涝能力的区别。

大多数植物 (如油松、银杏、新疆杨、水栒子等) 的脯氨酸含量随胁迫时间延长呈持续上升趋势, 并于胁迫后期 (10 d—14 d) 达到峰值。这表明在长期缺氧环境下, 这些植物可通过持续积累脯氨酸来维持细胞渗透平衡, 保护酶系统与膜结构, 具备积极的耐受机制。然而, 碧桃和连翘的响应模式显著不同, 其脯氨酸含量在胁迫中期 (碧桃 6 d, 连翘 8 d) 达到峰值后迅速下降, 且伴随植株死亡。这种“先升后降”的模式通常表明细胞的主动调节机制已被破坏, 脯氨酸合成能力衰竭, 是植物趋于衰亡的标志。

从不同生活型来看: 1) 4 种常绿乔木均表现出较强的

脯氨酸积累能力, 但动态特征各异。油松和侧柏的脯氨酸积累启动较晚但持续性强, 分别于胁迫 6 d 和 4 d 后开始显著高于对照, 表现出稳健的后期耐受力; 白皮松在胁迫 4 d 时含量显著上升, 且增幅最大 (从 $15.31 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 升至 $48.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 表现出快速且剧烈的应激反应。2) 不同树种的落叶乔木耐涝性差异在脯氨酸积累上表现最为明显。新疆杨和白蜡树的脯氨酸含量高且增长平稳, 显示出较强的胁迫缓冲能力; 槐和旱柳在胁迫中期 (6 d—8 d) 出现快速增长并较早接近峰值, 表现出较强的适应性及恢复潜力。与之相对, 碧桃的脯氨酸峰值最低且出现最早, 随后急剧下降, 是其耐涝性极差的直接生理证据。3) 落叶灌木中水栒子和金银忍冬的脯氨酸积累模式与耐涝性强的落叶乔木相似, 呈持续稳定增长, 表明其具备坚实的耐涝基础; 紫丁香和连翘的积累幅度较低, 且连翘在峰值后无法维持, 说明其耐涝性有限。

综上, 脯氨酸的积累动态不仅能有效区分植物的耐涝性强弱, 也可揭示其耐受规律: 持续、稳定的高水平积累是耐涝性强的标志; 而过早达到峰值并迅速下降, 则预示植物耐涝系统的崩溃。

2.1.2 丙二醛含量对水淹胁迫的响应

丙二醛是膜脂氧化的主要终产物, 其含量可有效反映细胞膜系统的受损程度。从试验结果 (表 3, 图 2) 可知, 水淹胁迫导致绝大多数植物叶片的丙二醛含量显著上升, 但不同树种的上升幅度、速率及变化趋势存在明显差异, 揭示出其细胞膜在水淹逆境下的稳定性与耐受力。

根据丙二醛的积累动态, 16 种植物可分为 2 类。第一类包括油松、白皮松、侧柏、圆柏、新疆杨、水栒子、金银忍冬等, 其丙二醛含量在整个胁迫期内呈持续缓慢上升趋势, 直至实验结束 (14 d) 才达到峰值。这表明尽管植物的膜系统持续受损, 但损伤进程相对缓慢, 其细胞膜仍保持较好的结构完整性与自我修复能力, 是耐涝性较强的表现。第二类

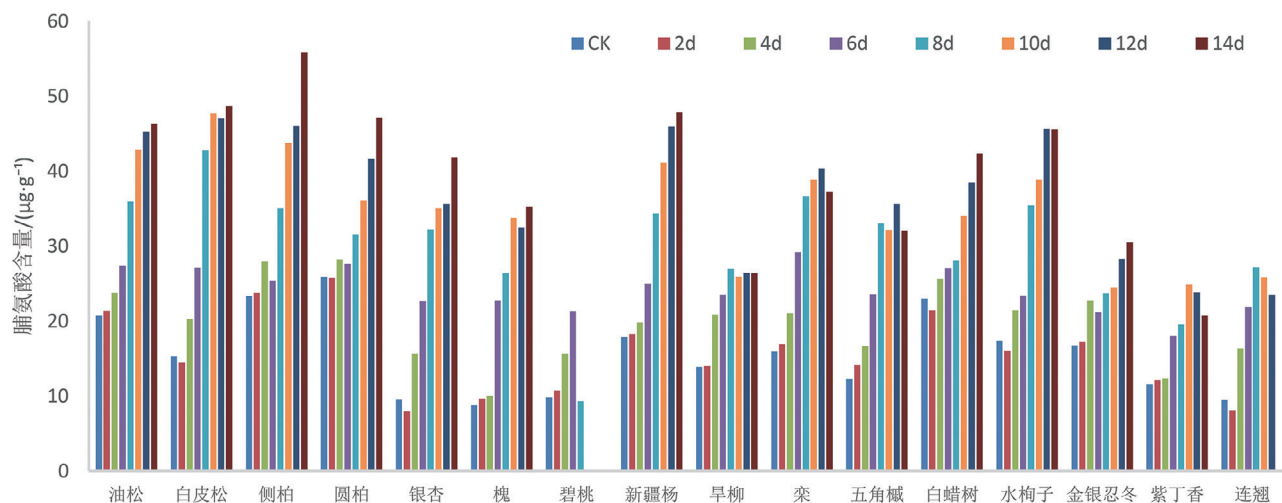


图1 水淹胁迫下 16 种园林植物脯氨酸含量的变化

Fig.1 Changes in proline content of 16 landscape plant species under waterlogging stress

表 2 16 种植物叶片脯氨酸含量的变化
Tab.2 Changes in proline content of 16 plant species

单位: $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

种类	CK	2d	4d	6d	8d	10d	12d	14d
油松	20.68±2.84d	21.36±0.80cd	23.69±1.19cd	27.31±3.33c	35.91±3.39b	42.85±4.89a	45.20±5.68a	46.26±5.92a
白皮松	15.31±2.45d	14.40±1.84d	20.27±0.83c	27.09±2.67b	42.78±2.48a	47.64±5.20a	47.01±7.55a	48.64±7.28a
侧柏	23.29±2.87e	23.71±1.47e	27.95±1.23d	25.31±1.15de	35.01±1.37c	43.78±1.25b	46.02±4.84b	55.79±4.16a
圆柏	25.82±3.14e	25.72±1.44e	28.19±0.83e	27.60±0.80e	31.52±1.44d	36.11±2.05c	41.59±1.03b	47.07±2.51a
银杏	9.57±3.63f	7.94±1.14f	15.57±0.61e	22.61±1.25d	32.19±0.69c	35.01±1.47bc	35.63±2.69b	41.81±3.23a
槐	8.77±2.63d	9.64±1.48d	10.00±1.12d	22.67±1.31c	26.35±1.89b	33.76±1.60a	32.43±2.75a	35.20±3.36a
碧桃	9.79±1.63c	10.71±1.85c	15.58±1.46b	21.32±1.72a	9.28±1.04c	—	—	—
新疆杨	17.86±2.98e	18.24±0.80e	19.79±0.51e	24.96±0.64d	34.29±3.47c	41.05±3.09b	45.95±0.51a	47.81±2.13a
旱柳	13.88±1.40d	13.95±0.59d	20.83±0.67c	23.47±0.23b	26.97±0.71a	25.87±2.71a	26.39±1.37a	26.33±1.11a
栎	15.89±2.53e	16.91±0.69e	20.99±0.93d	29.17±1.79c	36.64±2.32b	38.83±1.33ab	40.32±0.56a	37.25±1.71b
五角槭	12.24±2.72e	14.13±0.99de	16.59±1.25d	23.52±0.88c	32.99±0.75b	32.11±1.23b	35.60±1.52a	32.03±1.15b
白蜡树	22.98±2.70ef	21.44±1.52f	25.59±1.95de	27.04±1.84d	28.05±0.77d	33.99±1.29c	38.44±2.76b	42.33±2.73a
水栒子	17.32±2.12e	15.97±3.01e	21.41±1.49cd	23.36±2.80c	35.41±0.61b	38.82±2.98b	45.61±4.33a	45.52±6.73a
金银忍冬	16.72±2.56d	17.25±2.83d	22.67±1.65bc	21.12±2.24c	23.65±0.77bc	24.43±1.15b	28.24±1.52a	30.45±0.43a
紫丁香	11.57±4.57d	12.12±2.28d	12.33±0.09d	17.99±0.83c	19.55±2.59c	24.85±1.57a	23.75±2.37ab	20.65±0.87bc
连翘	9.43±1.29d	8.06±1.18d	16.29±0.95c	21.88±1.24b	27.13±2.79a	25.76±0.52ab	23.47±1.15b	—

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。

表 3 16 种植物叶片丙二醛含量的变化
Tab.3 Changes in malondialdehyde content of 16 plant species

单位: $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

树种	CK	2d	4d	6d	8d	10d	12d	14d
油松	2.59±0.36d	2.67±0.10d	3.00±0.15c	3.25±0.18bc	3.20±0.06bc	3.11±0.08c	3.40±0.16b	3.75±0.06a
白皮松	1.91±0.31d	1.80±0.23d	2.53±0.10c	2.55±0.12c	2.54±0.07c	2.75±0.10bc	2.96±0.17ab	3.16±0.08a
侧柏	2.88±0.39e	2.96±0.18e	3.49±0.15d	3.16±0.14de	4.02±0.09c	4.38±0.18bc	4.45±0.34b	5.23±0.40a
圆柏	3.10±0.62d	3.26±0.26cd	3.52±0.10bc	3.45±0.10bc	3.61±0.16bc	3.60±0.09bc	3.74±0.08ab	4.13±0.21a
银杏	1.13±0.35d	1.00±0.15d	1.95±0.08c	2.83±0.16b	3.65±0.14a	3.48±0.20a	3.63±0.10a	3.10±0.02b
槐	1.06±0.28c	1.16±0.15c	1.25±0.14c	2.83±0.16b	3.29±0.24a	2.97±0.20b	3.05±0.16ab	2.90±0.23b
碧桃	1.44±0.44bc	1.30±0.18c	2.06±0.17ab	2.67±0.22a	1.16±0.13c	—	—	—
新疆杨	2.23±0.37e	2.28±0.10de	2.47±0.06d	3.12±0.08c	3.45±0.07ab	3.09±0.08c	3.24±0.06bc	3.64±0.07a
旱柳	1.74±0.18d	1.78±0.11d	2.60±0.08c	2.91±0.04b	3.36±0.09a	3.23±0.08a	3.35±0.13a	3.28±0.10a
栎	1.99±0.32e	2.11±0.09e	2.62±0.12d	3.65±0.22c	4.58±0.29b	4.85±0.17ab	5.04±0.07a	4.66±0.21b
五角槭	1.53±0.34e	1.77±0.12de	2.07±0.16d	2.94±0.11c	4.12±0.09b	4.01±0.15b	4.45±0.17a	4.00±0.14b
白蜡树	2.87±0.34d	2.68±0.19d	3.19±0.26c	3.38±0.23c	3.42±0.13c	3.96±0.15b	4.35±0.12a	4.38±0.22a
水栒子	2.06±0.39f	2.08±0.21f	2.76±0.04e	3.17±0.15d	4.43±0.08c	4.67±0.19bc	4.95±0.35b	5.34±0.33a
金银忍冬	2.09±0.32d	2.16±0.35d	2.83±0.21bc	2.64±0.28c	2.96±0.10bc	3.05±0.14b	3.53±0.19a	3.81±0.05a
紫丁香	1.40±0.43d	1.56±0.33d	1.45±0.15d	2.22±0.20c	2.44±0.32bc	3.27±0.15a	3.01±0.14a	2.64±0.14b
连翘	1.19±0.16d	1.04±0.19d	2.04±0.11c	2.71±0.13b	3.52±0.22a	3.34±0.31a	2.93±0.14b	—

以碧桃、银杏、槐、旱柳、连翘、紫丁香、栾、五角槭为代表，其丙二醛含量在胁迫中期（6 d—12 d）迅速达到峰值，反映出细胞膜系统遭受快速且严重的氧化损伤，膜透性急剧提高，内容物外泄，最终导致细胞死亡，是耐涝性较弱的重要生理证据。

从不同生活型来看：1) 4 种常绿乔木的丙二醛含量均持续缓慢增长，增幅相对温和。其中，侧柏的丙二醛绝对含量和最终增幅最高（从 $2.88\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 升至 $5.23\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ），说明其膜系统所受压力较大；油松和白皮松的丙二醛含量始终维持在较低水平，表明其细胞膜在水淹环境下具有较高的稳定性。2) 不同树种的落叶乔木的丙二醛含量变化范围最大，耐涝性分化明显。新疆杨的丙二醛含量增长平稳，表明其具备较强的膜保护机制；栾和五角槭的丙二醛含量在胁迫中期急剧上升，峰值均超过对照组的 2.5 倍，表明其膜系统对水淹胁迫极为敏感；碧桃的丙二醛含量

在 6 d 达到峰值，随后因植株迅速死亡而无法测出，说明其耐涝极限极低。3) 落叶灌木中水栒子和金银忍冬的丙二醛积累模式与耐涝乔木一致，呈稳定上升趋势，膜损伤可控；连翘和紫丁香的丙二醛含量分别在 8 d 和 10 d 达到高峰，且连翘的峰值约为对照值的 3 倍，膜脂过氧化程度最为剧烈，这与其最早死亡的形态观察结果相互印证。

综上所述，丙二醛含量的变化清晰地刻画了水淹胁迫下细胞膜的损伤进程。耐涝植物能够有效延缓或减轻膜脂过氧化作用，维持膜结构的相对稳定；而不耐涝植物则表现出膜系统的快速、不可逆损伤，丙二醛的急剧积累是其走向衰亡的重要生理信号。

2.1.3 相对电导率对水淹胁迫的响应

相对电导率是衡量植物细胞膜透性的一项重要指标，其值升高直接反映了细胞膜结构的损伤与完整性丧失。从试验结果（表 4，图 3）可知，水淹胁迫导致所有植物叶片的相

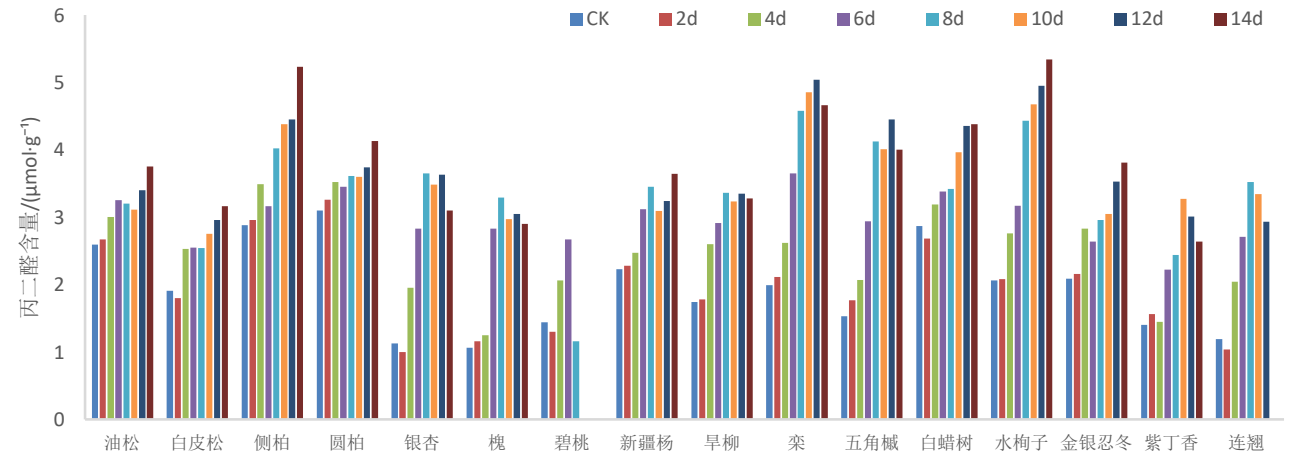


图2 水淹胁迫下 16 种园林植物丙二醛含量的变化
Fig.2 Changes in malondialdehyde content of 16 landscape plant species under waterlogging stress

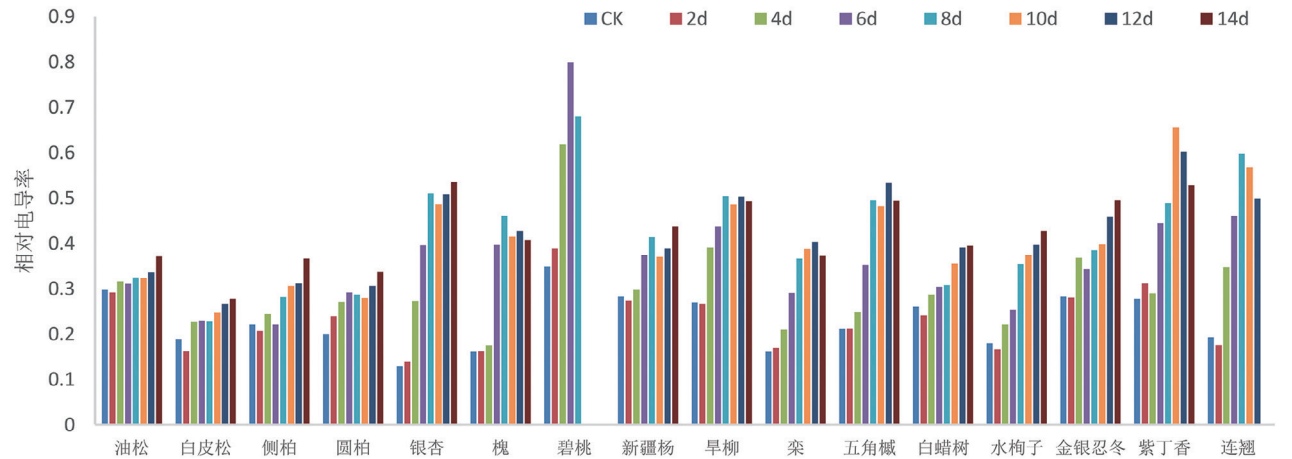


图3 水淹胁迫下 16 种园林植物相对电导率的变化
Fig.3 Changes in relative electrical conductivity of 16 landscape plant species under waterlogging stress

对电导率显著上升，但其变化模式在不同耐涝性植物间呈现出系统性差异，清晰地勾勒出细胞膜屏障功能崩溃的轨迹。

根据相对电导率的动态变化，可识别出 2 种典型模式。第一种是以油松、白皮松、侧柏、圆柏、新疆杨、水栒子等为代表的渐进缓升型。这些植物的相对电导率在整个胁迫期间缓慢上升，直至实验末期（12 d—14 d）才达到峰值，且最终值普遍控制在 50% 以下。这表明其细胞膜稳定性良好，能够有效抵抗水淹逆境，保持膜功能相对完整，是耐涝性强的直接体现。第二种则是以碧桃、银杏、旱柳、连翘、紫丁香、栎、五角槭、槐等为代表的快速激增型。这些植物的相对电导率在胁迫中期（6 d—10 d）急剧升高，并迅速达到峰值（多数超过 50%，部分如碧桃甚至超过 60%）。这种变化意味着细胞膜在短期内发生了严重泄漏，选择性屏障功能基本丧失，细胞内容物大量外渗，最终导致细胞死亡，是植物脆弱的核心标志。

从不同生活型来看：1）4 种常绿乔木的相对电导率始终维持在较低水平（小于 40%），表现出较强的膜完整性维护能力。其中，白皮松的绝对电导率值最低（CK 为 0.189，峰值为 0.278），说明其细胞膜结构稳定性较强；油松的最终电导率最高（0.371），但上升趋势缓慢，耐涝能力较强。2）不同树种的落叶乔木的膜稳定性差异显著。新疆杨和白蜡树的电导率变化呈缓慢增长模式，膜系统受损轻微；碧桃的电导率在 6 d 时飙升至 0.799，银杏和旱柳也在 8 d 时超过 0.500，直观反映其细胞膜在胁迫下的快速崩溃；槐、栎

和五角槭的电导率在中期迅速攀升后，后期出现小幅波动或下降，可能与细胞可泄漏物质耗尽有关。3）落叶灌木中水栒子和金银忍冬再次表现出与耐涝乔木一致的缓升模式；连翘和紫丁香的电导率则分别在 8 d 和 10 d 出现跃升，其中连翘的峰值（0.597）虽略低于紫丁香（0.655），但其在 14 d 前已死亡，表明其膜系统受损进程更为迅猛。

综上，相对电导率的动态变化是对细胞膜健康状况的直接反映。耐涝植物能够有效维持膜结构的完整性，延缓电导率的上升；而不耐涝植物的膜系统则迅速瓦解，相对电导率的急剧攀升预示着植株不可逆的损伤与死亡。该指标与丙二醛含量的变化相互印证，共同揭示水淹胁迫对细胞膜系统的双重损害机制——膜脂过氧化与膜透性提升。

2.2 不同园林植物耐涝能力综合分析

研究基于水淹胁迫下各生理指标变化特征，采用隶属函数法对 16 种园林植物耐涝能力进行综合评价（表 5）。从生活型分类来看，常绿乔木按耐涝能力排序，从强到弱依次为白皮松、圆柏、油松、侧柏；落叶乔木按耐涝能力排序，从强到弱依次为槐、新疆杨、白蜡树、银杏、栎、五角槭、旱柳、碧桃；落叶灌木按耐涝能力排序，从强到弱依次为水栒子、金银忍冬、连翘、紫丁香。

综合各植物在试验期间的形态表现（如叶片黄化、萎蔫、脱落等）与隶属函数评价结果，将 16 种植物划分为 3 个耐涝等级。1）D 值大于 0.550，形态损伤出现较晚或程度较轻的植物耐涝能力较强，包括常绿乔木白皮松、圆柏、油松、

表 4 16 种植物叶片相对电导率的变化
Tab.4 Changes in relative electrical conductivity of 16 plant species

树种	CK	2d	4d	6d	8d	10d	12d	14d
油松	0.297±0.028d	0.292±0.024d	0.316±0.009bcd	0.310±0.009cd	0.324±0.014b	0.323±0.009bc	0.336±0.007b	0.371±0.019a
白皮松	0.189±0.012d	0.162±0.021e	0.227±0.009c	0.229±0.011c	0.228±0.006c	0.247±0.009bc	0.266±0.015ab	0.278±0.013a
侧柏	0.221±0.010d	0.207±0.013d	0.244±0.011d	0.221±0.010d	0.281±0.006c	0.306±0.013b	0.311±0.024b	0.366±0.028a
圆柏	0.200±0.011f	0.239±0.008e	0.270±0.014d	0.292±0.016bc	0.287±0.006cd	0.279±0.007cd	0.306±0.014b	0.337±0.005a
银杏	0.129±0.020e	0.139±0.020e	0.272±0.011d	0.395±0.022c	0.510±0.012ab	0.486±0.029b	0.507±0.015ab	0.534±0.003a
槐	0.161±0.008c	0.162±0.021c	0.175±0.019c	0.396±0.023b	0.461±0.033a	0.415±0.028b	0.427±0.023ab	0.406±0.032bc
碧桃	0.349±0.044c	0.389±0.053c	0.618±0.051b	0.799±0.065a	0.679±0.008ab	-	-	-
新疆杨	0.282±0.027de	0.273±0.012e	0.297±0.008d	0.374±0.010c	0.414±0.009b	0.370±0.009c	0.389±0.008c	0.437±0.008a
旱柳	0.269±0.008d	0.266±0.016d	0.391±0.013c	0.437±0.005b	0.504±0.014a	0.485±0.013a	0.503±0.020a	0.492±0.015a
栎	0.161±0.012e	0.169±0.007e	0.209±0.010d	0.291±0.018c	0.366±0.023b	0.388±0.013ab	0.403±0.005a	0.372±0.017b
五角槭	0.211±0.013e	0.212±0.014e	0.248±0.019d	0.352±0.014c	0.494±0.011b	0.481±0.018b	0.533±0.023a	0.493±0.030b
白蜡树	0.260±0.288d	0.241±0.017d	0.287±0.024cd	0.304±0.021c	0.307±0.012c	0.355±0.014b	0.391±0.011a	0.394±0.020a
水栒子	0.179±0.015f	0.166±0.017f	0.221±0.003e	0.253±0.012d	0.354±0.006c	0.374±0.016bc	0.396±0.028b	0.427±0.026a
金银忍冬	0.282±0.037d	0.280±0.046d	0.368±0.027bc	0.343±0.037c	0.384±0.013bc	0.397±0.019b	0.458±0.024a	0.494±0.007a
紫丁香	0.278±0.036d	0.311±0.065d	0.290±0.016d	0.444±0.040c	0.489±0.065bc	0.655±0.029a	0.602±0.028a	0.528±0.028b
连翘	0.193±0.018d	0.176±0.033d	0.347±0.019c	0.460±0.022b	0.597±0.038a	0.567±0.053a	0.498±0.024b	-

侧柏, 落叶乔木槐、新疆杨、白蜡树。这些植物在胁迫过程中生理指标变化相对平缓。2) D 值 0.400~0.550, 形态上出现较明显的胁迫症状(如部分叶片变色、轻微萎蔫)但未快速死亡的植物耐涝能力中等, 包括落叶乔木银杏、栾、五角槭、旱柳, 落叶灌木水栒子、金银忍冬。该类植物的 D 值处于中间水平, 其生理指标在胁迫中后期呈现一定波动或上升趋势, 但整体变化幅度尚在可控范围内。3) D 值小于 0.400, 形态达到终止标准的植物耐涝能力弱, 包括落叶乔木碧桃, 落叶灌木紫丁香、连翘。碧桃和紫丁香的 D 值最低, 且紫丁香在试验后期叶片出现明显的萎蔫现象, 碧桃和连翘分别在水淹第 10 d 和第 14 d 时全部死亡。

结合植物的生态学特性, 建议在海绵设施中, 特别是在易发生周期性或短期积水区域(如雨水花园、下沉式绿地底部, 生物滞留池淹没区), 优先选用槐、新疆杨、白蜡树等耐涝性强的植物; 淹水风险较低的区域可

审慎应用银杏、栾、五角槭、旱柳、水栒子、金银忍冬等耐涝性中等植物; 而碧桃、紫丁香、连翘等耐涝性弱的植物应避免用于任何具有积水风险的海绵绿地中; 4 种常绿乔木具备较强短期生理耐受能力, 可在排水良好、偶发短期积水的区域少量配置, 以丰富植物群落结构与季相景观。

3 讨论

3.1 渗透调节是耐涝的重要策略

植物在逆境下积累游离脯氨酸是一种常见的渗透调节反应^[13]。试验发现, 耐涝性强的植物(新疆杨等)在水淹胁迫下表现出持续且稳定的游离脯氨酸积累(表 2), 这与官彦章等^[14]对华南园林植物, 以及罗祺等^[7]对 10 个树种的研究结果相符。游离脯氨酸的持续积累有助于维持细胞内的渗透势, 防止水分过度流失, 同时可能起到保护酶活性和稳定细胞膜结构的作用^[12], 是植物一种积极的、有效的生理保护机制。反之, 耐涝性弱的植物如碧桃

和连翘的游离脯氨酸含量在短暂升高后急剧下降, 与其在胁迫后期迅速死亡的形态表现完全吻合。这种模式表明, 其脯氨酸合成系统可能在严重的代谢紊乱和能量亏缺下崩溃, 无法维持长期的渗透调节需求, 与柳奇等^[15]在对杨树幼苗研究中观察到的敏感品种现象类似。因此, 游离脯氨酸的动态积累过程较单一时间点的含量更能准确反映植物的耐涝潜力。

3.2 膜系统稳定性决定耐涝性强弱

试验表明, 丙二醛含量与相对电导率的变化高度协同, 共同揭示了水淹胁迫下细胞膜系统的完整性与功能状态。耐涝性强的植物丙二醛含量与相对电导率均呈缓慢上升趋势(表 3~4), 说明其膜系统受到的氧化损伤较轻, 完整性保持较好。这与徐洪武等^[16]对雨水花园植物, 以及毕舒贻等^[6]对 22 种园林植物的研究发现一致, 即耐涝树种能更有效地维持膜稳定性。这可能得益于其体内更高效的抗氧化酶系统(如 SOD、POD、CAT), 该系统能够及时清除水淹诱导产生的过量活性氧, 从而减轻膜脂过氧化^[6,17]。相反, 耐涝性弱和中等的植物(如碧桃、连翘、栾、五角槭)的丙二醛和相对电导率在胁迫中期急剧升高, 表明其膜系统遭受快速、严重的氧化损伤。导致功能丧失, 最终导致细胞死亡。陈玉凤等^[18]对楠木 *Phoebe zhennan* 幼树的研究也支持膜稳定性是决定耐涝性的关键因素。

3.3 不同生活型植物的耐涝性差异

研究表明, 植物的耐涝性与其生活型无必然联系, 更多取决于物种自身的遗传适应性与生理调节能力。例如, 落叶乔木中既有新疆杨、白蜡树等耐涝性强树种, 也有碧桃这类极不耐涝的树种。耐涝性强的植物(如白蜡树、水栒子)可能通过形成通气组织、促进不定根发育等形态适应, 或通过调整代谢途径维持低氧呼吸等策略来适应缺氧环境^[8,19~20], 这些适应机制为其维持膜稳定和渗透调节提供了基础。

3.4 短期耐受与生态学特性的辩证关系

试验发现, 4 种常绿乔木在为期 14 d 的水淹胁迫下, 表现出与强耐涝

表 5 16 种植物各测定指标的隶属函数值

Tab.5 Membership function values of each measured indicator for 16 plant species

树种	生活型	游离脯氨酸含量	丙二醛含量	相对电导率	D 值	排序
白皮松	常绿乔木	0.908	0.617	1.000	0.842	1
圆柏		0.947	0.129	0.813	0.630	2
油松		0.885	0.335	0.668	0.629	3
侧柏		1.000	0.000	0.844	0.615	4
槐	落叶乔木	0.412	0.722	0.717	0.617	1
新疆杨		0.817	0.431	0.586	0.611	2
白蜡树		0.766	0.148	0.738	0.551	3
银杏		0.535	0.584	0.484	0.534	4
栾		0.732	0.062	0.756	0.517	5
五角槭		0.540	0.363	0.463	0.455	6
旱柳		0.371	0.483	0.318	0.391	7
碧桃		0.000	1.000	0.000	0.333	8
水栒子	落叶灌木	0.769	0.067	0.731	0.522	1
金银忍冬		0.439	0.445	0.470	0.451	2
连翘		0.201	0.679	0.364	0.415	3
紫丁香		0.152	0.751	0.208	0.370	4

性相符的生理特征,即游离脯氨酸的持续稳定积累,以及丙二醛含量与相对电导率的缓慢上升。这一结果与其生态学特性“不耐涝”的传统认知存在一定的差异。这一现象提示,植物的耐涝性评价需区分“短期生理耐受”与“长期生态适应”。常绿乔木可能具备较强的细胞水平抗逆机制(如渗透调节与膜保护),可在短期积水条件下维持生理功能;但其根系对长期土壤缺氧环境的适应性较差,在持续湿生环境中仍难以存活。这一认识对海绵城市绿地植物配置具有指导意义,即此类树种可在偶发、短期积水的绿地中审慎使用,但应避免用于长期或频繁淹水的区域。

4 结语

研究通过动态监测游离脯氨酸、丙二醛含量和相对电导率3项生理指标,结合隶属函数法系统比较了山西省16种常见园林植物的耐涝能力,涵盖常绿乔木、落叶乔木和落叶灌木多种生活型,为山西省乃至类似气候区的海绵城市绿地建设的植物选择与配置提供理论依据,丰富了北方地区的相关研究。研究表明,渗透调节与膜系统稳定性是评价植物耐涝性的关键生理依据;16种植物中耐涝性较强的常绿乔木有白皮松、圆柏、油松、侧柏,落叶乔木有槐、新疆杨、白蜡树,可种植于海绵设施中易发生周期性或短期积水的区域;耐涝性中等的落叶乔木有银杏、栎、五角槭、旱柳,落叶灌木有水栒子、金银忍冬,可审慎应用于淹水风险较低的区域;耐涝性弱的落叶乔木有碧桃,落叶灌木有紫丁香、连翘,应避免用于任何具有积水风险的海绵绿地中;4种常绿乔木具备较强短期生理耐受能力,可在排水良好、偶发短期积水的区域少量配置,以丰富植物群落结构与季相景观。由于本研究为短期控制试验,未能模拟实际绿地中复杂的水文循环与土壤环境,未来可通过开展长期定位观测,验证植物在实际海绵绿地中的适应性,并结合形态解剖、光合特性及分子机制等多维度研究,构建涵盖生理、形态、生态等多指标的耐涝性综合评价体系。

注:图片均由作者自绘。

参考文献:

[1] 山西省统计局. 山西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003: 1-20.

[2] 童琪, 王陈, 周鑫伟, 等. 水淹胁迫对香榧幼苗生理特性的影响[J]. 现代农业科技, 2024 (7): 94-97.

[3] 方馨, 王凯林, 孙笑丛, 等. 海绵城市建设中8种华北常用园林地被植物的耐淹性研究[J]. 天津农业科学, 2021, 27 (7): 76-87.

[4] 高琦, 沈广爽, 杨彤, 等. 6种园林草本植物对水淹胁迫的生理响应的比较研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2018, 51 (2): 1-8.

[5] 白果, 冷平生, 胡增辉. 水淹胁迫对4年生华北紫丁香生理指标的影响[J]. 西部林业科学, 2021, 50 (4): 101-106.

[6] 毕舒怡, 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, 49 (1): 15-20.

[7] 罗祺, 张纪林, 郝日明, 等. 水淹胁迫下10个树种某些生理指标的变化及其耐水淹能力的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2007,

16 (1): 69-73.

[8] 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 (3): 61-67.

[9] KAUR G, SINGH G, MOTAVALLI P, et al. Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: a review[J]. Agronomy Journal, 2020, 112 (3): 1475-1501.

[10] REPO T, HEISKANEN J, SUTINEN M L, et al. The response of Scots pine seedlings to waterlogging in a fine-textured till soil[J]. New Forests, 2017 (48): 51-65.

[11] 尹婷辉, 林瑞君, 孙林, 等. 华南22种园林植物耐涝性筛选[J]. 浙江林业科技, 2022, 42 (1): 31-40.

[12] 方安, 李想, 洪欣, 等. 水淹胁迫对3种紫云英生长及生理代谢的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (3): 142-148.

[13] 詹丽红, 蔡宇宇, 朱仲龙, 等. ‘娇红1号’红花玉兰对水分胁迫的生理响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024 (3): 18-26.

[14] 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.

[15] 柳奇, 谭灵杰, 陈良华, 等. 水淹胁迫对35/66杨和NL-80351杨幼苗生理特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39 (5): 582-589.

[16] 徐洪武, 余德贵, 周小玟. 皖南地区15种雨水花园植物耐淹性比较研究[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2022, 17 (4): 58-64.

[17] 胡衍平, 刘卫东, 庞文胜, 等. 水分胁迫对山乌柏幼苗生长及生理生化影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43 (8): 62-72.

[18] 陈玉凤, 谭飞, 胡红玲, 等. 水淹胁迫对楸楠幼树生长及光合生理特性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (3): 224-231.

[19] 湛宇, 李长慧, 才华, 等. 高寒湿地植物对水淹胁迫的生理响应及适应性评价[J]. 草地学报, 2024, 32 (2): 517-526.

[20] 颜慧萍, 陈谭星, 曹力凡, 等. 水淹胁迫对杂交构树幼苗生长及光合生理特性的影响[J]. 林业科技通讯, 2023 (10): 70-73.

作者简介:

郭胜涛/1984年生/男/河南漯河人/硕士/太原市园林质量植保站(太原030001)/高级工程师/研究方向为园林植物保护