浙 江 农 林 大 学 学 报, 2025, **43**(X): 1−8 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250398

引用格式: 戴坤荣, 刘雅, 喻卫武, 等. 9 个香椿品种砧木对淹水胁迫的生理响应及耐涝性评价[J]. 浙江农林大学学报, 2025, **43**(X): 1−8. DAI Kunrong, LIU Ya, YU Weiwu, *et al*. Physiological response and waterlogging tolerance of rootstocks of 9 *Torreya grandis* 'Merrillii' cultivars under waterlogging stress[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **43**(X): 1−8.

9 个香榧品种砧木对淹水胁迫的生理响应及耐涝性评价

戴坤荣，刘　雅，喻卫武，吴家胜，颜景畏

（浙江农林大学 林业与生物技术学院，浙江 杭州 311300）

摘要：【目的】在雨季排水不畅的地区，频繁的涝渍严重限制了香榧 *Torreya grandis* 'Merrillii' 产量与品质提升。系统开展不同香榧品种砧木在淹水胁迫下的生理响应与耐涝性研究，不仅有助于筛选和培育耐涝香榧品种，也为揭示香榧耐涝机制提供重要的理论依据。**【方法】**以香榧'珍珠榧' 'Zhenzhufei'、'早缘榧' 'Zaoyuanfei'、'玉山鱼榧' 'Yushanyufei'、'金叶红象牙榧' 'Jinyehongxiangyafei'、'茄榧' 'Qiefei'、'长叶榧' 'Changyefei'、'小籽象牙榧' 'Xiaozixiangyafei'、'龙凤细榧' 'Longfengxifei'、'芝麻榧' 'Zhimafei' 等 9 个品种的砧木为供试材料，设定正常水分 (对照) 和淹水 2 种处理，通过测定香榧叶片组织的叶绿素 a 质量分数、叶绿素 b 质量分数、过氧化氢 (H_2O_2) 质量摩尔浓度、丙二醛 (MDA) 质量摩尔浓度、电解质渗透率、脯氨酸 (Pro) 质量分数、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性、过氧化氢酶 (CAT) 活性、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性等 10 个生理指标，再依据主成分分析及隶属函数对各品种的耐涝指数进行分析，综合评价各品种的耐涝能力。**【结果】**在淹水处理下，不同品种砧木的叶绿素 a 和叶绿素 b 较对照组均有不同程度的降低，H_2O_2 质量摩尔浓度、MDA 质量摩尔浓度、电解质渗透率、SOD 活性和 POD 活性等氧化胁迫相关生理指标均有不同程度的升高，脯氨酸质量分数、APX 活性、CAT 活性在不同品种中呈现升高或降低的趋势。根据主成分分析及隶属函数对不同生理指标进行综合评价，得到 9 个品种的耐涝性综合评价值。**【结论】**不同品种的香榧砧木在淹水胁迫下的渗透物质变化与抗氧化防护能力不同。'长叶榧' '金叶红象牙榧' 与 '玉山鱼榧' 表现出较强的耐涝性，'小籽象牙榧' '龙凤细榧' 与 '早缘榧' 中等耐涝，'珍珠榧' '茄榧' '芝麻榧' 最不耐涝。图 1 表 3 参 29

关键词：香榧；砧木；耐涝性；主成分分析；隶属函数；综合评价

中图分类号：S718.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2025)00-0001-08

Physiological response and waterlogging tolerance of rootstocks of 9 *Torreya grandis* 'Merrillii' cultivars under waterlogging stress

DAI Kunrong，LIU Ya，YU Weiwu，WU Jiasheng，YAN Jingwei

（College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China）

Abstract: [**Objective**] In regions with poor drainage during the rainy season, frequent waterlogging severely constrains the increase in yield and quality of *Torreya grandis* 'Merrillii'. This study aims to systematically investigate the physiological response and waterlogging tolerance of rootstocks of different *T. grandis* 'Merrillii' cultivars under waterlogging stress, which not only helps facilitate screening and cultivating waterlogging-tolerant varieties, but also provides a theoretical basis for elucidating the waterlogging-tolerant mechanism of *T. grandis* 'Merrillii'. [**Method**] Rootstocks of 9 *T. grandis* 'Merrillii' cultivars, namely 'Zhenzhufei' 'Zaoyuanfei' 'Yushanyufei' 'Jinyehongxiangyafei' 'Qiefei' 'Changyefei' 'Xiaozixiangyafei' 'Longfengxifei' and 'Zhimafei' were used as test materials. 2 treatments were set up: normal moisture (control)

收稿日期：2025-07-26；修回日期：2025-12-09

基金项目：浙江省省院合作林业科技项目 (2023SY15)

作者简介：戴坤荣 (ORCID: 0009-0009-5106-5828)，E-mail: daikunrong187@icloud.com。通信作者：颜景畏 (ORCID: 0009-0001-4412-3067)，教授，博士，博士生导师，从事香榧高效栽培和抗性生理等研究。E-mail: jingweiyan@zafu.edu.cn

and waterlogging. The tolerance of each cultivar to waterlogging was comprehensively evaluated by measuring 10 physiological indices in *T. grandis* ‘Merrillii’ leaves, including chlorophyll a and b contents, hydrogen peroxide (H_2O_2) content, malondialdehyde (MDA) content, electrolyte leakage rate, proline (Pro) content, and the activities of ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), and peroxidase (POD). Then, the waterlogging tolerance index of each variety was assessed based on principal component analysis and membership function analysis to comprehensively evaluate waterlogging tolerance capacity of each variety. [**Result**] Under waterlogging treatment, the contents of chlorophyll a and b of rootstocks of different cultivars decreased to varying degrees compared to the control. In contrast, the physiological indicators related to oxidative stress, such as H_2O_2 content, MDA content, electrolyte leakage rate, SOD activity, and POD activity, all increased to varying degrees. Pro content, APX activity, and CAT activity showed an increasing or decreasing trend in different cultivars. Based on principal component analysis and membership function analysis, a comprehensive evaluation of different physiological indicators was conducted to obtain the comprehensive evaluation values of waterlogging tolerance for the 9 cultivars. [**Conclusion**] Rootstocks of different *T. grandis* ‘Merrillii’ cultivars exhibit different changes in osmotic substances and antioxidant protection ability under waterlogging stress. ‘Changyefei’ ‘Jinyehongxiangyafei’ and ‘Yushanyufei’demonstrate high waterlogging resistance, while ‘Xiaozixiangyafei’ ‘Longfengxifei’ and ‘Zaoyuanfei’ show moderate tolerance. ‘Zhenzhufei’ ‘Qiefei’ and ‘Zhimafei’ have the least capacity of waterlogging tolerance. [Ch, 1 fig. 3 tab. 29 ref.]

Key words: *Torreya grandis* ‘Merrillii’; rootstock; waterlogging tolerance; principal component analysis; membership function; comprehensive evaluation

香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 属红豆杉科 Taxaceae 榧树属 *Torreya*，原产于浙江会稽山脉附近，是中国南方特有的珍稀干果树种，果实营养丰富，具有很高的保健、药用和综合开发利用价值[1−3]。作为中国原产的经济树种，香榧种植区域覆盖浙江、江苏、福建、江西、安徽、湖南、湖北、贵州、重庆、四川、云南等 11 个省 (市)，其中在会稽山区的诸暨、东阳、嵊州、柯桥等地广泛栽培，面积逾 10.6 万 hm^2，年产值达 60 亿元，已成为促进山区农民增收和助力乡村经济发展的林业产业[4]。在每年 5—6 月的香榧生理落果期，浙江多个地区频发季节性降雨，导致种植区常发涝害。林地积水常导致正在膨大的幼果大量脱落[5]，严重影响香榧产量与质量[6]。因此，选育和推广耐涝性强的香榧品种对于主产区具有重要的经济价值。同时，植物在水涝胁迫下表现出的渗透调节能力增强与抗逆性提升等特性，也为香榧的高效栽培提供了理论依据[7]。目前，已有诸多针对桃 *Prunus persica*[8]、簕杜鹃 *Bougainvillea* sp. [9]、玉兰 *Yulania* spp.[10] 等对涝害胁迫响应等相关研究，但有关裸子植物，尤其是香榧的耐涝性综合评价的研究鲜有报道。

本研究以 9 个香榧品种砧木为材料，比较不同品种相关生理指标在淹水胁迫前后的变化与差异，并利用主成分分析和隶属函数等对其耐涝性进行综合评价，旨在为香榧的耐涝机制研究提供理论基础，为中国南方地区香榧的种植提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为‘珍珠榧’‘Zhenzhufei’、‘早缘榧’‘Zaoyuanfei’、‘玉山鱼榧’‘Yushanyufei’、‘金叶红象牙榧’‘Jinyehongxiangyafei’、‘茄榧’‘Qiefei’、‘长叶榧’‘Changyefei’、‘小籽象牙榧’‘Xiaozixiangyafei’、‘龙凤细榧’‘Longfengxifei’、‘芝麻榧’‘Zhimafei’等 9 个香榧品种的 1 年生实生苗。幼苗置于生长室内培养。生长室的环境条件设置：白天 14 h，温度为 25 ℃，相对湿度为 60%，光合有效辐射为 500 μmol·m^{-2}·s^{-1}；夜间 10 h，温度为 23 ℃，相对湿度 60%。栽于内径 20 cm、

深 17 cm 的塑料苗盆中。盆土为普通园土。

1.2　试验方法

9 个香椿品种实生苗分别设置正常水分 (对照) 和淹水 2 种处理。每种处理设置 3 个重复，每个重复 10 株。淹水处理采用双套盆法，在打孔的苗盆外再套 1 个无孔的塑料苗盆进行淹水处理，水位保持高出土层 2~3 cm。对照组正常浇水，并及时补充水分使土壤含水量保持田间持水量的 75% 左右。处理 6 d 后取样进行生理指标测定。

1.3　测定项目与方法

叶绿素 a 和叶绿素 b 质量分数利用乙醇抽提后，用朗伯-比尔定律计算[11]；电解质渗透率使用电导仪测定[12]；过氧化氢 (H_2O_2) 质量摩尔浓度、丙二醛 (MDA) 质量摩尔浓度、脯氨酸 (Pro) 质量分数、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性、过氧化氢酶 (CAT) 活性、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性等均使用试剂盒测定。试剂盒均购自苏州科铭生物技术有限公司。各项生理指标测定所选采样部位均为香椿实生苗叶片。

1.4　评价方法以及数据处理

耐涝系数的计算采用马瑞娟等[13] 的方法：耐涝系数=(处理测定值/对照测定值)×100%。隶属函数的计算公式：$U_i=(x_i-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$。其中：$U_i$ 为测定各指标的隶属函数值；x_i 为各指标的实测值；$x_{\min}$、$x_{\max}$ 分别为各指标的最小值和最大值[14]。权重计算方法：$W_i = P_i / \sum_{i=1}^{n} P_i$。其中：$i$ 为指标数；W_i 为第 i 个指标在所有指标中的重要程度；P_i 为各品种第 i 个指标的贡献率。综合得分计算方法：$D_i = \sum_{i=1}^{n} U_i \times W_i$，*其中* D_i 为综合评价值。

采用 Excel 2023、SPSS 17.0 软件进行数据统计分析。

2　结果与分析

2.1　淹水胁迫下香椿砧木生理生化指标的变化

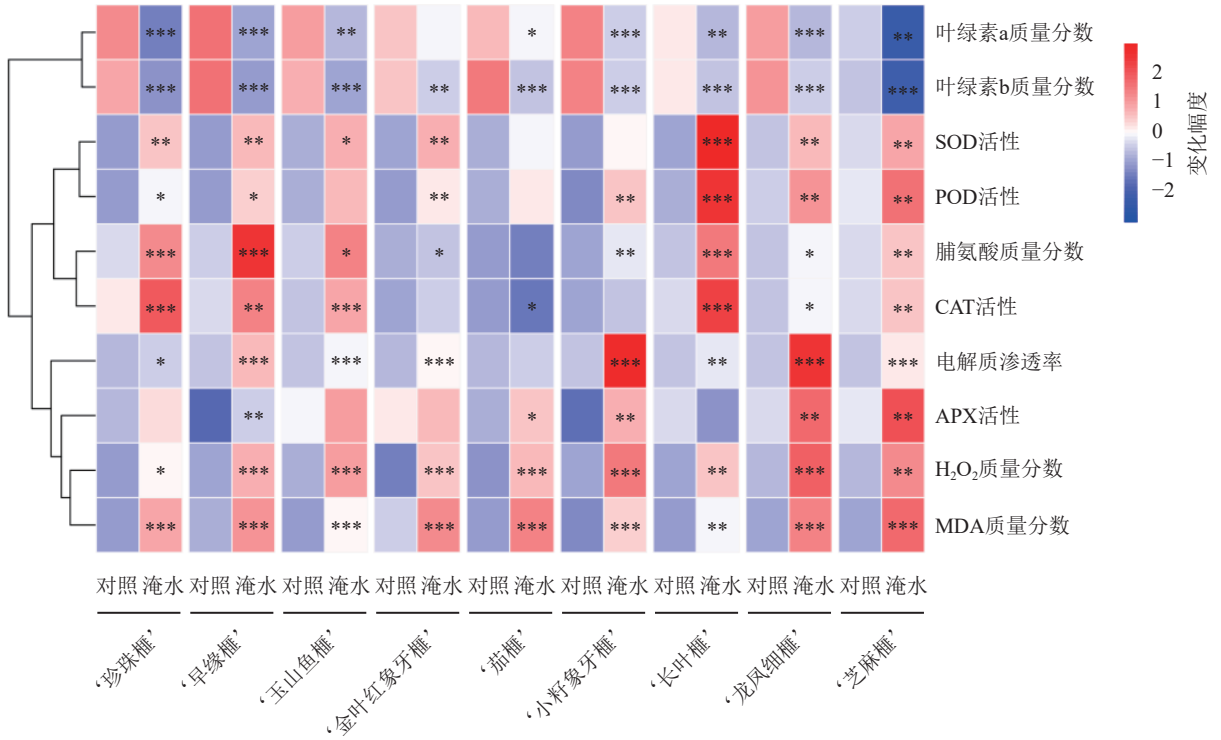
各项指标的测定数据见附表 (网址)。由图 1 可知：与对照组相比，淹水胁迫对各香椿品种砧木的生理生化指标产生了不同程度的影响。各处理组的叶绿素 a 质量分数均呈下降趋势，除‘金叶红象牙椿’外，其余品种均表现出显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 差异。叶绿素 b 质量分数在除‘芝麻椿’外的各组中亦极显著 ($P<0.01$) 下降。H_2O_2 和 MDA 质量摩尔浓度整体呈极显著 ($P<0.01$) 上升趋势，表明淹水胁迫诱导了不同程度的氧化损伤。除‘茄椿’外，其余品种的电解质渗透率与脯氨酸质量分数均显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 升高。在抗氧化酶活性方面，‘珍珠椿’‘玉山鱼椿’‘金叶红象牙椿’和‘长叶椿’的 APX 活性在淹水处理后变化不显著，其他品种则表现为显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 上升。‘金叶红象牙椿’和‘小籽象牙椿’的 CAT 活性在淹水处理后无显著变化，‘茄椿’则显著 ($P<0.05$) 下降，而其余品种均显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 升高。SOD 活性在各处理组中普遍升高，除‘茄椿’和‘小籽象牙椿’外，其余品种均显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 升高。POD 活性在除‘玉山鱼椿’和‘茄椿’外的其余各组中，均在淹水处理后显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 升高。

2.2　各指标耐涝系数分析

由表 1 可见：H_2O_2 质量分数、MDA 质量分数、电解质渗透率、SOD 活性和 POD 活性的耐涝系数均大于 100%；叶绿素 a 和叶绿素 b 质量分数的耐涝系数均小于 100%。脯氨酸质量分数、APX 活性和 CAT 活性等指标在不同品种间呈现分化趋势，即部分品种高于 100%，部分低于 100%。由此可见，单一指标难以全面准确反映香椿品种的耐涝性，评价结果易受个体差异影响，具有一定的片面性和不一致性。

2.3　相关性分析

对各生理指标的耐涝系数进行相关性分析后得到表 2。结果表明：各指标间存在不同程度的相关性。H_2O_2 质量摩尔浓度与电解质渗透率呈极显著正相关 ($P<0.01$)，脯氨酸质量分数与 H_2O_2 质量摩尔浓度、电解质渗透率等指标均呈负相关；CAT 活性与脯氨酸质量分数之间呈极显著正相关 ($P<0.01$)；



颜色表示标准化数值的变化幅度(红色为升高，蓝色为降低)。左侧折线为各指标相似性聚类的树状图。星号表示同一品种淹水处理与对照处理间的差异显著性(*P<0.05，**P<0.01，***P<0.001)。

图 1 不同香棯品种在正常和淹水处理下的生理生化指标变化热图

Figure 1 Heatmap of physiological and biochemical changes in different *T. grandis* ‘Merrillii’ cultivars under normal and waterlogging conditions

表 1 不同香棯砧木各指标的耐涝系数

Table 1 Waterlogging tolerance coefficients of different *T. grandis* ‘Merrillii’ rootstocks for each index

香棯品种	耐涝系数/%									
	叶绿素a	叶绿素b	H_2O_2	MDA	电解质渗透率	脯氨酸	APX活性	CAT活性	SOD活性	POD活性
‘珍珠棯’	53.30	58.46	122.07	175.64	110.49	131.60	110.11	127.52	124.79	111.75
‘早缘棯’	59.08	52.59	131.75	167.45	178.96	165.25	116.52	126.44	127.71	118.47
‘玉山鱼棯’	70.21	64.42	132.86	140.46	127.86	136.80	110.41	124.77	125.26	117.94
‘金叶红象牙棯’	88.49	78.95	137.45	150.41	156.05	106.89	104.58	107.79	124.51	116.21
‘茄棯’	86.36	61.27	135.00	192.99	113.11	90.64	113.99	91.04	111.23	112.75
‘小籽象牙棯’	69.00	65.24	145.25	170.51	329.53	118.43	127.68	105.72	115.96	124.40
‘长叶棯’	81.02	82.33	127.89	136.86	121.60	144.65	92.20	143.03	159.85	142.75
‘龙凤细棯’	69.07	68.96	144.71	183.40	303.65	110.54	119.70	107.77	117.20	118.64
‘芝麻棯’	54.66	54.48	133.83	198.65	146.26	118.90	122.35	113.40	117.40	121.68

SOD 活性与 CAT 活性、POD 活性之间也呈极显著正相关 (P<0.01)。上述结果说明：各耐涝相关指标之间存在一定的关联性，部分信息存在重叠，表明采用单一指标对耐涝性进行评价难以全面、客观地反映品种间差异。因此，有必要引入多指标综合评价方法。

2.4 各指标主成分分析

主成分分析能够有效降低数据维度，消除数据中的冗余信息。主成分分析结果可得：前 3 个主成分的特征值分别为 4.874、2.599 和 1.621，贡献率分别为 48.74%、25.99% 和 16.21%，累积贡献率可达 90.935%，表明在淹水胁迫下，前 3 个综合指标可以用于评价各指标耐涝性。对应的主成分表达式分别为：F_1=0.195x_1+0.551x_2−0.597−0.806x_4−0.483x_5+0.596x_6−0.889x_7+0.862x_8+0.97+0.681x_{10}；F_2=0.881x_1+0.797x_2+0.61x_3−0.263x_4+0.32x_5−0.597x_6−0.215x_7−0.415x_8+0.043x_9+0.257x_{10}；F_3=−0.333x_1+0.028x_2+0.486x_3−0.131x_4+0.784x_5+0.427x_6+0.376x_7+0.254x_8+0.152x_9+0.479x_{10}。其中：x_1 为叶绿素 a 质量分数；x_2 为

表 2　各指标耐涝系数的相关性

Table 2　Correlation of flood tolerance coefficients of indicators

指标	相关系数									
	叶绿素a质量分数	叶绿素b质量分数	H_2O_2质量摩尔浓度	MDA质量摩尔浓度	电解质渗透率	脯氨酸质量分数	APX活性	CAT活性	SOD活性	POD活性
叶绿素a质量分数	1									
叶绿素b质量分数	0.741*	1								
H_2O_2质量摩尔浓度	0.281	0.151	1							
MDA质量摩尔浓度	−0.379	−0.648	0.216	1						
电解质渗透率	−0.088	0.043	0.844**	0.187	1					
脯氨酸质量分数	−0.477	−0.180	−0.474	−0.475	−0.142	1				
APX活性	−0.478	−0.670*	0.586	0.699*	0.633	−0.239	1			
CAT活性	−0.315	0.181	−0.649	−0.627	−0.335	0.846**	−0.591	1		
SOD活性	0.173	0.573	−0.495	−0.720*	0.337	0.590	−0.824**	0.850**	1	
POD活性	0.193	0.558	−0.042	−0.484	0.062	0.368	−0.457	0.576	0.812**	1

说明：*表示在 0.05水平上相关显著(双尾)；**表示在 0.01 水平上相关极显著(双尾)。

叶绿素 b 质量分数；x_3 为 H_2O_2 质量摩尔浓度；x_4 为 MDA 质量摩尔浓度；x_5 为电解质渗透率；x_6 为脯氨酸质量分数；x_7 为 APX 活性；x_8 为 CAT 活性；x_9 为 SOD 活性；x_{10} 为 POD 活性。

根据各主成分的系数绝对值可发现：第 1 主成分 (F_1) 中 MDA 质量摩尔浓度、APX 活性、CAT 活性和 SOD 活性的贡献较大，第 2 主成分 (F_2) 中叶绿素 a 和叶绿素 b 质量分数的贡献较大，第 3 主成分 (F_3) 中电解质渗透率的贡献较大。

2.5　综合评价

根据上述 3 个主成分表达式计算出各香椿品种砧木的综合指标值，再分别计算相应的隶属函数值。进一步根据 3 个主成分贡献率计算权重，计算结果分别为 0.536、0.286、0.178；最后通过隶属函数和权重求出各香椿品种砧木的综合评价值 (表 3)。可见，9 个香椿品种砧木的耐涝性从强到弱依次为‘长叶椿’‘金叶红象牙椿’‘玉山鱼椿’‘小籽象牙椿’‘龙凤细椿’‘早缘椿’‘珍珠椿’‘茄椿’‘芝麻椿’。

表 3　淹水胁迫下 9 个香椿砧木品种耐涝性综合评价

Table 3　Comprehensive evaluation of waterlogging tolerance of nine *T. grandis* ‘Merrillii’ rootstock varieties under waterlogging stress

香椿品种	综合指标值			隶属函数值			综合评价值(D_i)	排名
	F_1	F_2	F_3	U_1	U_2	U_3		
‘珍珠椿’	62.408	36.093	309.311	0.531	0	0.151	0.312	7
‘早缘椿’	48.901	47.320	386.847	0.484	0.093	0.519	0.378	6
‘玉山鱼椿’	87.655	76.725	331.989	0.620	0.336	0.258	0.475	3
‘金叶红象牙椿’	45.649	139.299	329.112	0.472	0.854	0.245	0.541	2
‘茄椿’	−24.334	110.054	277.571	0.226	0.612	0	0.296	8
‘小籽象牙椿’	−88.497	156.930	488.100	0	1.000	1.000	0.464	4
‘长叶椿’	195.562	95.947	340.320	1.000	0.495	0.298	0.731	1
‘龙凤细椿’	−82.569	152.098	457.518	0.021	0.960	0.855	0.438	5
‘芝麻椿’	−13.391	59.736	338.716	0.264	0.196	0.290	0.249	9

3　讨论

植物在遭遇水淹等逆境时会产生不同的生理生化反应，同时启动自我保护机制[15]。已有相关研究表明：在淹水胁迫下植物叶绿素下降，光合效能显著降低[16]，一些酶类如 SOD、POD 等活性下降，叶片中膜脂过氧化物和电解质渗漏率升高[17−18]，使植物细胞膜完整性被破坏，影响植物正常生长甚至导致植

物死亡。近年来，浙江多个地区频发季节性降雨，导致香椿种植区常发涝害，严重影响香椿产量与质量。因此，选育和推广香椿耐涝品种，对于香椿主产地具有重要的经济意义。探讨淹水胁迫下香椿所展现出的渗透调节功能和抗逆性等特质，也能为香椿的高效栽培提供理论依据[7]。

淹水胁迫下，植物叶片细胞膜脂过氧化加剧，MDA 积累，细胞内合成代谢受阻，光合作用相关酶活性降低，影响叶绿素合成，导致叶片变黄脱落，从而影响植物的正常生长[19−20]。本研究中，各香椿品种 MDA 均呈升高趋势，且与对照相比差异显著。除‘金叶红象牙椿’和‘茄椿’外其他香椿品种的砧木均受淹水胁迫的影响，叶绿素 a 和叶绿素 b 较对照组均显著降低，不同品种降低程度有所不同。这与前人研究结果一致[21−22]。淹水胁迫所导致的缺氧会使植物细胞内的电子传递链发生功能紊乱，这一过程触发活性氧 (ROS) 的过量积累，细胞中 ROS 产生和清除的动态平衡被打破[23]，进一步导致膜脂质过氧化和细胞膜通透性增加，细胞内容物大量外泄，最终致使细胞死亡[24]。本研究中，各香椿品种淹水处理后 H_2O_2 呈升高趋势，且差异显著，电解质渗透率与脯氨酸除‘茄椿’外均显著升高，说明淹水胁迫处理导致了不同程度的氧化损伤及细胞损伤。

在淹水胁迫下，植物会激活自身的抗氧化防御系统，以减轻淹水胁迫引发的氧化损伤。在缺氧条件下， SOD、CAT、APX 和 POD 等抗氧化酶活性显著上调，有效清除体内过量的 ROS，减缓植物的氧化应激，提高植物耐涝性。这类物质活性的变化程度，也可一定程度上表明香椿各品种砧木的抗氧化能力的高低。本研究发现，淹水处理后，‘珍珠椿’‘玉山鱼椿’‘金叶红象牙椿’和‘长叶椿’APX 活性变化不显著，‘金叶红象牙椿’和‘小籽象牙椿’CAT 活性变化不显著，‘茄椿’CAT 活性呈显著下降趋势，‘玉山鱼椿’和‘茄椿’POD 活性变化不显著。其他香椿品种淹水处理后，APX、CAT、SOD 与 POD 活性均呈显著升高趋势。此外，对于淹水胁迫的研究，未来应在上述常规生理指标的基础上增加水势相关参数 (如叶水势、渗透势和主茎水势等) 的测定，以更直接反映植株对水分胁迫的感知与利用规律。

植物在生长发育过程中持续面临盐碱、干旱、涝害及极端温度等复杂多变的非生物胁迫。为保障正常生长与繁殖，植物进化出一系列保护机制[25]。耐涝性强的品种在淹水胁迫下展现出更强的渗透调节与抗氧化能力。值得注意的是，涝渍、干旱、盐碱等不同类型的胁迫常引发相似的生理变化 (如渗透胁迫、氧化胁迫、离子毒害等)。例如，在杨树 *Populus* 耐涝种质中积累的渗透调节物质，也参与其在干旱胁迫下维持渗透平衡[26]。因此，具备较强耐涝性的植物通常也拥有应对这些共性挑战的有效机制，暗示其可能同时具备较强的耐旱、耐盐碱能力。这一现象提示，未来研究可进一步探讨耐涝性强的香椿品种在其他胁迫 (如干旱、盐碱) 条件下的适应表现，以拓展研究成果的应用范围。

砧木与嫁接品种之间存在显著的互作效应。砧木不仅为接穗提供物理支持，还通过调控水分与养分运输、激素信号传导以及抗逆反应途径，与接穗形成复杂的生理和分子互作网络，从而影响植株在不同环境条件下的生长表现与抗逆能力。NITTA 等[27] 对 *Actinidia rufa* 嫁接苗、葛枣猕猴桃 *A. polygama* 以及自根生长的‘海沃德’‘Hayward’猕猴桃进行研究发现：砧木类型会显著影响接穗的生长表现。将涝渍敏感的猕猴桃接穗嫁接在耐涝砧木上，可显著提高其整体耐涝能力[28]。因此，后续研究应进一步关注砧木与接穗间的互作机制，并在多砧木和多接穗组合中系统比较其在生长、生理及分子水平的差异，以揭示其对植株适应性和抗逆性的综合影响。

不同种质的砧木面对淹水胁迫时的生理响应会有所不同，单一的生理生化指标无法保证植物耐涝性评价的客观全面。因此，使用综合评价体系和隶属函数对植物耐涝性进行综合性评价更具有代表性和准确性[29]。本研究通过对叶绿素 a 和叶绿素 b 等生理指标进行主成分分析，得到 3 个综合指标值并通过隶属函数和权重计算出各香椿品种砧木的综合评价值，从而得出更为客观和全面的综合评价排序。

4 结论

9 个香椿品种砧木的耐涝性由强到弱依次为‘长叶椿’‘金叶红象牙椿’‘玉山鱼椿’‘小籽象牙椿’‘龙凤细椿’‘早缘椿’‘珍珠椿’‘茄椿’‘芝麻椿’。因此，淹水胁迫下，‘长叶椿’‘金叶红象牙椿’‘玉山鱼椿’表现出较强的耐涝性。在林业育种时可以选择这 3 个品种作为香椿的耐涝品种，有效避免雨季地面积水或树木被长时间淹水胁迫所导致的生长发育停滞和减产问题。此外，在育种应用的同时，也有必要在分子层面对耐涝机制进行深入研究，比如未来可选取耐涝表型差异显著的香椿

品种，结合转录组测序与功能基因组学手段，系统挖掘与耐涝性密切相关的关键基因及调控因子，进一步深入解析耐涝的分子调控网络及其互作机制。

5　参考文献

[1] ZHANG Zuying, TAO Liu, GAO Lingling, *et al*. Transcription factors TgbHLH95 and TgbZIP44 cotarget terpene biosynthesis gene TgGPPS in *Torreya grandis* nuts[J]. *Plant Physiology*, 2023, **193**(2): 1161−1176. DOI: 10.1093/plphys/kiad385.

[2] ZONGO A W, JIN Chengyu, HAO Guijie, *et al*. Functional compounds of *Torreya grandis* nuts and their processing byproducts: extraction process, health benefits, and food applications–A comprehensive review[J]. *Food Research International*, 2024, **197**: 115232. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.115232.

[3] YAN Jingwei, ZENG Hao, CHEN Weijie, *et al*. New insights into the carotenoid biosynthesis in *Torreya grandis* kernels[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2023, **9**(6): 1108−1118. DOI: 10.1016/j.hpj.2023.02.010.

[4] 严晓素, 陈红星, 喻卫武. 香榧——中国特有的珍稀干果树种[J]. 浙江林业, 2022(12): 24−25. YAN Xiaosu, CHEN Hongxing, YU Weiwu. *Torreya grandis*-a rare dried fruit tree species unique to China[J]. *Zhejiang Forestry*, 2022(12): 24−25.

[5] 黎章矩, 戴文圣. 中国香榧[M]. 北京: 科学出版社, 2007. LI Zhangju, DAI Wensheng. *Torreya grandis* in China[M]. *Beijing*: *Science Press*, 2007.

[6] LIU Zhihui, YAN Jiawen, WANG Tongtong, *et al*. *TgLCYB*1 regulated by TgWRKY22 enhances the tolerance of *Torreya grandis* to waterlogging stress[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, **253**: 126702. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126702.

[7] 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. TONG Qi, WANG Chen, ZHOU Xinwei, *et al*. Effects of waterlogging stress on physiological characteristics of *Torreya grandis* seedlings[J]. *Xiandai Nongye Keji*, 2024(7): 94−97. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2024.07.025.

[8] 朱炜, 龚林忠, 王富荣, 等. 5 个桃砧木品种对淹水胁迫的生理响应及耐涝性评价[J]. 南方农业学报, 2022, **53**(10): 2937−2945. ZHU Wei, GONG Linzhong, WANG Furong, *et al*. Physiological responses and waterlogging tolerance evaluation of five peach rootstock varieties under waterlogging stress[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, **53**(10): 2937−2945. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2022.10.026.

[9] 徐珊珊, 雷江丽, 陆婷, 等. 8 个簕杜鹃品种对淹水胁迫的生理响应及耐涝性评价[J/OL]. 分子植物育种, 2024-07-15. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240711.1734.004. XU Shanshan, LEI Jiangli, LU Ting, *et al*. Physiological response to waterlogging stress and evaluationo waterlogging tolerance of 8 *Bougainvillea* sp. [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2024-07-15. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240711.1734.004.

[10] 叶康, 陈伯祥, 杜习武, 等. 3 个玉兰材料对水涝胁迫的响应与耐涝性评价[J]. 西北植物学报, 2023, **43**(6): 940−947. YE Kang, CHEN Boxiang, DU Xiwu, *et al*. Response and waterlogging tolerance evaluation of three *Magnolia* materials to waterlogging stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, **43**(6): 940−947. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2023.06.0940.

[11] LICHTENTHALER H K, WELLBURN A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents[J]. *Biochemical Society Transactions*, 1983, **11**(5): 591−592. DOI: 10.1042/bst0110591.

[12] 李菲菲, 唐超兰, 蒋红梅, 等. 淹渍胁迫下枳砧温州蜜柑的形态特征和生理响应[J]. 华中农业大学学报, 2022, **41**(5): 122−133. LI Feifei, TANG Chaolan, JIANG Hongmei, *et al*. Morphological characteristics and physiological responses of *Satsuma* mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) with trifoliate orange rootstock (*Poncirus trifoliate* (L.)Raf.) under waterlogging stress[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, **41**(5): 122−133. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.05.016.

[13] 马瑞娟, 张斌斌, 蔡志翔, 等. 不同桃砧木品种对淹水的光合响应及其耐涝性评价[J]. 园艺学报, 2013, **40**(3): 409−416. MA Ruijuan, ZHANG Binbin, CAI Zhixiang, *et al*. Photosynthetic response of different peach rootstock varieties to flooding and evaluation of their waterlogging tolerance[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, **40**(3): 409−416. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2013.03.002.

[14] 张正洁, 杨国华, 郭瑞红, 等. 采用 DTOPSIS 法和隶属函数法对西北春玉米区域试验的综合评价[J]. 作物杂志, 2025(3): 78−84. ZHANG Zhengjie, YANG Guohua, GUO Ruihong, *et al*. Comprehensive evaluation of regional test of

spring maize in northwest China by DTOPSIS method and membership function method[J]. *Crops*, 2025(3): 78−84. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2025.03.011.

[15] 王蓓, 孙莉, 肖婷, 等. 浙江省杂草稻种子逆境萌发能力鉴定[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(4): 688−695. WANG Bei, SUN Li, XIAO Ting, *et al*. Identification of germination ability of weedy rice seeds in Zhejiang Province under adversity[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(4): 688−695. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20230521.

[16] 杨静, 瞿飞, 赵夏云, 等. 涝害胁迫对茄子生理特性和果实产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2025, **45**(1): 15−20, 26. YANG Jing, QU Fei, ZHAO Xiayun, *et al*. Effects of water-logging stress on physiological characteristics and fruit yield of eggplant[J]. *Tillage and Cultivation*, 2025, **45**(1): 15−20, 26. DOI: 10.13605/j.cnki.52-1065/s.2025.01.001.

[17] 夏文荣. 外源水杨酸对淹水胁迫下辣椒幼苗生长及活性氧代谢的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, **35**(9): 73−78. XIA Wenrong. Effects of exogenous salicylic acid on growth and reactive oxygen species metabolism of pepper seedlings under flooding stress[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, **35**(9): 73−78. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2871.2022.09.010.

[18] 黄晓玲, 詹咪莎, 王晓雨, 等. 不同牡丹品种在淹水胁迫下的生理响应[J]. 北方园艺, 2025(9): 95−103. HUANG Xiaoling, ZHAN Misha, WANG Xiaoyu, *et al*. Physiological responses of different peony varieties under flooding stress[J]. *Northern Horticulture*, 2025(9): 95−103. DOI: 10.11937/bfyy.20244224.

[19] MANGHWAR H, HUSSAIN A, ALAM I, *et al*. Waterlogging stress in plants: unraveling the mechanisms and impacts on growth, development, and productivity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, **224**: 105824. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2024.105824.

[20] NGUMBI E N. Could flooding undermine progress in building climate-resilient crops?[J]. *Trends in Plant Science*, 2025, **30**(1): 85−94. DOI: 10.1016/j.tplants.2024.07.017.

[21] ZHOU Chenping, BAI Tao, WANG Yi, *et al*. Morpholoical and enzymatic responses to waterlogging in three *Prunus* species[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, **221**: 62−67. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.03.054.

[22] ZHANG Binbin, SUN Maoxiang, LIU Wenxin, *et al*. Waterlogging resistance and evaluation of physiological mechanism of three peach (*Prunus persica*) rootstocks[J]. *Protoplasma*, 2023, **260**(5): 1375−1388. DOI: 10.1007/s00709-023-01850-w.

[23] LIU Zhenwei, QIAO Dandan, LIU Zhenyu, *et al*. Evaluation of waterlogging tolerance and responses of protective enzymes to waterlogging stress in pumpkin[J]. *PeerJ*, 2023, **11**: e15177. DOI: 10.7717/peerj.15177.

[24] AYALA A, MUÑOZ M F, ARGÜELLES S. Lipid peroxidation: production, metabolism, and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-nonenal[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2014, **2014**(1): 360438. DOI: 10.1155/2014/360438.

[25] GONG Zhizhong. Plant abiotic stress: new insights into the factors that activate and modulate plant responses[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2021, **63**(3): 429−430. DOI: 10.1111/jipb.13079.

[26] SAMINADANE T, JOTHIGANAPATHY K, KRISHNASWAMY P, *et al*. Introgression of submergence tolerance QTL (SUB1) into mega rice variety ADT (R) 46 through marker assisted back crossing (MABC) approach[J]. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 2025, **34**(4): 1010−1021. DOI: 10.1007/s13562-025-01007-1.

[27] NITTA H, OGASAWARA S. Characteristics of HAYWARD kiwifruit vines grown on their own roots or grafted onto *Actinidia polygama* or *Actinidia rufa*[J]. *Acta Horticulturae*, 1999, **498**: 319−324. DOI: 10.17660/actahortic.1999.498.38.

[28] BAI Danfeng, LI Zhi, GU Shichao, *et al*. Effects of kiwifruit rootstocks with opposite tolerance on physiological responses of grafting combinations under waterlogging stress[J]. *Plants*, 2022, **11**(16): 2098. DOI: 10.3390/plants11162098.

[29] WANG GUO yun, AHMAD S, WANG Yong, *et al*. Multivariate analysis compares and evaluates drought and flooding tolerances of maize germplasm[J]. *Plant Physiology*, 2023, **193**(1): 339−355. DOI: 10.1093/plphys/kiad317.