

2种菠萝蜜属植物幼苗对淹水胁迫的响应及耐涝性评价

莫云聪^{1,2}, 陈红兴², 许亚东³, 苏兰茜^{1*}, 白亭玉¹, 吴刚¹

(¹中国热带农业科学院香料饮料研究所·国家热带植物种质资源库木本粮食种质资源分库·

农业农村部万宁野外综合科学观测研究站·海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室, 海南万宁 571533; ²云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000; ³郑州大学农业与生物制造学院, 郑州 450001)

摘要:【目的】研究2种菠萝蜜属作物对不同程度淹水胁迫的响应,并对2种作物的耐涝性进行综合评价,为木本粮食作物抗涝性研究提供理论依据。【方法】以菠萝蜜(*Artocarpus heterophyllus* Lam.)和面包果[*Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg]为试验材料,处理设置为正常水分管理(即幼苗淹水0 h)、淹水24、48、72、96 h胁迫处理,比较不同淹水时间的菠萝蜜和面包果的生物量、光合特性和抗氧化酶活性的变化并进行耐涝性评价。【结果】淹水24 h显著抑制菠萝蜜幼苗地上部干质量和叶片光合参数,叶绿素含量也明显下降;面包果幼苗的生物量在淹水24 h时显著降低,光合参数和抗氧化酶活性分别在淹水72 h和96 h时表现出明显的抑制现象。随着淹水时间的延长,菠萝蜜的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈降低趋势,抗氧化酶活性呈上升趋势;面包果的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和抗氧化酶活性呈先升高后降低的趋势。因子分析法得出菠萝蜜和面包果的耐涝性排序表现为:面包果-96 h>菠萝蜜-72 h>面包果-72 h>菠萝蜜-96 h>面包果-48 h>面包果-24 h>菠萝蜜-48 h>菠萝蜜-24 h。隶属函数分析法得出2种菠萝蜜属作物耐涝性从强到弱依次为:面包果-96 h>面包果-24 h>面包果-72 h>菠萝蜜-72 h>面包果-48 h>菠萝蜜-96 h>菠萝蜜-48 h>菠萝蜜-24 h。淹水胁迫显著抑制菠萝蜜幼苗生长、光合特性和抗氧化酶活性,面包果具有更强的耐涝性,对淹水胁迫响应更强。【结论】淹水胁迫对2种作物的生物量、叶绿素含量、光合效率和抗氧化酶活性都有明显的抑制效果。菠萝蜜采用扩大根系吸收、色素调节、增强抗氧化酶活性缓解淹水胁迫造成的损伤,而面包果通过增强光合作作用和抗氧化酶活性抵抗涝害。在综合耐涝性评分中,面包果优于菠萝蜜,在短期及中期淹水环境中具备更强的适应性,可作为耐涝砧木的优选,而马来西亚1号菠萝蜜则更适合种植于排水良好的区域。

关键词:菠萝蜜;面包果;淹水胁迫;耐涝性评价

中图分类号:S667.8

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2026)05-1225-12

Response of two *Artocarpus* species seedlings to flooding stress and evaluation of waterlogging tolerance

MO Yuncong^{1,2}, CHEN Hongxing², XU Yadong³, SU Lanxi^{1*}, BAI Tingyu¹, WU Gang¹

(¹Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/National Tropical Plants Germplasm Resource Center-Sub Centre of Germplasm Resource for Woody Grain/Wanning Comprehensive Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops of Hainan Province, Wanning 571533, Hainan, China; ²College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er 665000, Yunnan, China; ³School of Agricultural and Biomanufacturing, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: 【Objective】 Hainan has a tropical maritime monsoon climate with distinct dry and wet seasons, with concentrated rainfall from June to October. The rainfall is heavy and frequent. Therefore, seasonal waterlogging has become one of the major threats to crops in Hainan. Woody crops have a large biomass and slow response to waterlogging, which is often overlooked. As waterlogging time prolongs,

收稿日期:2025-08-25

接受日期:2025-10-23

基金项目:海南省科技专项(ZDYF2024HXGG002);海南省现代农业产业技术体系建设专项资金

作者简介:莫云聪,男,在读本科生,研究方向为植物耐涝。E-mail:uv1234@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail:sulanxi1988@163.com

the harm of waterlogging stress becomes increasingly prominent. This study aimed to investigate the responses of two *Artocarpus* species to different degrees of flooding stress, and comprehensively evaluate their waterlogging tolerance, so as to provide a theoretical basis for the study on waterlogging resistance of woody food crops. **【Methods】** Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) and breadfruit [*Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg], two *Artocarpus* species, were used as experimental materials, and the pot flooding test was carried out by the 'double pot method'. The experiment was designed as five treatments, *i.e.*, normal water management (seedlings were flooded for 0 h) and flooded for 24 h, 48 h, 72 h, and 96 h. The plants treated with flooding were watered thoroughly to ensure that the water level exceeded the soil surface by about 2 cm. Afterwards, water was replenished daily to keep the roots in a saturated flooded state. After the first watering of the control plants, a certain amount of water should be replenished every 3 days to maintain the overall soil moisture content at 60% to 80% of the maximum field capacity. The changes of biomass, photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of jackfruit and breadfruit in different flooding times were investigated, and the waterlogging tolerance was evaluated by factor analysis and membership function methods. **【Results】** Flooding for 24 h significantly inhibited the aboveground dry weight and photosynthetic parameters of jackfruit seedlings, and the chlorophyll content also significantly decreased. Stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), and transpiration rate (T_r) increased after flooding for 72 h. The biomass of breadfruit seedlings significantly decreased after flooding for 24 h, and showed a significant increase trend after flooding for 72 h. The chlorophyll a , b , and $(a+b)$ contents reached the lowest values, with decreases of 23.64%, 78.17%, and 31.96%, respectively, compared to the 0-hour flooding treatment. The net photosynthetic rate (P_n), G_s , C_i , and T_r of breadfruit seedlings showed an increasing trend after flooding for 24 h, while photosynthetic parameters and antioxidant enzyme activity showed significant inhibition after flooding for 72 h and 96 h, respectively. With the increase of flooding time, the aboveground and total biomass of jackfruit seedlings increased first and then decreased, the underground and root/shoot ratio increased, the P_n , G_s , and T_r decreased, and the antioxidant enzyme activity increased. The P_n , G_s and T_r of breadfruit seedlings reached their maximum values at 24 hours of flooding and then continued to decrease, while the activities of CAT, POD, and SOD enzyme activity showed an increasing trend and then decreasing, reaching their highest values at 72 hours of flooding with the proportions of increase compared to 0 hours of flooding were 234.49%, 317.68%, and 251.88%, respectively. Correlation analysis was conducted on the waterlogging tolerance coefficients of various physiological indicators, and six waterlogging tolerance evaluation indicators were selected, including P_n , G_s , T_r , CAT, POD, and SOD. Principal component analysis showed that the variance contribution rates of the first two comprehensive indicators were 62.47% and 34.26%, respectively, with a total variance contribution rate of 96.73%, which basically included all the information of the measured indicators. Factor 1 had a significant load on P_n , G_s , and T_r , which was classified as a photosynthetic parameter. Factor 2 had a significant load on CAT, POD, and SOD, classified as antioxidant enzyme activity. Factor analysis showed that the order of waterlogging tolerance of jackfruit and breadfruit was: breadfruit -96 h > jackfruit -72 h > breadfruit -72 h > jackfruit -96 h > breadfruit -48 h > breadfruit -24 h > jackfruit -48 h > jackfruit -24 h. Membership function analysis showed that the waterlogging tolerance of two *Artocarpus* species was from strong to weak: breadfruit -96 h > breadfruit -24 h > breadfruit -72 h > jackfruit -72 h > breadfruit -48 h > jackfruit -96 h > jackfruit -48 h > jackfruit -24 h. Flooding stress significantly inhibited the growth, photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of jackfruit. Breadfruit had stronger waterlogging tolerance and response to flooding stress. **【Conclusion】** Flooding stress sig-

nificantly inhibited the biomass, chlorophyll content, photosynthetic properties and antioxidant enzyme activities of the two *Artocarpus* species. Jackfruit alleviates damage caused by flooding stress through expanding root absorption, pigment regulation and increasing antioxidant enzyme activity, while breadfruit resists waterlogging by enhancing photosynthesis and antioxidant enzyme activity. In the comprehensive waterlogging tolerance score, breadfruit is better than jackfruit, which has stronger adaptive potential in short-term and medium-term flooding environment and can be used as the preferred waterlogging resistant rootstock, while jackfruit is more suitable for planting in areas with good drainage.

Key words: Jackfruit; Breadfruit; Flooding stress; Waterlogging evaluation

随着全球气候的持续恶化和工业化的不断发展,非生物胁迫在全球范围内造成的影响越来越广。据统计,全球超过90%的耕地都遭受着严重的环境危害^[1]。伴随着全球气候变暖,洪涝灾害频发,洪涝已成为农业和林业领域日益关注的问题之一,淹水胁迫也成为植物逆境胁迫研究的热点内容^[2]。淹水胁迫是植物生长期较为常见的逆境胁迫之一,通常会对植物的正常生长造成不良影响^[3],其中光合作用对环境胁迫的反应较为敏感^[4]。光合作用效率会随着水分胁迫的加强而下降,许多植物的产品器官是光合产物积累的结果,因此水分胁迫与作物后期减产密切相关。

近年来,国内外学者对植物耐涝性做了大量研究。王晓忠等^[5]研究发现,钙和硅元素对水稻耐涝性的提高有一定帮助,同时还发现外源ABA可保护酶等活性物质,降低淹水对水稻的伤害。李文静等^[6]对油麦菜的研究表明,淹水5~15 d,叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性均有所提高,油麦菜通过提高抗氧化酶活性来清除过多的活性氧自由基,从而减少对细胞的伤害。李勇等^[7]研究表明,桑树在受到涝害胁迫时,生长代谢受到一定程度的抑制,植物体内的保护系统遭受到严重的损害,其中SOD是桑树应对水涝胁迫的主要防御酶。与涝害品种相比,耐涝品种在淹水后,其根系生长、根系损伤以及气孔的蒸腾速率表现出更强的适应性^[8]。筛选耐涝品种及采用合理栽培措施是抵御涝害的重要途径。然而,耐涝品种的筛选耗时较长,且受多种因素制约,短期内难以取得显著成效;栽培措施的实施效果也因环境差异而不稳定^[9]。在果树栽培领域,利用耐涝砧木嫁接不耐涝接穗,为提升果树耐涝性开辟了新方向。在猕猴桃栽培中,LD-1猕猴桃因耐涝性良好,作为砧木在湖南湘西地区得到广泛应用^[10];在桃产区,浙砧

1号等耐涝砧木品种的出现,为解决桃树受涝问题提供了有效方案^[9]。

菠萝蜜和面包果都属桑科(Moraceae)菠萝蜜属(*Artocarpus*)特色木本粮食作物^[11],菠萝蜜主要种植于海南、广西、广东、云南、台湾等地,面积达3.33万hm²,面包果则在海南和广东有部分种植,两者都是发展前景良好的木本粮食作物。海南岛属热带海洋性季风气候,旱雨季分明,又因为海南岛地处热带北缘,受南下冷空气与东部季风影响较大,气候温暖,雨量丰沛,光照充足,昼夜温差大,全年无霜冻,雨量多集中在6—10月,雨量大,雨次多^[12],季节性涝渍常导致菠萝蜜根系缺氧腐烂,植株萎蔫现象频发,根系完全淹水状态可长达3 d。生产上普遍采用马来西亚1号菠萝蜜和硬面包果实生苗作为砧木分别用于嫁接优良菠萝蜜和食用型面包果接穗,从而实现矮化早产丰产。前期研究发现,菠萝蜜与面包果可互为砧穗,嫁接亲和力较强^[13],但选择何种砧木可提高嫁接苗的耐涝性、抵御海南的雨季涝害却未见报道。鉴于此,笔者通过比较研究木本粮食作物菠萝蜜与面包果实生苗在淹水胁迫下的光合作用和抗氧化活性,并进行耐涝性评价,以期对耐涝砧木的筛选和木本粮食作物抗涝性研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点和材料

供试菠萝蜜为马来西亚1号实生苗,面包果为硬面包果实生苗,两者均为生产上普遍使用的砧木品种。采用“双套盆法”进行盆栽淹水试验,供试土壤先过8 mm筛混合均匀后装入直径为15 cm、高25 cm的塑料盆,盆底有排水孔,每盆装土4 kg,并施入8 g复合肥作为底肥。种植1株5叶1心、生长一致、无病虫害的5月龄幼苗。在原盆外再套一个无排水孔的塑料盆,以便植株保持在淹水状态,而对照

则在原盆外套一个有排水孔的花盆,以便土壤水分逐渐排到盆外。盆栽试验于2024年8月在中国热带农业科学院香料饮料研究所温室进行。供试土壤为砖红壤,土壤pH为5.84,有机质含量(w ,后同) $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮含量 $28.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $32.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $68.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,田间最大持水量为22.1%。

1.2 试验设计

采用单因素完全随机试验,设5个处理,即淹水时间为0 h(即正常水分管理)、24 h、48 h、72 h、96 h(此时幼苗叶片出现明显萎蔫,植株长势弱,根系变褐腐烂),每个处理设置3次重复,每次重复5株。对淹水处理植株浇足水分,并保证水面超过土壤表面2 cm左右,以后每天补充水分,使根系始终处于饱和淹水状态。对照植株在第1次浇足水分后,每3 d补充一定量水分,使土壤含水量整体上保持在最大田间持水量的60%~80%。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 光合指标测定 使用LI-6400XT光合测定仪,选择向阳、生长均匀一致的菠萝蜜、面包果顶部往下数第3片叶子测定叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)等光合指标。计算气孔限制值(L_s): $L_s=1-C_i/C_a$ (式中: C_i 为胞间 CO_2 浓度; C_a 为大气 CO_2 浓度)^[14]。测定时间选择晴天09:00—11:00, CO_2 浓度为 $(385 \pm 5) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,测定光照度为 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,叶片温度为 $(25.5 \pm 2)^\circ\text{C}$,空气相对湿度维持在45%左右。采用标准叶

室,开放式气路,流速均设定为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 。于处理时间结束后统一选取顶部往下第3片展开叶,每叶测定5次,取平均值。

1.3.2 生长及生理指标测定 每个处理随机选取5株长势较一致的菠萝蜜和面包果幼苗测定生长指标。植物样品收获后,用去离子水将植株冲洗3次,分成地上部和地下部,置于 105°C 烘箱中杀青30 min,转至 65°C 烘至恒质量,并称取其干质量。根冠比=地下部干质量/地上部干质量。使用乙醇-丙酮浸提紫外可见分光光度计测定叶片叶绿素含量^[15]。

1.3.3 抗氧化酶活性测定 按照南京建成生物工程研究所提供的试剂盒说明书分别测定叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。

1.4 数据分析

采用SPSS 26进行单因素方差分析(ANOVA),利用Duncan新复极差法检验处理间差异显著性水平($P < 0.05$)。运用因子分析法和隶属函数法^[16]对菠萝蜜和面包果的耐涝能力进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 淹水胁迫对菠萝蜜和面包果幼苗生长的影响

从表1可知,淹水胁迫对菠萝蜜幼苗生长有一定的影响。随着淹水时间的延长,菠萝蜜幼苗地上部干质量整体上呈下降趋势,较正常水分管理(淹水0 h)分别减少14.61%、53.88%、42.46%和51.60%。与淹水0 h相比,淹水24 h和72 h菠萝蜜幼苗地下部

表1 淹水胁迫下菠萝蜜和面包果幼苗生物量的变化

Table 1 Seedling biomass of jackfruit and breadfruit under flooding stress

作物 Crop	淹水时间 Flooding time/h	地上部干质量 Dry mass of shoot/g	地下部干质量 Dry mass of root/g	总干质量 Total dry mass/g	根冠比 Ratio of root/shoot/%
菠萝蜜 Jackfruit	0	2.19±0.02 a	1.52±0.05 d	3.71±0.03 c	0.69±0.03 d
	24	1.87±0.04 b	2.68±0.14 a	4.55±0.19 a	1.43±0.04 c
	48	1.01±0.03 d	1.78±0.05 c	2.79±0.08 e	1.76±0.02 b
	72	1.26±0.05 c	2.78±0.09 a	4.04±0.05 b	2.21±0.15 a
	96	1.06±0.13 d	2.32±0.20 b	3.38±0.25 d	2.20±0.29 a
面包果 Breadfruit	0	8.54±0.26 a	3.88±0.25 a	12.42±0.32 a	0.45±0.03 b
	24	4.61±0.09 d	1.76±0.11 c	6.37±0.20 c	0.38±0.02 c
	48	5.09±0.19 c	1.68±0.10 c	6.77±0.29 c	0.33±0.01 d
	72	6.04±0.17 b	3.13±0.26 b	9.17±0.42 b	0.52±0.03 a
	96	3.63±0.22 e	1.55±0.08 c	5.18±0.26 d	0.43±0.03 b

注:同列不同小写字母表示同种作物不同处理在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicates significant difference among different treatments of the same crop at 0.05 level. The same below.

干质量较大,显著增加 76.32%和 82.89%,其他淹水处理的下部干质量也均显著高于正常水分管理。淹水 24 h 的菠萝蜜幼苗总干质量最高,其次是淹水 72 h,较淹水 0 h 处理分别显著增加 22.64%和 8.89%。淹水处理均显著增加菠萝蜜幼苗的根冠比,淹水 72 h 和 96 h 的幼苗根冠比较淹水 0 h 处理分别显著增加 220.29%和 218.84%。

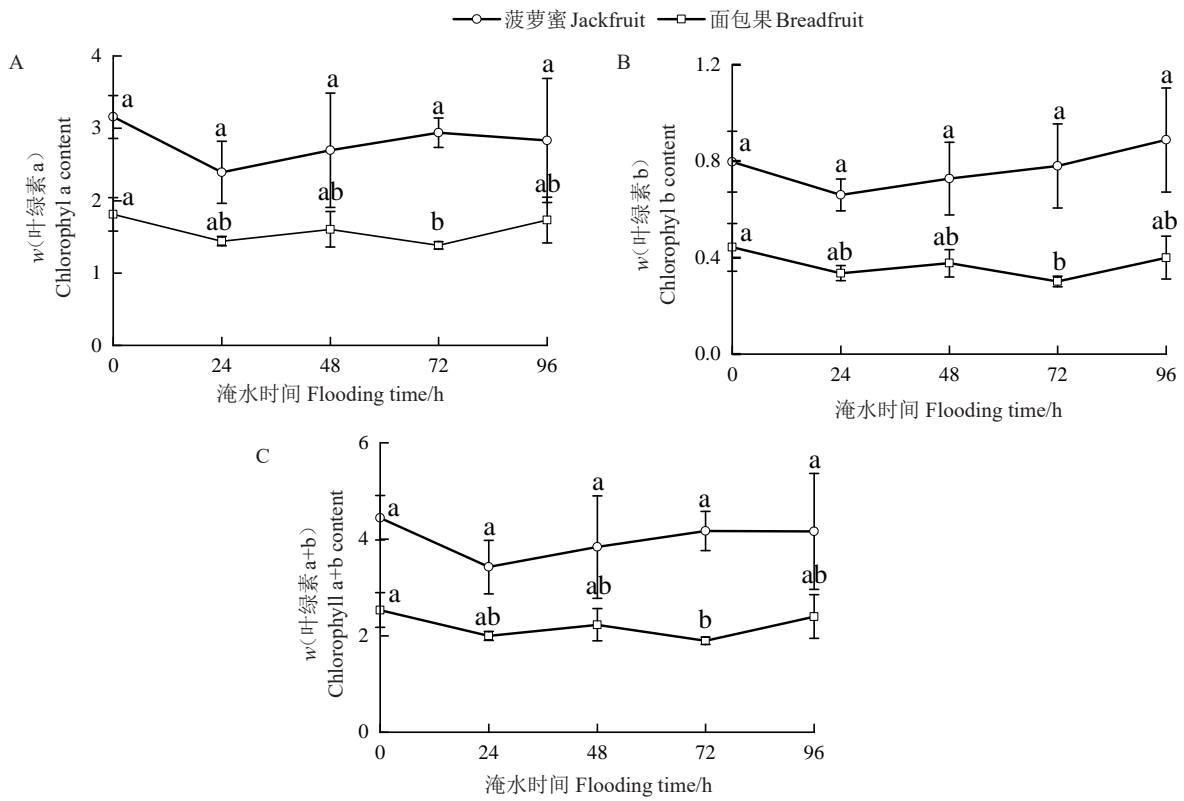
随着淹水时间的延长,面包果幼苗的地上部、地下部和总干质量整体上均呈下降趋势,在淹水 72 h 时有短暂的增加趋势,在淹水 96 h 时达到最低。淹水 72 h 处理的幼苗根冠比最高,较淹水 0 h 显著增加

15.56%,淹水 96 h 的幼苗根冠比与淹水 0 h 无显著差异,但二者均显著高于淹水 24 h 和 48 h 处理。

2.2 淹水胁迫对菠萝蜜和面包果幼苗叶片叶绿素含量的影响

由图 1 可知,淹水胁迫对菠萝蜜幼苗叶片叶绿素的合成有抑制作用,随着淹水时间的延长,整体呈先降低后上升的趋势,但淹水胁迫处理的叶片叶绿素含量与淹水 0 h 处理均无显著差异。

面包果幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量随着淹水时间的延长,均呈降-升-降-升的变化趋势,波动幅度较小,在淹水 72 h 时达到最低,较



不同小写字母表示不同淹水处理差异显著 ($P < 0.05$)。

Different small letters indicate significant difference among different flooding treatments ($P < 0.05$).

图 1 淹水胁迫下菠萝蜜和面包果幼苗叶片的叶绿素含量

Fig. 1 Chlorophyll content in leaves of jackfruit and breadfruit seedlings under flooding stress

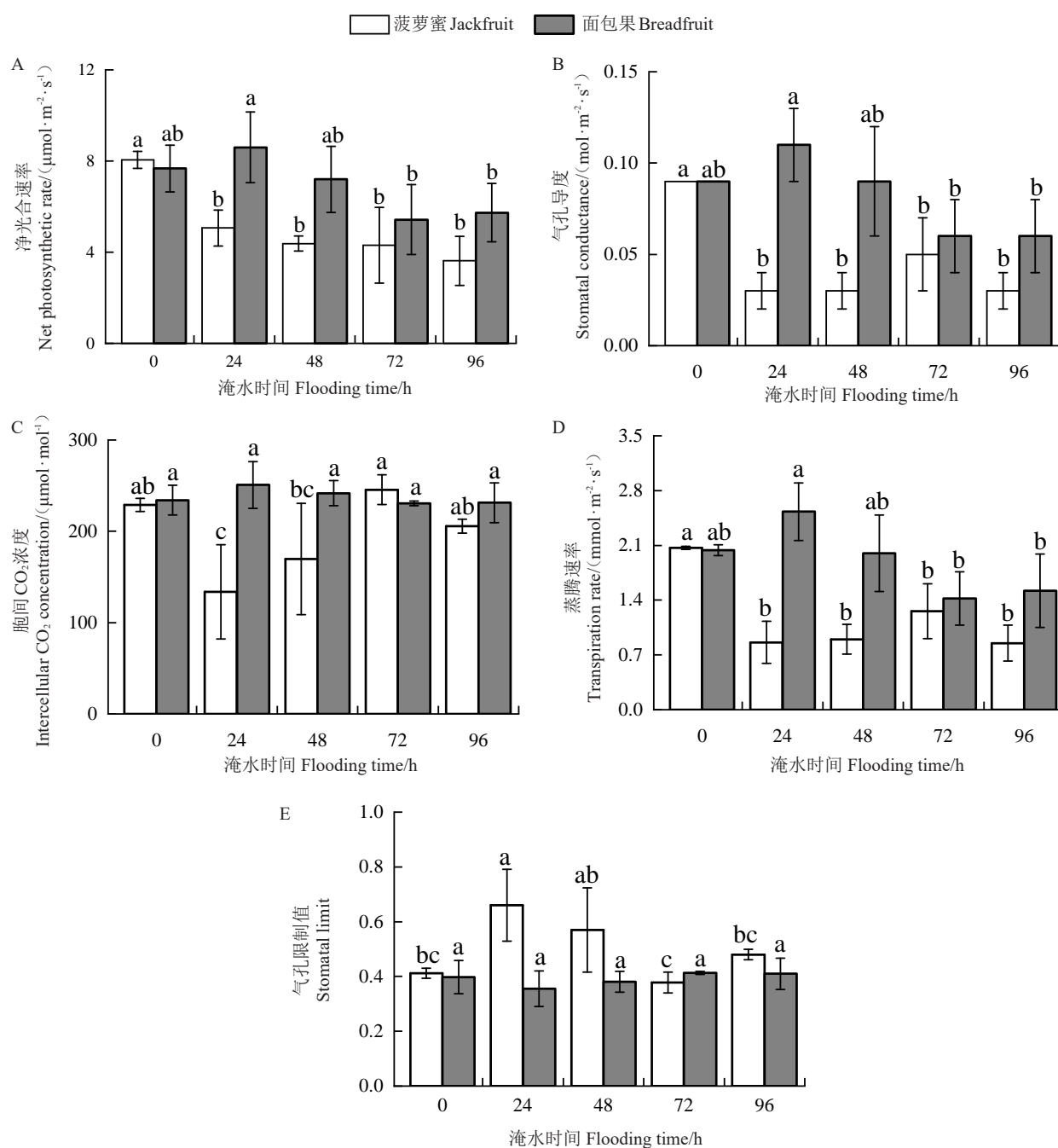
淹水 0 h 分别显著降低 23.64%、78.17%和 31.96%,其他淹水处理与淹水 0 h 无显著差异。

2.3 淹水胁迫对菠萝蜜和面包果幼苗光合特性的影响

随着淹水时间的延长,菠萝蜜叶片的净光合速率较淹水 0 h 分别显著降低 37.09%、45.62%、46.60%和 55.00%,不同淹水处理间差异不显著(图 2-A)。面包果叶片的净光合速率随淹水时间延长呈先升高

后降低再升高的趋势,淹水胁迫 0 h、24 h、48 h 间差异不显著,淹水 72 h 和 96 h 的叶片净光合速率较淹水 24 h 分别显著降低 36.90%和 33.45%。

淹水胁迫对菠萝蜜叶片的气孔导度产生了显著的抑制作用(图 2-B),不同淹水时间处理较淹水 0 h 分别显著降低 61.99%、61.12%、43.26%和 62.83%。面包果叶片的气孔导度随淹水时间延长呈先升高后降低的趋势,淹水 0 h、24 h、48 h 间差异不显著,淹水



不同小写字母表示同一作物的不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different small letters indicate significant difference between different treatments of the same crop ($P < 0.05$). The same below.

图 2 淹水胁迫下菠萝蜜和面包果幼苗叶片的光合参数

Fig. 2 Photosynthetic parameters in leaves of jackfruit and breadfruit seedlings under flooding stress

72 h和96 h的叶片气孔导度较淹水24 h分别显著降低48.49%和43.52%。

菠萝蜜叶片的胞间 CO_2 浓度随淹水时间延长呈先降低后升高再降低的趋势(图2-C),其中淹水24 h较淹水0 h显著降低41.56%,其他淹水处理与淹水0 h无显著差异。淹水胁迫对面包果叶片的胞间 CO_2 浓度影响不显著。

淹水胁迫对菠萝蜜叶片的蒸腾速率产生了显著的抑制作用(图2-D),不同淹水时间处理较淹水0 h分别显著降低58.25%、56.36%、38.98%和59.07%。面包果叶片的蒸腾速率随淹水时间延长呈先升高后降低再升高的趋势,淹水0 h、24 h、48 h间差异不显著,淹水72 h和96 h的叶片蒸腾速率较淹水24 h分别显著降低43.60%和39.93%。

淹水 24 h 处理的菠萝蜜叶片气孔限制值最高 (图 2-E), 较淹水 0 h 显著升高 60.14%, 其他淹水处理与淹水 0 h 无显著差异。不同淹水处理的面包果叶片气孔限制值差异不显著。

2.4 淹水胁迫对菠萝蜜和面包果苗叶片抗氧化酶活性的影响

随着淹水时间的延长, 菠萝蜜叶片的过氧化氢

酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性均呈升高趋势 (图 3); 其中淹水 48 h、72 h 和 96 h 的 CAT 活性较淹水 0 h 分别显著提高 52.06%、139.22% 和 168.52%, POD 活性分别显著提高 38.34%、180.46% 和 159.58%, SOD 活性分别显著提高 28.27%、130.08% 和 147.42%, 而淹水 24 h 的 CAT、POD、SOD 活性与淹水 0 h 无显著差异。

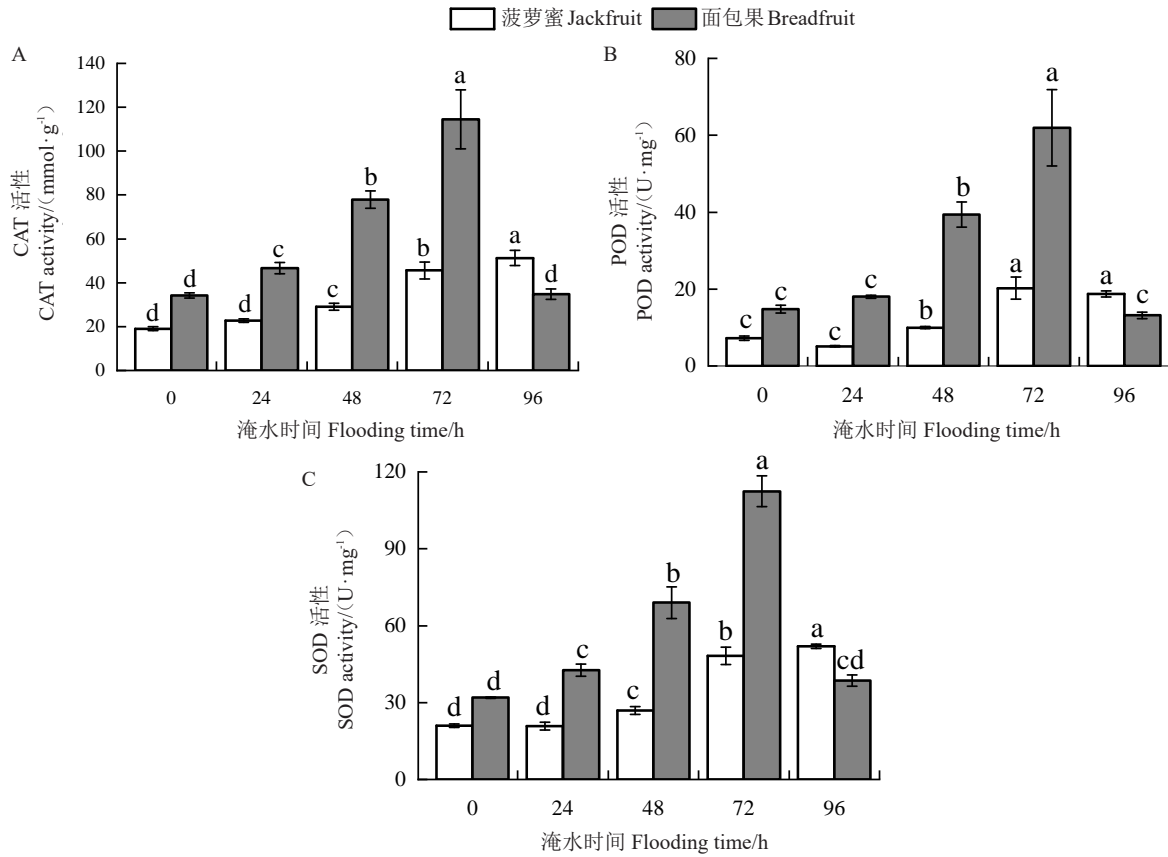


图 3 淹水胁迫下菠萝蜜和面包果幼苗叶片的抗氧化酶活性

Fig. 3 Antioxidant enzyme activity in leaves of jackfruit and breadfruit seedlings under flooding stress

随着淹水时间的延长, 面包果叶片的抗氧化酶活性呈先升高后降低的趋势, 在淹水 96 h 时急剧下降, 与淹水 0 h 无显著差异。淹水 24、48 和 72 h 的 CAT 活性较淹水 0 h 分别显著提高 36.30%、127.50% 和 234.49%, SOD 活性分别显著提高 33.53%、115.87% 和 251.88%。淹水 48 h 和 72 h 的 POD 活性较淹水 0 h 分别显著提高 165.88% 和 317.68%。

2.5 淹水胁迫下生理指标的主成分分析

对各处理组的数据进行耐涝性评价, 将净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)、CAT、POD 和 SOD 活性这 6 个指标进行主成分分析。由表 2 可知, 前 2 个综合指标的方差贡献率分别为 62.47% 和

34.26%, 累计贡献率达 96.73%, 基本包含所测指标的全部信息。因此可提取因子 1 (Y_1) 和因子 2 (Y_2), 其余主成分可忽略不计。由表 3 可知, 因子 1 在 P_n (0.938)、 G_s (0.986) 和 T_r (0.986) 上具有较大的载荷, 归为光合参数; 因子 2 在 CAT 活性 (0.965)、POD 活性 (0.985) 和 SOD 活性 (0.948) 上具有较大的载荷, 归为抗氧化酶活性。

2.6 菠萝蜜和面包果的耐涝性综合评价

2.6.1 利用因子分析法计算综合得分 由表 4 中的因子得分系数矩阵可知, 2 个因子的表达式分别为:

$$Y_1 = 0.325 \times P_n + 0.356 \times G_s + 0.357 \times T_r + 0.023 \times \text{CAT} + 0.112 \times \text{POD} + 0.015 \times \text{SOD};$$

表2 方差分解主成分提取分析

Table 2 Variance decomposition principal component extraction analysis

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			旋转载荷平方和 Rotating of sum of the loads squares			提取载荷平方和 Extract of sum of the loads squares		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Accumulate contribution rate/%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Accumulate contribution rate/%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Accumulate contribution rate/%
1	3.748	62.469	62.469	2.931	48.849	48.849	3.748	62.469	62.469
2	2.056	34.264	96.733	2.873	47.885	96.733	2.056	34.264	96.733
3	0.108	1.794	98.528						
4	0.059	0.990	99.518						
5	0.026	0.438	99.956						
6	0.003	0.044	100.000						

表3 旋转后因子载荷系数

Table 3 Load coefficients of factors after rotation

指标 Index	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2	共同度 Degree of commonality
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.938	-0.231	0.933
气孔导度 Stomatal conductance	0.986	-0.106	0.983
蒸腾速率 Transpiration rate	0.986	-0.096	0.981
过氧化氢酶活性 Catalase activity	-0.222	0.965	0.980
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	0.011	0.985	0.971
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	-0.239	0.948	0.956

表4 因子得分系数矩阵

Table 4 Score coefficients matrix of factors

指标 Index	因子1 Factor 1	因子2 Factor 2
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.325	0.015
气孔导度 Stomatal conductance	0.356	0.068
蒸腾速率 Transpiration rate	0.357	0.072
过氧化氢酶活性 Catalase activity	0.023	0.343
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	0.112	0.376
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	0.015	0.334

$$Y_2 = 0.015 \times P_n + 0.068 \times G_s + 0.072 \times T_r + 0.343 \times \text{CAT} + 0.376 \times \text{POD} + 0.334 \times \text{SOD}。$$

把每个指标的耐涝系数代入到以上2个公式中,可得到菠萝蜜和面包果对应的2个因子的值,再

分别以2个因子所对应的贡献率为各自的权重,从而得到基于因子分析法的菠萝蜜和面包果耐涝性综合评价模型,即加权值计算公式为:

$$Y = (0.488/0.967) \times Y_1 + (0.479/0.967) \times Y_2。$$

将4个淹水时间的菠萝蜜和面包果的 Y_1 、 Y_2 分别代入以上公式,计算综合得分 Y 。由表5的综合得分情况可知,耐涝性排序表现为:面包果-96 h > 菠萝蜜-72 h > 面包果-72 h > 菠萝蜜-96 h > 面包果-48 h > 面包果-24 h > 菠萝蜜-48 h > 菠萝蜜-24 h。

2.6.2 利用隶属函数分析法计算综合得分 将筛选后的评价指标通过隶属函数公式计算出菠萝蜜和面包果的综合评价。由表5的耐涝性综合评价 D 值可知,耐涝性排序表现为:面包果-96 h > 面包果-24 h > 面包果-72 h > 菠萝蜜-72 h > 面包果-48 h > 菠萝蜜-96 h > 菠萝蜜-48 h > 菠萝蜜-24 h。

3 讨论

本研究所用实生苗的种子采自高产稳产母树上结的饱满成熟果实,选取管理措施相同、生长粗度高度基本一致、叶片数相等的幼苗开展淹水胁迫试验,尽可能保证实生苗的一致性。淹水胁迫对作物幼苗生长有抑制作用^[17]。桐花树幼苗在淹水胁迫下会降低根生物量,通过茎和叶生物量分配转移来主动适应淹水胁迫^[18]。与桐花树幼苗的反应不同,淹水胁迫显著改变了菠萝蜜与面包果幼苗的生物量积累。菠萝蜜幼苗在淹水24 h时即表现出地上部干质量下降,而地下部干质量增加,反映了其根系对短期水涝的迅速响应。淹水72 h和96 h的菠萝蜜根冠比显著增加,远高于面包果的根冠比,表明菠萝蜜在长期水涝下更倾向于将光合产物向根系分配,促进菠萝蜜

表5 因子分析法和隶属函数分析法综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation value of factors analysis method and membership function method

处理 Treatment	因子分析法 Factor analysis				隶属函数法 Membership function			
	Y_1	Y_2	Y	排序 Sorting	X_1	X_2	D值 D value	排序 Sorting
菠萝蜜-24 h Jackfruit-24 h	0.611	1.075	0.841	8	0.652	0.379	0.517	8
菠萝蜜-48 h Jackfruit-48 h	0.681	1.539	1.106	7	0.925	0.538	0.733	7
菠萝蜜-72 h Jackfruit-72 h	0.998	2.745	1.864	2	2.059	1.199	1.633	4
菠萝蜜-96 h Jackfruit-96 h	0.817	2.793	1.796	4	1.820	1.060	1.444	6
面包果-24 h Breadfruit-24 h	1.434	1.234	1.335	6	2.272	1.322	1.802	2
面包果-48 h Breadfruit-48 h	1.223	1.502	1.361	5	1.990	1.158	1.578	5
面包果-72 h Breadfruit-72 h	1.130	2.602	1.859	3	2.142	1.247	1.699	3
面包果-96 h Breadfruit-96 h	1.420	3.990	2.693	1	3.315	1.929	2.629	1
权重 Weight	0.505	0.495						

根系的生长和养分吸收,通过调节根吸收来应对淹水胁迫,这与小麦调节根系性状促进根吸收从而应对淹水胁迫带来的影响类似^[19]。然而,随着淹水时间的延长,菠萝蜜的地上部和总干质量呈持续下降趋势,根系仍通过增加生物量响应水涝胁迫。相比之下,面包果幼苗在淹水24 h时,生物量总体呈下降趋势,随着淹水时间延长,生物量逐渐增加,在淹水72 h时达到最大。一些耐涝作物(如水稻)对淹水的适应性主要依赖根系细胞膜的稳定性和无氧呼吸酶活性,这种更强的根系耐受性和代谢能力可能受到淹水诱导的植物激素(如乙烯)信号通路的调控,促进其适应性反应^[20-21],面包果幼苗短期内对淹水胁迫的适应性机制是否与此类似仍有待进一步研究。

叶绿素是植物进行光合作用的重要物质,其含量是植物光合作用效率的重要指标^[22]。淹水胁迫对2种植物叶绿素含量的影响呈现截然不同的趋势。菠萝蜜叶片叶绿素含量呈“先降后升”趋势,与桑树^[23]在淹水胁迫下表现出的恢复能力类似,在短期的淹水胁迫后具备一定的色素调节能力。而面包果叶绿素含量在淹水72 h时显著下降。这一结果与盐胁迫^[11]研究中面包果叶绿素含量较为稳定的结论形成对比,表明不同逆境类型对植物色素代谢的影响机制可能存在差异。在盐胁迫下,面包果可能通过提高叶绿素合成酶活性维持色素稳定,但在淹水胁迫下,缺氧环境可能导致叶绿体发育受阻,叶绿素合

成受到严重影响。面包果在淹水96 h时叶绿素含量恢复至对照水平,表明植物在长期淹水后可能通过激活叶绿素合成酶相关基因的表达实现叶绿素恢复^[24]。然而,菠萝蜜叶绿素含量始终未出现显著下降,表明其叶绿体对淹水胁迫具有一定的应激恢复能力。

淹水胁迫显著抑制了菠萝蜜和面包果的光合作用。菠萝蜜叶片净光合速率(P_n)随淹水时间延长持续下降,降幅达55%,气孔导度(G_s)同步降低,胞间 CO_2 浓度(C_i)在淹水24 h和48 h时下降,与郭燕等^[25]对湿地松的研究结论一致。气孔限制是早期光合抑制的主要因素。即当 C_i 随 G_s 下降而降低时,光合速率下降主要由气孔关闭导致 CO_2 供应不足引起^[26]。然而,在淹水72 h和96 h时,菠萝蜜 C_i 反而上升,气孔限制值(L_s)下降,表明淹水后期非气孔限制成为光合速率下降的主要因素,可能是淹水后期植物的叶绿体类囊体膜结构受损,导致PS II反应中心活性下降,进而抑制光合电子传递效率^[27-29]。而面包果叶片净光合速率(P_n)在淹水24~48 h时未显著下降,甚至在淹水72 h后仍保持较高水平,且 C_i 始终稳定。这表明面包果在淹水初期能够维持气孔开放和叶肉细胞活性,正常利用水分,从而有效缓解光合抑制。此外,面包果在淹水96 h时 P_n 骤降可能与根系功能受损导致的水和二氧化碳运输受阻有关^[30]。在本研究中,面包果在整个淹水胁迫周期中表现出更优的

光合系统稳定性,在初期具备较强的光合响应能力,在后期仍能维持较高的 P_n 和 T_r 水平,反映其光合结构抗逆性更强。

作物在遭受淹水胁迫时,体内活性氧含量不断升高,导致有毒物质不断积累,此时就需要激活抗氧化酶系统来对抗淹水造成的伤害^[31-32]。淹水胁迫下,2种作物均通过提高抗氧化酶活性应对氧化损伤。菠萝蜜叶片的CAT、POD和SOD活性随淹水时间延长持续升高,这与桑树^[33]和玉米^[34]等植物在淹水胁迫下抗氧化酶活性持续升高的模式一致。面包果的抗氧化酶活性呈“先升后降”趋势,这种动态变化模式也在其他耐涝植物如某些油菜突变体中观察到,并与陈怡等^[16]研究淹水胁迫下3种植物的SOD活性变化趋势一致。菠萝蜜和面包果的抗氧化酶活性变化差异可能源于2种作物对淹水胁迫的感知和响应机制不同。菠萝蜜在持续淹水胁迫下仍能维持抗氧化防御,而面包果在短期胁迫时可缓解氧化压力,且对活性氧清除的能力较菠萝蜜更强。

作物的耐涝性受多个因素和指标共同影响,作物对淹水胁迫的响应机制也各不相同,采取多种方法综合分析才能对作物的耐涝性进行客观评价^[35-36]。笔者通过因子分析法和隶属函数法对耐涝性进行综合评价,2种方法均显示面包果的耐涝性明显优于菠萝蜜。因子分析法显示,面包果-96 h的综合得分和D值均为最高,而菠萝蜜-24 h得分最低。长期淹水过后,面包果对淹水胁迫的适应性高于菠萝蜜。综合评价得出,面包果具有更强的耐涝性,对淹水胁迫响应更强。

4 结 论

淹水胁迫对2种菠萝蜜属作物实生苗的生物量、叶绿素含量、光合效率和抗氧化酶活性均有显著的抑制效应。2种作物通过根系吸收、色素调节、稳定光合系统、启动抗氧化酶系统来抵抗淹水胁迫造成的损害,其中,面包果对淹水的适应性高于菠萝蜜。面包果在光合功能维持、生物量稳定性与抗氧化能力方面表现突出,在短期和中期淹水环境中具备更强的适应性,可作为耐涝砧木的优选,而马来西亚1号菠萝蜜则更适合种植于排水良好的区域。

参考文献 References:

[1] 张思懿,崔博文,王佳玲,蔺吉祥,杨青杰. 非生物胁迫下植物

根系的生理与分子响应研究进展[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(10): 2391-2401.

ZHANG Siyi, CUI Bowen, WANG Jialing, LIN Jixiang, YANG Qingjie. Research progress on physiological and molecular responses of plant roots under abiotic stress[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(10): 2391-2401.

[2] 王湘莹,魏溧姣,王晓明,唐丽,乔中全,潘子曦. 淹水胁迫对紫薇苗生长及生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2024(15): 60-66.

WANG Xiangying, WEI Lijiao, WANG Xiaoming, TANG Li, QIAO Zhongquan, PAN Zixi. Effects of flooding stress on growth and physiology characteristics of *Lagerstroemia indica* L. seedlings[J]. Northern Horticulture, 2024(15): 60-66.

[3] 倪天虹,熊婷婷,彭富星,刘松虎. 三个苦瓜品种幼苗对淹水胁迫的适应性研究[J]. 北方园艺, 2024(11): 1-8.

NI Tianhong, XIONG Tingting, PENG Fuxing, LIU Songhu. Adaptation of seedlings of three bitter melon varieties under waterlogging stress[J]. Northern Horticulture, 2024(11): 1-8.

[4] 苏兰茜,白亭玉,谭乐和,赵顺松,吴刚. 氮钾肥对盐胁迫下面包果光合作用和抗氧化系统的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 18-25.

SU Lanxi, BAI Tingyu, TAN Lehe, ZHAO Shunsong, WU Gang. Effects of nitrogen and potassium fertilizer on photosynthesis and antioxidant system of breadfruit under salt stress[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(9): 18-25.

[5] 王晓忠,苏锐,邹梦思,唐文帮,张桂莲. 水稻耐淹性研究进展[J]. 杂交水稻, 2024, 39(3): 12-19.

WANG Xiaozhong, SU Rui, ZOU Mengsi, TANG Wenbang, ZHANG Guilian. Research progress on flooding tolerance in rice[J]. Hybrid Rice, 2024, 39(3): 12-19.

[6] 李文静,朱进,彭玉全,黄兴学,周国林. 淹水胁迫对油菜菜生长、生理和解剖结构的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(10): 2233-2240.

LI Wenjing, ZHU Jin, PENG Yuquan, HUANG Xingxue, ZHOU Guolin. Effects of waterlogging stress on growth, physiology and anatomical structure of *Lactuca sativa* seedlings[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(10): 2233-2240.

[7] 李勇,黄锦,于翠,莫荣利,朱志贤,董朝霞,胡兴明,庄楚雄,邓文. 不同繁育方式的桑树对淹水胁迫的生理生态响应差异[J]. 林业科学, 2022, 58(3): 175-186.

LI Yong, HUANG Jin, YU Cui, MO Rongli, ZHU Zhixian, DONG Zhaoxia, HU Xingming, ZHUANG Chuxiong, DENG Wen. Variation in physiological and ecological responses of mulberry trees with different breeding methods to waterlogging stress[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(3): 175-186.

[8] GRAYSTON S J, WANG S Q, CAMPBELL C D, EDWARDS A C. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(3): 369-378.

[9] 朱炜,龚林忠,王富荣,王会良,刘勇,艾小艳,张杨,郎鹏,史文琦,何华平. 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, WANG Huiliang, LIU Yong, AI Xiaoyan, ZHANG Yang, LANG Peng, SHI Wenqi, HE Huaping. Physiological responses and waterlogging tolerance evaluation of five peach rootstock varieties under waterlogging stress[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(10): 2937-2945.
- [10] 陈锦永, 方金豹, 齐秀娟, 顾红, 林苗苗, 张威远, 魏翠果. 猕猴桃砧木研究进展[J]. 果树学报, 2015, 32(5):959-968.
- CHEN Jinyong, FANG Jinbao, QI Xiujian, GU Hong, LIN Miaomiao, ZHANG Weiyuan, WEI Cuiguo. Research progress on rootstock of kiwifruit[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(5): 959-968.
- [11] 苏兰茜, 白亭玉, 鱼欢, 吴刚, 谭乐和. 盐胁迫对2种菠萝蜜属植物幼苗生长及光合荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(12):2140-2150.
- SU Lanxi, BAI Tingyu, YU Huan, WU Gang, TAN Lehe. Effects of salt stress on seedlings growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of two species of *Artocarpus*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(12):2140-2150.
- [12] 邝伟桦, 史佑海, 靳雅雯, 孙连鹏, 栾军伟. 1956—2020年海南岛极端降水气候及旱雨季变化趋势分析[J]. 热带林业, 2024, 52(1):86-94.
- KUANG Weihua, SHI Youhai, JIN Yawen, SUN Lianpeng, LUAN Junwei. Analysis of the trend of extreme climate and dry and rainy seasons on Hainan Island in the last 65 years(1956-2020)[J]. Tropical Forestry, 2024, 52(1):86-94.
- [13] 吴刚, 白亭玉, 苏兰茜, 胡丽松, 谭乐和. 面包果芽接繁殖技术[J]. 林业科技通讯, 2020(11):74-76.
- WU Gang, BAI Tingyu, SU Lanxi, HU Lisong, TAN Lehe. Bud propagation technology of *Artocarpus altilis*[J]. Forest Science and Technology, 2020(11):74-76.
- [14] BERRY J A, DOWNTON W J S. Environmental regulation of photosynthesis[M]//GOVINDJEE. Photosynthesis. New York: Academic Press, 1982:263-343.
- [15] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- ZHANG Xianzheng. Research methods in crop physiology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992.
- [16] 陈怡, 卞阿娜. 5种园林植物对淹水胁迫的生理响应及耐涝性评价[J]. 天津农学院学报, 2024, 31(5):20-25.
- CHEN Yi, BIAN Ana. Physiological response to waterlogging stress and waterlogging tolerance evaluation of 5 garden plants[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2024, 31(5):20-25.
- [17] 华智锐, 李佳媚, 李小玲. 淹水胁迫对千屈菜幼苗形态和生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(11):112-119.
- HUA Zhirui, LI Jiamei, LI Xiaoling. Effects of waterlogging stress on the morphological and physiological characteristics of *Lythrum salicaria* seedlings[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2025, 53(11):112-119.
- [18] 王冰清, 丁岳炼, 谭家得, 陈杰, 万利鑫, 周建瑛, 王惠芳. 淡水淹水胁迫对桐花树幼苗生长及生理特征的影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41(3):23-29.
- WANG Bingqing, DING Yuelian, TAN Jiade, CHEN Jie, WAN Lixin, ZHOU Jianying, WANG Huifang. Effects of fresh water flooding stress on growth and physiological characteristics of *Aegiceras corniculatum* seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(3):23-29.
- [19] YAMAUCHI T, COLMER T D, PEDERSEN O, NAKAZONO M. Regulation of root traits for internal aeration and tolerance to soil waterlogging-flooding stress[J]. Plant Physiology, 2018, 176(2):1118-1130.
- [20] WANG X, KOMATSU S. The role of phytohormones in plant response to flooding[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(12):6383.
- [21] SU Q, SUN Z Y, LIU Y T, LEI J W, ZHU W X, LIAO N Y. Physiological and comparative transcriptome analysis of the response and adaptation mechanism of the photosynthetic function of mulberry (*Morus alba* L.) leaves to flooding stress[J]. Plant Signaling & Behavior, 2022, 17(1):2094619.
- [22] MEGHWAL M L, JYOTHI M L, PUSHPALATHA P B, BHASKAR J, BEENA V I, THULASI V. Influence of nutrient sources on chlorophyll content and other leaf parameters of banana *Musa* (AAB) nendran[J]. Agricultural Science Digest, 2024, 44(1):118-121.
- [23] 曾燕蓉, 邱长玉, 陆晓媚, 黄胜, 刘丹, 朱光书, 张朝华, 石华月, 莫荣利, 林强. 桑树受干旱或盐胁迫后顶端嫩叶的叶绿素含量和光合特性变化初步研究[J]. 广西蚕业, 2024, 61(1):7-13.
- ZENG Yanrong, QIU Changyu, LU Xiaomei, HUANG Sheng, LIU Dan, ZHU Guangshu, ZHANG Chaozhua, SHI Huayue, MO Rongli, LIN Qiang. A preliminary study on the changes of chlorophyll content and photosynthetic characteristics of apical young leaves of mulberry trees after drought or salt stress[J]. Guangxi Sericulture, 2024, 61(1):7-13.
- [24] DING L N, LIU R, LI T, LI M, LIU X Y, WANG W J, YU Y K, CAO J, TAN X L. Physiological and comparative transcriptome analyses reveal the mechanisms underlying waterlogging tolerance in a rapeseed anthocyanin-more mutant[J]. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 2022, 15(1):55.
- [25] 郭燕, 沈雅飞, 程瑞梅, 肖文发, 杨邵, 王丽君. 水淹持续胁迫对湿地松光合特性及生理生化的影响[J]. 林业科学研究, 2021, 34(2):141-148.
- GUO Yan, SHEN Yafei, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, YANG Shao, WANG Lijun. Effects of continuous flooding stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical characteristics of *Pinus elliottii*[J]. Forest Research, 2021, 34(2):141-148.
- [26] HATAMI E, ESNA-ASHARI M, JAVADI T. Effect of salinity on some gas exchange characteristics of grape (*Vitis vinifera*) cultivars[J]. International Journal of Agriculture and Biology,

- 2010, 12:308-310.
- [27] XU Z Y, SHEN Q F, ZHANG G P. The mechanisms for the difference in waterlogging tolerance among sea barley, wheat and barley[J]. *Plant Growth Regulation*, 2022, 96(3):431-441.
- [28] RAO L Y, LI S Y, CUI X. Leaf morphology and chlorophyll fluorescence characteristics of mulberry seedlings under waterlogging stress[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11:13379.
- [29] 米华玲, 朱新广. 光合电子传递及其改善[J]. *生命科学*, 2024, 36(9):1168-1174.
- MI Hualing, ZHU Xinguang. Photosynthetic electron transports and their improvements[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2024, 36(9):1168-1174.
- [30] 王巧, 刘秀梅, 王华田, 孟先鹏, 曹桂萍, 李健, 黄昌豹. 干旱和水涝胁迫对幼龄油松生长及光合作用的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6):40-47.
- WANG Qiao, LIU Xiumei, WANG Huatian, MENG Xianpeng, CAO Guiping, LI Jian, HUANG Changbao. Effects of drought and waterlogging on growth and photosynthesis of potted young *Pinus tabulaeformis* Carr.[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(6):40-47.
- [31] 黄晓玲, 詹咪莎, 王晓雨, 朱向涛. 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, ZHU Xiangtao. Physiological and biochemical characteristics of different peony varieties under waterlogging stress[J]. *Northern Horticulture*, 2025(9):95-103.
- [32] 李琬, 李博, 项洪涛, 何宁, 王曼力, 刘佳. 淹水胁迫及外源脱落酸对红小豆幼苗茎部生理及产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(7):48-56.
- LI Wan, LI Bo, XIANG Hongtao, HE Ning, WANG Manli, LIU Jia. Effects of waterlogging stress and exogenous abscisic acid on stem physiology and yield of adzuki bean seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(7):48-56.
- [33] 邓文, 莫荣利, 李勇, 于翠, 朱志贤, 胡兴明. 淹水胁迫对桑树生长及生理特性的影响[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(23):4559-4563.
- DENG Wen, MO Rongli, LI Yong, YU Cui, ZHU Zhixian, HU Xingming. Effects of flooding stress on seedlings growth and physiological characteristics of mulberry[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(23):4559-4563.
- [34] 张冬梅. 拔节期淹水对玉米生理特性的影响[J]. *中国农业文摘-农业工程*, 2022, 34(3):65-68.
- ZHANG Dongmei. Effects of flooding at jointing stage on physiological characteristics of maize[J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2022, 34(3):65-68.
- [35] 徐丽, 王红, 陈文霞. 7种园林植物耐涝性综合评价研究[J]. *安徽农学通报*, 2024, 30(3):44-47.
- XU Li, WANG Hong, CHEN Wenxia. Study on comprehensive evaluation of waterlogging tolerance of seven garden plants[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2024, 30(3):44-47.
- [36] 叶康, 陈伯祥, 杜习武, 秦俊, 曾丽, 胡永红. 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, QIN Jun, ZENG Li, HU Yonghong. Response to waterlogging stress and evaluation of waterlogging tolerance of three *Yulania* materials[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(6):940-947.