

木薯新选048自交系采后生理腐烂(PPD)抗性评价 及其生理变化分析

黄珍玲¹, 阮丽霞¹, 严华兵², 王天亮³, 阮孟斌⁴, 何观咏¹, 梁振华¹, 李恒锐¹, 杨海霞¹, 李文彬⁴,
蔡兆琴¹, 邓清文³, 黄若兰¹, 兰秀¹, 张秀芬¹, 郭素云¹, 何文¹, 莫周美¹, 李天元¹, 韦婉玲¹

(¹广西南亚热带农业科学研究所, 崇左 532415; ²广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所, 南宁 530007;

³广西大学农学院, 南宁 530000; ⁴中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海口 571101)

摘要:“采后生理腐烂”(PPD, postharvest physiological deterioration)严重制约木薯商品化进程。本研究以木薯新选048自交系的166个种质为研究对象, 观察评价木薯块根采后贮藏0 d、6 d、12 d、18 d、24 d和30 d的生理腐烂程度, 并取样测定块根的相关生理指标。结果显示, X045、X126、X077、X088和X147出现褐化时间较晚, 且于贮藏第30 d褐化面积均小于10%(PPD一级), 耐贮性较好; 而X024、X062、X085、X100和X133出现褐化时间较早, 贮藏24 d时褐化面积均达50%以上, 30 d褐化面积达100%(PPD六级), 耐贮性差; 这些种质可作为木薯耐贮性育种的优异资源。耐贮藏种质干物质和淀粉含量较低, β -胡萝卜素含量较高。MDA含量、抗氧化酶(SOD、CAT、POD)活性在贮藏后期显著上升, 不耐贮藏种质酶活性增幅更大。相关性分析表明, 种质褐化面积与干物质含量、淀粉含量、POD酶活性极显著正相关, 与SOD和CAT酶活性、MDA含量显著正相关, 与 β -胡萝卜素含量显著负相关。可见, 木薯块根干物质含量、淀粉含量高的种质较容易发生采后生理腐烂, PPD抗性差。研究结果为木薯耐贮性育种、抗PPD机制解析奠定基础, 对于木薯壮大发展具有重要意义。

关键词: 木薯; 自交系; 耐贮性; 采后生理腐烂

Evaluation of Postharvest Physiological Deterioration (PPD) Resistance and Analysis of Physiological Changes in Cassava Cultivar Xinxuan 048 Inbred Lines

HUANG Zhenling¹, RUAN Lixia¹, YAN Huabing², WANG Tianliang³, RUAN Mengbin⁴, HE Guanyong¹,
LIANG Zhenhua¹, LI Hengrui¹, YANG Haixia¹, LI Wenbin⁴, CAI Zhaoqin¹, DENG Qingwen³, HUANG Ruolan¹,
LAN Xiu¹, ZHANG Xiufen¹, GUO Suyun¹, HE Wen¹, MO Zhoumei¹, LI Tianyuan¹, WEI Wanling¹

(¹Guangxi South Subtropical Agricultural Science Research Institute, Chongzuo 532415; ²Cash Crops Research Institute,
Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007; ³College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530000;

⁴Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101)

Abstract: Postharvest physiological deterioration (PPD) poses a significant constraint to the commercialization of cassava. In this study, we evaluated 166 germplasms from Xinxuan 048 (XX048) inbred cassava line. The degree of tuber decay was assessed at 0, 6, 12, 18, 24 and 30 days postharvest, with corresponding physiological indicators measured. The results showed that X045, X126, X077, X088, and X147

收稿日期: 2024-12-14 网络出版日期: 2025-03-31

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241214001>

第一作者研究方向为木薯新品种选育与逆境生理机理, E-mail: 675095618@qq.com; 阮丽霞为共同第一作者

通信作者: 李天元, 研究方向为作物逆境调控, E-mail: 1650204803@qq.com

韦婉玲, 研究方向为木薯逆境生理与遗传育种, E-mail: hxxx1991@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1600601); 广西自然科学基金(2024GXNSFBA010406, 2024GXNSFAA010006); 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科 2023YM27, 桂农科 2023YM28, 桂农科 2021YT157)

Foundation projects: National Key Research and Development Program Project of China (2023YFD1600601); Guangxi Natural Science Foundation (2024GXNSFBA010406, 2024GXNSFAA010006); Guangxi Academy of Agricultural Sciences Basic Research Business Special Project (Guinongke 2023YM27, Guinongke 2023YM28, Guinongke 2021YT157)

browning occurred later. Notably the browning areas in the five germplasms remained below 10% (PPD Grade 1) by 30 day, indicating superior storage tolerance. In contrast, X024, X062, X085, X100, and X133 showed browning occurred earlier. After 24 days, the browning area in these germplasms exceeded 50%, and reaching 100% (PPD Grade 6) by 30 day, demonstrating their poor storage tolerance. These germplasms can serve as excellent resources for storage tolerance cassava breeding. Starch and dry matter contents are lower in storable germplasms, while β -carotene content is higher. MDA content and antioxidant enzyme (SOD, CAT, POD) activities increase significantly in the late storage phase, and greater increments in non-storable germplasms. Correlation analysis showed that the browning area was positively correlated with dry matter content, starch content and POD enzyme activity, while also showing positive associations with SOD and CAT enzyme activity as well as MDA content. Conversely, a negative correlation was observed with β -carotene content. These results suggest that cassava tubers with high dry matter content and starch content are more susceptible to postharvest decay and exhibit weak PPD resistance. This study provides valuable data for investigating the mechanisms underlying PPD resistance in cassava and supports the breeding of PPD-resistant varieties. The identified germplasms offer a foundation for further research on storage tolerance, PPD resistance mechanisms, and cassava breeding program. These findings hold significant implications for cassava cultivation and postharvest management.

Key words: cassava; inbred line; storability; postharvest physiological deterioration (PPD)

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 是大戟科木薯属植物, 块根富含淀粉, 与马铃薯、甘薯并称为三大薯类, 是全球第六大粮食作物^[1]。作为一种重要的粮食作物和能源作物, 木薯广泛种植于世界热带和亚热带地区, 是非洲、拉丁美洲、大洋洲和亚洲超过 9 亿人的主要碳水化合物来源^[2-3]。在我国广西、海南和广东等地区, 木薯不仅是重要的食用和饲用作物, 还是一种极具发展潜力的绿色能源作物, 在乙醇燃料等生物质能的开发和利用中占据重要地位。可见, 木薯具有多维价值, 是连接粮食安全、工业转型与低碳经济的重要战略资源。然而, 木薯块根极不耐贮藏, 通常在收获后 24~72 h 内发生褐化变质, 直至腐烂, 这种现象被称为木薯特有的“采后生理腐烂” (PPD, postharvest physiological deterioration)^[4]。采后生理腐烂导致木薯贮存期缩短, 严重影响其品质和商品价值, 从而制约了木薯大量上市供应及产后的综合利用^[5-6]。据不完全统计, 每年因采后生理腐烂导致的新鲜木薯块根损失约占全球总产量的三分之一^[6-7]。2021 年全球因采后生理腐烂造成的直接经济损失高达 330 亿元, 成为限制木薯作为粮食和工业作物潜力的主要因素^[8-9]。据统计, 若木薯的储存期限能够延长至 45 d, 泰国每年将额外实现至少 3500 万美元的经济收益, 而在木薯的主要产区非洲, 延长木薯保质期的经济效益预计将更为显著^[6]。因此, 解析木薯块根采后生理腐烂的发生机制并选育优异抗性木薯种质, 已成为木薯产业发展亟待解

决的关键科学问题。

采后生理腐烂通常是由收获时的机械损伤、环境因子和微生物侵染共同作用引起的植物非生物逆境胁迫反应, 可导致其品质、生理生化特性以及防御反应系统等发生显著改变^[4]。研究表明, 采后生理腐烂是一个多维度的复杂内源性过程, 涉及活性氧 (ROS, reactive oxygen species) 的爆发、酶在应对损伤时的应激反应、特异基因的激活表达、次级代谢物质积累等^[10-11]。据报道, 木薯干物质含量和淀粉特性对采后生理变质有显著影响, 块根中含有的干物质和淀粉含量越高, 越容易变质^[12-13]。而蜡质淀粉品种 (系) 及高类胡萝卜素含量种质则表现出更强的抗腐烂特性^[14-16]。此外, 次生代谢物在采后生理腐烂调控中呈现双重作用: 采后 2~3 d, 木薯块根中茛菪亭、茛菪苷等有色化合物的迅速积累易引发褐变现象^[17-18]; 而木质素与类黄酮等次生代谢物质的积累, 在一定程度可延缓木薯块根采后生理腐烂发生^[8-9]。现有研究提出了多种干预策略用于减缓采后生理腐烂发生, 如外源乙烯利 (ETH, ethephon)^[5] 和外源脱落酸 (ABA, abscisic acid)^[19] 处理木薯块根, 可有效激活活性氧清除系统并抑制多酚氧化酶活性进而延缓木薯采后生理腐烂; 在木薯块根喷洒壳聚糖可促进块根伤口愈合及诱导抗病性来延缓木薯块根采后生理腐烂速度^[20]; 在木薯中表达鸡蛋清溶菌酶 (HEWL, hen egg-white lysozyme) 以抑制多酚氧化酶的活性^[21]、过表达

MeSCL33 促进 *MeABAI* 高表达进而导致 ABA 水平升高以抑制活性氧产生,从而达到延缓木薯采后生理腐烂发生的目的^[22]。尽管前人对木薯块根采后生理腐烂发生的影响因素、分子机理、延缓采后生理腐烂发生的调控机制以及贮藏保鲜技术进行了大量研究。然而,目前研究仍存在局限性,采后生理腐烂核心诱因尚未完全解析,现有防控技术成本高或操作复杂,且耐贮藏种质资源严重匮乏,导致鲜薯货架期短,严重制约木薯产业链发展。

高产、优质、高抗木薯种质的创制,有望从源头上解决木薯块根采后生理腐烂问题。自交育种是木薯新种质创建的重要途径^[23],木薯作为典型的高度杂合二倍体作物,其自交后代因隐性基因纯合可产生丰富的基因变异和表型多样性^[1],为抗逆性状筛选提供遗传基础。新选048为广西大学选育的木薯新品种,具有种茎发芽快、发芽整齐、长势旺、结薯多、薯块大、结薯集中、块根肉质淡黄色、容易收获、适应性强、丰产性好等优良特性^[24],且自交系群体在表型和基因型上均有较大程度的遗传变异^[25],是构建自交系群体的理想材料。但关于新选048自交系的耐贮特性以及子代群体中采后生理腐烂抗性的遗传调控机制尚未明确。本研究以木薯新选048自交系166个种质为试验材料,比较各种质间的采后生理腐烂抗性,并筛选出采后较耐贮藏和不耐贮藏的种质各5个,比较研究10个种质贮藏期间块根的生理指标变化情况,旨在筛选耐贮藏优良材料、探讨块根采后生理腐烂与生理特性的相关性,为耐贮藏品种的选育及抗逆遗传特性研究提供材料基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2019年3月将亲本新选048木薯隔离种植在广西壮族自治区龙州县北耀木薯育种基地,使其自花授粉,2019年12月收获自交果实,并将其放置于常温室室内保存。2020年3月初将收获的种子进行催芽、播种,4月下旬将其种植并保存在广西南亚热带农业科学研究所木薯试验地,分别编号为X001~X166。2021年2月初收获种茎并采用露天堆放法保存于地头约1.5月。2021年3月下旬,将木薯自交系后代材料种植在广西南亚热带农业科学研究所试验基地。每个种质单排种植,各种植10株,株行距为80cm×100cm。木薯种植全生育期不施用肥料,常规田间管理。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 2021年12月下旬(木薯块根成熟期)人工收获全部木薯自交系块根,每份种质选取薯形均匀、大小相近、外表皮没有破损且无病虫害的块根,贮藏于自然通风条件良好和阴凉的室内。以采收当天的时间点标记为0d,并分别在贮藏期的0d、6d、12d、18d、24d和30d选取每个种质3条块根观察评估其采后耐贮性情况。每条块根在两端近10cm处各切一个厚度约1cm的切片,观察记录其褐变情况。每个种质选取大小相近的块根9条,每条块根取其中部样品约100g,并切成约0.2cm薄片后混合均匀,均分成6份;其中,3份立即用液氮速冻后保存于-80℃超低温冰箱,用于生理生化指标测定;另外3份烘干至恒重后保存在干燥器中,用于干物质含量测定。待整个贮藏期对块根的褐变情况评估完毕后,从166个种质中分别选取最耐贮藏和最不耐贮藏的种质各5个,测量其在0d、6d、12d、18d、24d和30d的干物质含量、淀粉含量和β-胡萝卜素含量等生理指标变化。

1.2.2 木薯块根采后生理腐烂发生程度评估 采用国际热带作物研究中心(CIAT, The International Center for Tropical Agriculture)建立的目测法^[17,20],即根据木薯切片中褐化面积所占总切面的百分比,将采后生理腐烂发生程度划分为6个等级:完好,为没有任何褐化情况发生;一级腐烂,为褐化面积占总切面的10%及以下;二级腐烂,为11%~20%;三级腐烂,为21%~40%;四级腐烂,为41%~60%;五级腐烂,为61%~80%;六级腐烂,为81%~100%。

1.2.3 块根生理指标测定 干物质含量:采用烘干法测定,取100g左右块根薄片置于信封中,80℃烘箱中杀青15min、65℃烘干至恒重^[26]。淀粉含量:称取约0.05g块根干样,参照淀粉含量试剂盒(蒽酮比色法)(苏州格锐思生物科技有限公司)说明书进行测定。丙二醛(MDA, malondialdehyde)含量、超氧化物歧化酶(SOD, superoxide dismutase)活性、过氧化物酶(POD, peroxidase)、过氧化氢酶(CAT, catalase)活性:每个指标测定时均称取约0.1g块根鲜样,分别参照丙二醛(MDA)试剂盒、超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒-WST-8法、过氧化氢酶(CAT)试剂盒和过氧化物酶(POD)试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)说明书处理并测定。β-胡萝卜素含量采用高效液相色谱法(HPLC, high performance liquid chromatography):称取约0.2g块根鲜样,加入1mL的石油醚:丙酮混合溶剂(V:V=2:3),将样品研

磨粉碎后,置于超声波中处理 30 min,12000 r/min 离心 5 min,重复提取 2 次,直到提取液无色,合并提取液后,用氮气吹干,1 mL 甲醇复溶,经 0.22 μm 滤膜过滤后,得待测液;测定条件为流动相甲醇:异丙醇(70:30),检测波长 450 nm,柱温 $40^{\circ}\text{C}\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,进样量 10 μL ,流速 1 mL/min。块根生理指标测定每个种质均设 3 个生物学重复。

1.3 数据分析

使用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,应用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验;褐化面积以百分数表示,利用反正弦平方根转化(Arcsine square root transformation)将百分数进行转换^[15],用 Pearson 法对 10 个自交系块根褐化面积(24 d)与各生理指标进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 木薯块根采后耐贮性差异比较

通过对新选 048 木薯自交系 166 个种质块根采后贮藏期间腐烂程度的评估,发现不同种质间存在差异,并通过目测法筛选了较耐贮藏和不耐贮藏的种质各 5 个,详见表 1 和图 1。其中,编号 X077、X088、X147 三个种质在 30 d 时开始发生褐化,褐化面积为 5%,X045 和 X126 在贮藏 24 d 时开始褐化,褐化面积分别为 10% 和 5%,以上 5 个种质采后生理腐烂等级维持一级,较抗采后生理腐烂、耐贮性好。编号 X024 和 X100 从贮藏第 12 d 开始出现不同程度的褐变现象,X062、X085、X133 贮藏第 18 d 开始出现不同程度的褐变现象,第 24 d 整个块根基本全部

褐化,并被微生物侵染,贮藏 30 d 块根严重腐烂,表明以上 5 个种质采后块根容易发生采后生理腐烂、耐贮性差。

2.2 木薯块根采后贮藏期间生理指标含量变化

2.2.1 干物质含量 木薯块根采后贮藏期间干物质含量呈现时序波动与种质特异性差异(图 2)。随着贮藏时间延长,10 个木薯自交系块根干物质含量呈先下降后上升的变化趋势,块根采收后 0~6 d 干物质含量快速下降,6 d 后逐步回升。贮藏初期(0~6 d),各种质的干物质降幅差异较大,为 5.58%~19.68%。其中,X126、X088、X147 降幅较大,分别为 19.68%、17.98% 和 13.27%,X062 和 X133 降幅较小,分别为 5.89% 和 5.58%。贮藏 0 d 时,干物质含量最高的种质为 X100,显著高于其他 9 个种质;干物质含量较低的种质为 X077 和 X088,显著低于除 X126 和 X147 以外的其他种质。贮藏 6 d,干物质含量最高的为 X100,最低的是 X088,其中,X100 干物质含量显著高于其他种质。贮藏 24 d,10 个木薯自交系块根干物质含量由高到低排序依次为 X100>X062>X024>X133>X085>X045>X147>X126>X077>X088;其中,干物质含量最高的依旧为 X100,最低的是 X088,两者间差异显著。X100 在贮藏期内全程维持高干物质含量,且显著高于其他品种。整体上看,各贮藏时期较耐贮藏种质(X045、X077、X088、X126、X147)的干物质含量普遍低于较不耐贮藏种质(X024、X062、X085、X100、X133)。由此可见,越容易发生采后生理腐烂的种质,其块根干物质含量的越高。

表 1 木薯自交系块根采后贮藏期间腐烂程度
Table 1 Rotting degree of cassava inbred line tubers postharvest

种质 Germplasm	0 d		6 d		12 d		18 d		24 d		30 d	
	褐化面积	PPD	褐化面积	PPD	褐化面积	PPD	褐化面积	PPD	褐化面积	PPD	褐化面积	PPD
	(%)	等级	(%)	等级	(%)	等级	(%)	等级	(%)	等级	(%)	等级
	Browning area	PPD grade	Browning area	PPD grade	Browning area	PPD grade	Browning area	PPD grade	Browning area	PPD grade	Browning area	PPD grade
X045	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	10	一级	10	一级
X077	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	5	一级
X088	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	5	一级
X126	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	5	一级	5	一级
X147	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	0	完好	5	一级
X024	0	完好	0	完好	5	一级	45	四级	90	六级	100	六级
X062	0	完好	0	完好	0	完好	20	二级	50	四级	100	六级
X085	0	完好	0	完好	0	完好	5	一级	85	六级	100	六级
X100	0	完好	0	完好	20	二级	55	四级	95	六级	100	六级
X133	0	完好	0	完好	0	完好	5	一级	60	四级	100	六级

PPD: Postharvest physiological deterioration; The same as below

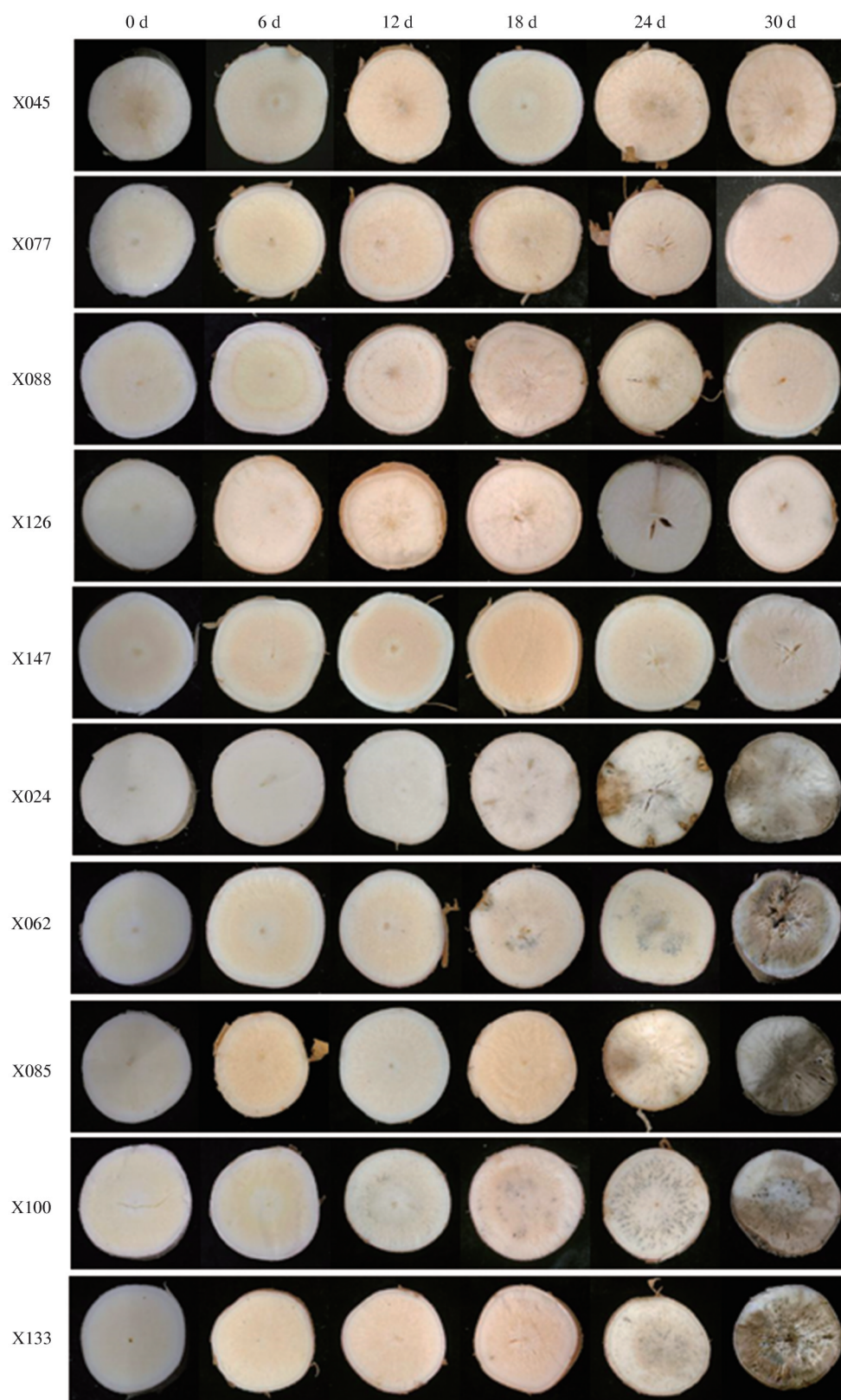
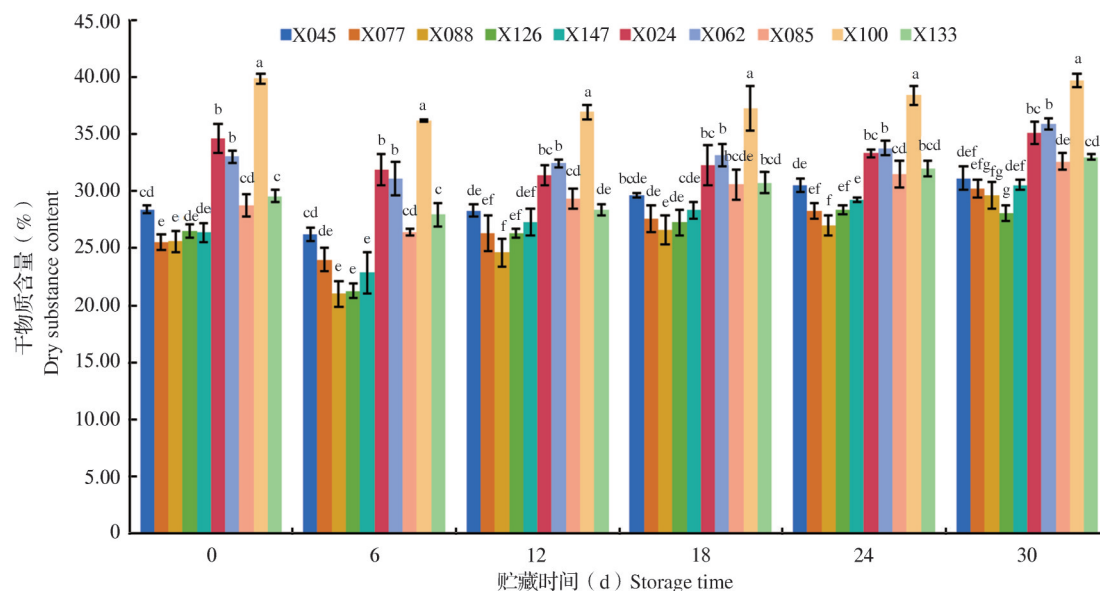


图1 木薯块根采后贮藏期间腐烂程度对比

Fig. 1 Comparison of rotting degree in cassava tubers during postharvest storage



同一贮藏时间不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Different lowercase letters at the same storage time indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$), the same as below

图2 木薯自交系块根采后贮藏期间干物质含量变化

Fig. 2 Dry matter content of cassava tubers during the period of storage

2.2.2 淀粉含量 由图3可知,随着贮藏时间的延长,10个木薯自交系块根淀粉含量呈先上升后下降的变化趋势,贮藏6d达到峰值。贮藏0d,淀粉含量最高值出现在X100,显著高于除X024外的其他种质;最低值出现在X147,其含量显著低于除X126外的其他种质。贮藏6d时,所有种质淀粉含量较0d均升高,其中X100增幅最大(10.51%),为10个种质中最高;X045增幅最小(2.08%),为10个种质中最低值。贮藏24d,10个木薯自交系块根淀粉含量由高到低排序依次为X100>X024>X062>X133>

X085>X088>X077>X045>X126>X147。X100在贮藏期间虽表现出较大波动(6~30d降幅为21.95%),但其淀粉含量全程最高,30d时仍比次高种质X062高6.97%。相反,X147的含量始终最低,贮藏30d较峰值(贮藏6d)下降24.18%,X100和X147两者间差异显著。整体而言,各贮藏时期较耐贮藏种质(X045、X077、X088、X126、X147)淀粉含量普遍低于较不耐贮藏种质(X024、X062、X085、X100、X133),说明木薯块根淀粉含量越高的种质越容易发生采后生理腐烂。

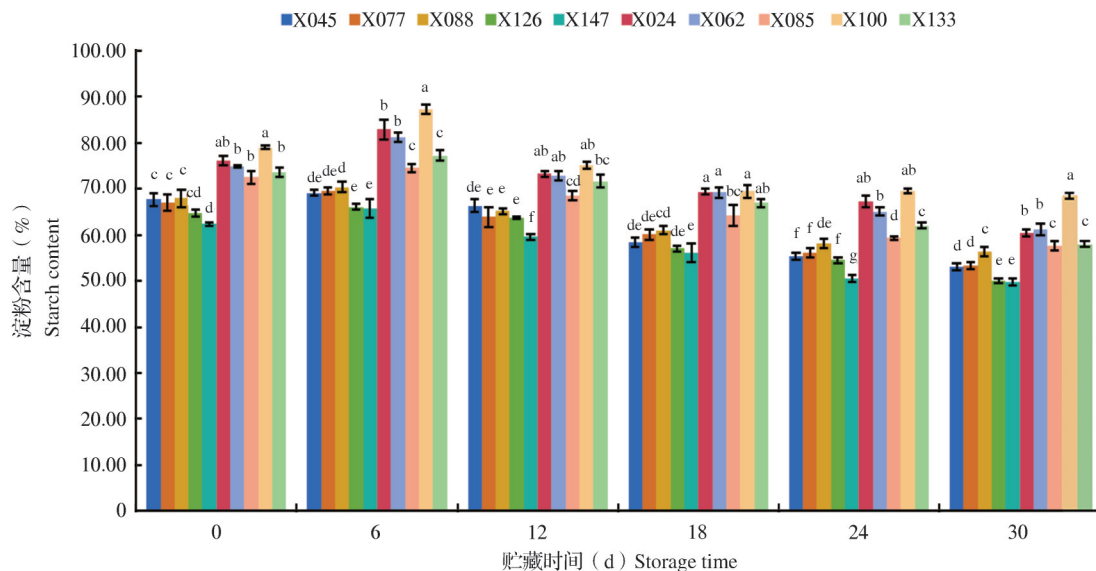


图3 木薯自交系块根采后贮藏期间淀粉含量变化

Fig. 3 Starch content of cassava tubers during the period of storage

2.2.3 β -胡萝卜素含量 由图 4 可知,随着贮藏时间的延长,10 个木薯自交系块根在贮藏过程中 β -胡萝卜素含量变化存在差异。X045、X077、X088 和 X126 的 β -胡萝卜素含量呈先上升后下降再上升的趋势;X147 和 X024 整体呈不断上升的趋势;X085、X100 和 X133 呈先上升后下降的趋势;X062 呈上升-下降-上升-下降的波动变化趋势。贮藏初期(0~6 d)所有种质含量均上升,其中 X077、X100 和 X088 增幅较大,分别增加 72.50%、69.20% 和 66.70%;而 X024 和 X062 变化幅度分别为 0.55% 和 2.66%,变化幅度较小。贮藏中期(12~24 d),X024、X085、X147

仍保持上升趋势,其中 X085 在 24 d 达峰值,是初始值的 2.09 倍;X133 和 X100 分别在 12 d、18 d 达到峰值,24 d 时较峰值分别下降 12.62% 和 19.90%。贮藏末期(30 d),X100、X133、X062 较 24 d 进一步下降,X077、X088、X045 在 30 d 达到峰值,且显著高于其他种质。可见,木薯 β -胡萝卜素含量代谢动态呈现一定的时间阶段性与种质特异性差异。此外,除 X100 和 X133 外,各贮藏时期较耐贮藏种质(X045、X077、X088、X126、X147) β -胡萝卜素含量高于较不耐贮藏种质(X024、X062、X085),说明木薯块根 β -胡萝卜素含量高的种质越不容易发生采后生理腐烂。

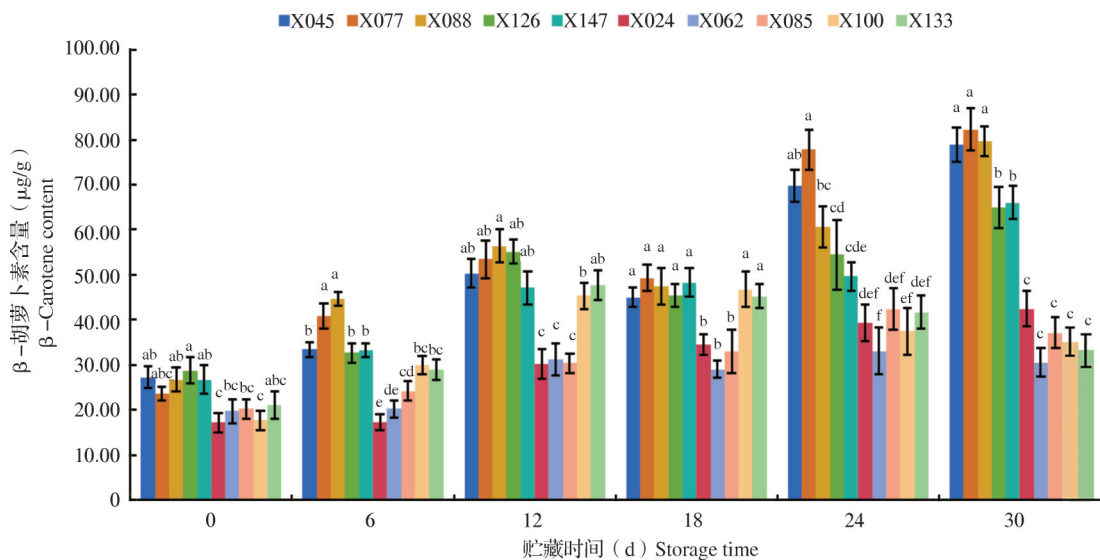


图 4 木薯自交系块根采后贮藏期间 β -胡萝卜素含量变化

Fig. 4 Beta-carotene content of cassava tubers during the period of storage

2.2.4 MDA 含量 由图 5 可知,随着贮藏时间的延长,块根中 MDA 含量整体上呈上升趋势。其中,X088、X126、X024 和 X100 块根中 MDA 含量持续增长,至贮藏 30 d 达到峰值;X045 先上升后下降,但 6~30 d 各时期均高于贮藏 0 d。X147 的 MDA 含量在贮藏 18 d 时最高,是 0 d 的 1.29 倍,X045 的 MDA 含量在贮藏 24 d 时达到峰值,是 0 d 的 1.44 倍。X085、X100、X133 在贮藏 18~30 d MDA 含量急剧上升,24 d 时分别为 0 d 的 2.00 倍、2.13 倍、1.71 倍。贮藏 24 d,除 X062 的 MDA 含量略微低于 X045 外,X024、X085、X100、X133 的 MDA 含量均高于 X045、X077、X088、X126、X147;贮藏 30 d,X024、X062、X085、X100、X133 的 MDA 含量均高于 X045、X077、X088、X126、X147。贮藏 30 d 种质 X045、X077、X088、X126、X147 以及 X024、X062、X085、X100、X133 的 MDA 含量较贮藏 0 d 分别上升 36.97%、60.00%、104.92%、52.96%、25.56%、112.42%、116.97%、

135.04%、179.79% 和 149.01%。由此可知,各种质 MDA 含量在贮藏后期(30 d)明显上升,其中不耐贮藏种质尤其是 X085、X100、X133 的 MDA 含量上升幅度大,且普遍高于耐贮藏种质。

2.2.5 SOD 活性 由图 6 可知,木薯自交系采后贮藏期间 SOD 活性变化有差异,X045 和 X077 呈现下降-上升-下降-上升的波动变化趋势,其他种质均呈现先下降后上升的变化趋势。所有种质在贮藏第 30 d 达到峰值。贮藏 0 d,SOD 活性由高到低排序依次为 X045>X077>X126>X024>X133>X147>X088>X085>X100>X062。贮藏 6 d,X147 的 SOD 活性最高,X133 次之,X100 最低;贮藏 12 d,除 X147 含量低于 X133 外,X045、X077、X088、X126 均高于 X024、X062、X085、X100、X133 这 5 个种质。贮藏 18~30 d,较不耐贮藏种质(X024、X062、X085、X100、X133)的 SOD 活性整体而言高于较耐贮藏种质(X045、X077、X088、X126、X147),且与贮藏 0~

12 d 相比, 5 个较不耐贮藏种质的 SOD 活性大幅上升。其中, 贮藏 24 d 时, SOD 活性由高到低排序依次为 X062>X085>X133>X100>X024>X147>X126>X088>X045>X077。贮藏 24 d 时, X045、X077、X088、X126、X147、X024、X062、X085、X100、X133

的 SOD 活性分别是 0 d 的 1.34 倍、1.31 倍、1.77 倍、1.58 倍、1.74 倍、1.73 倍、2.59 倍、2.37 倍、2.27 倍、1.83 倍。可见, 贮藏后期, 不耐贮藏种质(X024、X062、X085、X100、X133) SOD 活性明显上升, 且普遍高于较耐贮藏种质(X045、X077、X088、X126、X147)。

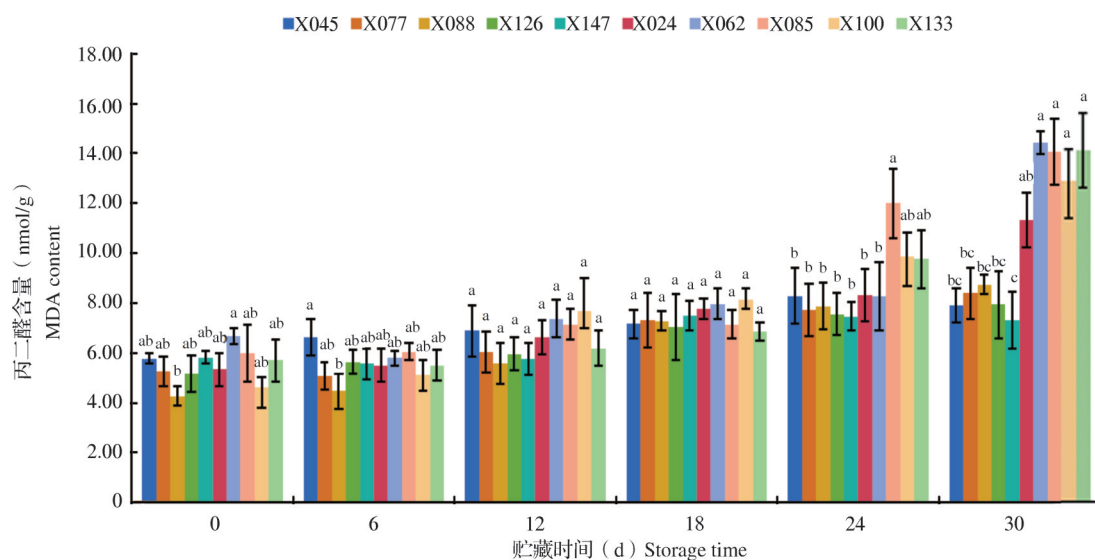


图5 木薯自交系块根采后贮藏期间MDA含量变化对比

Fig. 5 MDA content of cassava tubers during the period of storage

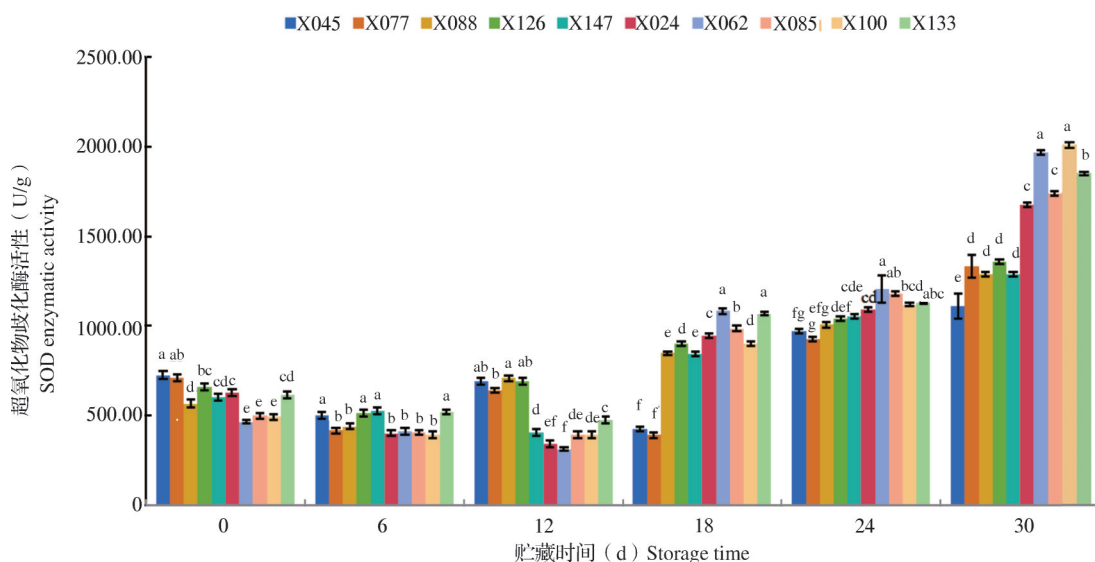


图6 木薯自交系块根采后贮藏期间SOD活性变化对比

Fig. 6 SOD enzymatic activity of cassava tubers during the period of storage

2.2.6 CAT 活性 由图7可知, 木薯自交系采后贮藏期间CAT活性变化有差异, 其中, X045、X077、X088、X126和X147整体上呈现上升-下降-上升的波动变化趋势, 而X024、X062、X085、X100和X133整体呈上升的变化趋势。除X126、X147峰值出现在24 d外, 其余种质均在30 d时达到峰值。贮藏0 d, CAT活性由高到低排序依次为X045>X088>

X147>X077>X133>X100>X126>X085>X062>X024。贮藏18 d、30 d, X024、X062、X085、X100、X133的CAT活性均高于X045、X077、X088、X126、X147。贮藏24 d时, CAT活性由高到低排序依次为X085>X100>X062>X133>X147>X024>X077>X088>X126>X045。贮藏24 d时, X045、X077、X088、X126、X147、X024、X062、X085、X100、X133的CAT活性

分别是 0d 的 1.17 倍、1.38 倍、1.35 倍、1.59 倍、1.44 倍、3.06 倍、2.58 倍、2.57 倍、1.66 倍和 1.52 倍。可见, 贮藏后期, 各种质采后生理腐烂现象越来越严

重, 不耐贮藏种质 (X024、X062、X085、X100、X133) 及较耐贮藏种质 (X045、X077、X088、X126、X147) CAT 活性均明显上升, 且不耐贮藏种质增幅更大。

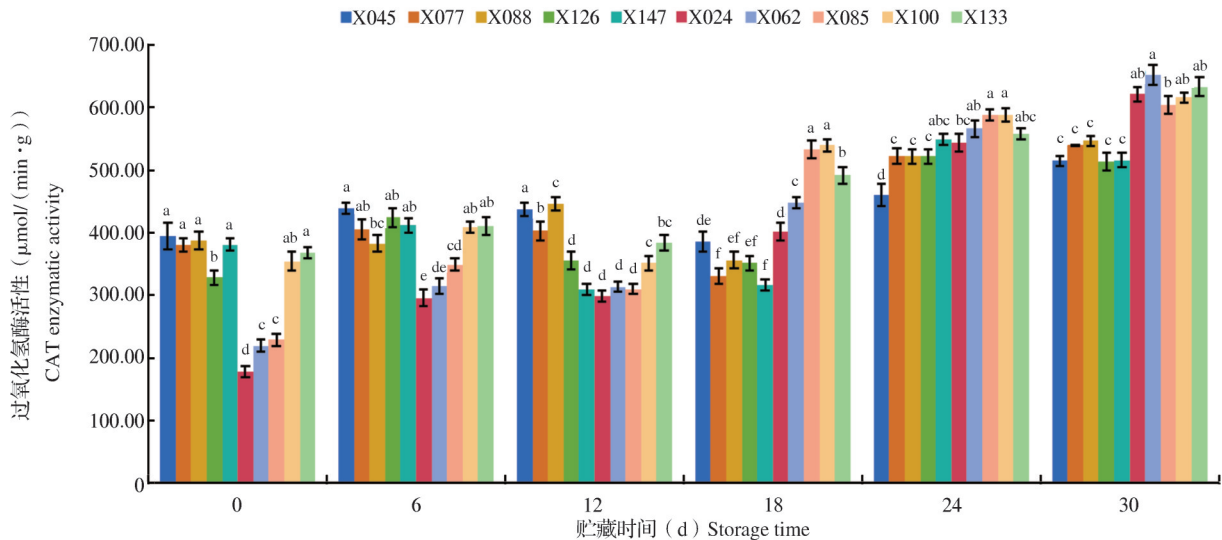


图7 木薯自交系块根采后贮藏期间 CAT 活性变化对比

Fig. 7 CAT enzymatic activity of cassava tubers during the periods of storage

2.2.7 POD 活性 由图 8 可知, 木薯自交系采后贮藏期间 POD 活性变化有差异, X088 呈下降 - 上升 - 下降 - 上升波动变化趋势, X147、X024 和 X085、X100 呈下降 - 上升 - 下降的变化趋势, X133 呈现不断上升变化趋势, 其他种质整体呈现先下降后上升变化趋势。除 X133 外, 其他种质最小值均出现在贮藏 6d; X088 最大值在 18d, X147、X024、X085 和 X100 最大值在 24d, 其余种质最大值在 30 d。贮藏 0 d, POD 活性由高到低排序依次为 X077>

X126>X085>X147>X088>X133>X045>X100>X024>X062。贮藏 12 d, X133 的 POD 活性最高, X077 最低, 两者间差异显著。贮藏 18~30 d, X024、X062、X085、X100、X133 的 POD 活性均高于 X045、X077、X088、X126、X147。贮藏 24 d 时, X045、X077、X088、X126、X147、X024、X062、X085、X100、X133 的 POD 活性分别是 0 d 的 4.61 倍、3.11 倍、3.91 倍、3.95 倍、3.62 倍、9.97 倍、10.67 倍、7.18 倍、9.74 倍、8.42 倍。可见, 贮藏后期, 不耐贮藏种质 (X024、

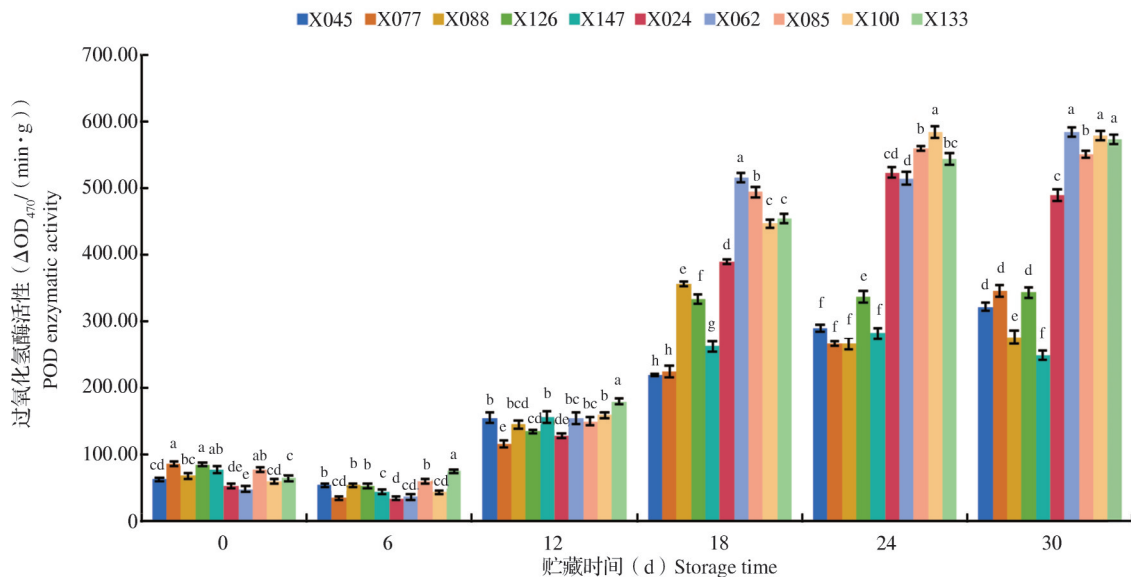


图8 木薯自交系块根采后贮藏期间 POD 酶活性变化对比

Fig. 8 POD enzymatic activity of cassava tubers during the periods of storage

X062、X085、X100、X133)及较耐贮藏种质(X045、X077、X088、X126、X147)POD活性均显著上升,且不耐贮藏种质POD活性大于耐贮种质、增幅更大。

2.3 采后贮藏期间块根褐化面积与生理指标相关性分析

对10个木薯自交系采后贮藏期间块根褐化面积与生理指标进行相关性分析,由表2可知,褐化面积与干物质含量、淀粉含量极显著正相关,与MDA含量显著正相关。块根干物质和淀粉含量高的种质,可能其呼吸底物充足,导致淀粉加速降解为还原糖,引发活

性氧爆发,引起细胞膜脂过氧化,生成MDA,最终加剧氧化损伤与褐化进程。因此,木薯块根干物质和淀粉含量越高,采后生理腐烂抗性越差。褐化面积与β-胡萝卜素含量显著负相关,说明β-胡萝卜素含量越高的种质,其抗氧化能力越强,采后生理腐烂抗性越好。褐化面积与POD酶活性极显著正相关,与SOD和CAT酶活性显著正相关,可见,种质采后生理腐烂抗性差,细胞受损伤程度严重,因而要提高抗氧化酶活性以清除活性氧,维持机体的代谢平衡。

表2 木薯采后腐烂程度与相关生理指标的相关性分析

Table 2 Analysis of the correlation between postharvest rotting degree and related physiological indicators in cassava							
采后腐烂程度 Postharvest rotting degree	干物质含量 Dry matter content	淀粉含量 Starch content	β-胡萝卜素含量 Beta-carotene content	SOD酶活性 SOD enzymatic activity	CAT酶活性 CAT enzymatic activity	POD酶活性 POD enzymatic activity	MDA含量 MDA content
褐化面积 Browning area	0.864**	0.845**	-0.763*	0.632*	0.644*	0.958**	0.721*

** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关
** indicates significant correlation at $P<0.01$ level (Bilateral); * indicates significant correlation at $P<0.05$ level (Bilateral)

3 讨论

本研究采用目测观察法,于块根贮藏期的0d、6d、12d、18d、24d和30d分别对新选048自交系166个种质块根采后生理腐烂抗性进行调查,筛选出5个抗采后生理腐烂、耐贮性好的种质,分别为X045、X077、X088、X126、X147,以及5个不抗采后生理腐烂、耐贮性差的种质,分别为X024、X062、X085、X100、X133。其中,不抗采后生理腐烂种质X100和X024在贮藏12d开始出现褐化,贮藏18d褐化面积逐步扩大,贮藏30d采后生理腐烂等级均达六级,块根大面积腐烂;而抗采后生理腐烂种质X126和X045在贮藏24d才陆续出现轻微褐化情况,采后生理腐烂等级均为一级,X077、X088和X147贮藏至第30d发生褐化,但发生程度轻,采后生理腐烂等级均为一级。由此可见,贮藏18d和24d为关键转折节点,贮藏18d时不抗种质的采后生理腐烂等级普遍进入二级以上(X024=45%, X062=20%, X100=55%),贮藏24d时抗性较好种质X045出现10%褐变,X126出现5%褐变,而不抗种质褐化面积均已超50%,表明24d这个时间点可作为抗性筛选的临界窗口。此外,筛选出的X077、X088、X147等抗采后生理腐烂种质可为木薯耐贮性育种提供核心亲本,而不耐贮藏种质X024和X100的快速劣变特征亦可

成为解析采后生理腐烂分子机制的重要极端表型材料。

不同品种的木薯在耐贮性方面存在显著差异,这主要与木薯的遗传特性(如块根中的淀粉含量、干物质含量以及β-胡萝卜素含量等)、贮藏环境以及机械损伤等因素有关^[27]。高干物质含量和高淀粉含量是木薯的主要育种目标,能有效提升深加工效益^[28],但因其采后代谢活动(如呼吸消耗、水分动态失衡等)增加块根采后生理腐烂的风险^[28-29]。类胡萝卜素最重要的特性之一是能够清除活性氧,因此是植物抗氧化防御系统的一个组成部分^[30]。袁帅等^[31]的研究表明,木薯种质的干物质含量越高,其耐贮藏性越差。文明富等^[12]的研究也指出,木薯块根的变质抗性与干物质含量及淀粉含量之间存在负相关关系。此外,研究表明,β-胡萝卜素类胡萝卜素具有抗氧化作用,可延缓块根的采后生理腐烂的发生^[14]。罗妙明等^[15]、Sánchez等^[16]以及Drapal等^[32]研究均表明,类胡萝卜素与木薯块根采后变质之间存在负相关关系,即β-胡萝卜素含量越高,块根的耐腐烂性越强。本研究表明,在木薯块根贮藏前期(0~6d),各种质干物质含量大幅下降且淀粉含量上升。可能是在贮藏初期,木薯块根呼吸作用旺盛,导致干物质的消耗,干物质含量大幅下降;而前期由于水分的蒸腾以及淀粉的转化速率较慢,导致

淀粉含量有所增加^[33]。X077、X088、X147 贮藏初期(0~6 d)干物质降幅大,且褐化面积始终 $\leq 5\%$ (PPD 一级),这表明该类种质可能通过加速淀粉代谢维持细胞膜稳态。不抗种质(X100、X024)虽全程维持高干物质含量和高淀粉含量,但其褐化面积在 30 d 达 100%(PPD 六级),说明这些种质因淀粉降解产生大量还原糖,为活性氧爆发提供充足底物,从而加剧氧化损伤。相关性分析结果表明,褐化面积与干物质含量、淀粉含量极显著正相关,说明木薯块根的干物质和淀粉含量越高,采后生理腐烂抗性越差,在贮藏期间木薯越容易发生采后腐烂,在贮藏后期更为明显。本研究结果与文明富等^[12]和袁帅等^[31]的研究结果一致。本研究结果还显示,耐贮藏种质 β -胡萝卜素含量普遍高于不耐贮藏种质,且耐贮藏种质块根出现褐化时间较迟、发生程度轻。其中,X077 和 X088 的 β -胡萝卜素含量呈先上升后下降再上升的趋势,在贮藏前期(0~6 d)增幅最大,贮藏后期(24~30 d)仍保持上升趋势;X147 全程保持上升趋势,可能与这些种质中的类胡萝卜素合成限速酶活性较高有关。X100 和 X133 的 β -胡萝卜素含量呈先上升后下降的趋势,分别在 18 d、12 d 达到峰值。且 X100 和 X133 在贮藏后期采后生理腐烂程度不断加重,推测其 β -胡萝卜素含量下降可能与贮藏中后期活性氧积累加速氧化裂解有关。综上,本研究推测高干物质/淀粉特性木薯种质通过增强呼吸底物供应加剧氧化压力,因而易发生采后生理腐烂、耐贮性差。而 β -胡萝卜素可通过直接清除活性氧维持氧化还原稳态,从而延缓采后生理腐烂的发生。木薯块根淀粉、 β -胡萝卜素代谢具有显著的遗传异质性,其与采后生理腐烂的关系需进一步深入研究。

在逆境胁迫条件下,植物细胞膜脂会发生氧化应激反应,导致生物膜结构受损,特别是细胞质膜。该损伤会引起细胞膜在结构与功能上的破坏,进而影响膜的通透性,对植物的正常生理和生化过程产生影响。MDA 作为氧化应激反应过程的主要产物之一,通常被用作膜脂过氧化的衡量指标,其含量变化可反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件的抵抗能力^[34-35]。大量研究表明,随着贮藏时间的延长,果实中积累的 MDA 含量增加^[36-38]。本研究也得到类似结果,随着贮藏时间的延长,10 个木薯自交系块根中 MDA 含量整体上呈上升趋势,表明膜脂过氧化损伤随贮藏时间延长逐渐加剧。但不同种质的 MDA 积累速率和峰值存在显著差异。贮

藏期间,X085、X100 块根中 MDA 含量持续上升,可能与其高淀粉代谢引发活性氧积累有关,其耐贮性差;X147 增幅较小,24 d 时 MDA 仅为 0 d 的 1.29 倍,可能其具有更强的抗氧化能力,耐贮性好。研究还显示贮藏后期(24~30 d),除 X062,其他耐贮藏种质 MDA 含量普遍高于不耐贮藏种质,且与贮藏 0 d 相比,贮藏 30 d 时耐贮藏种质的 MDA 含量增幅明显大于不耐贮藏种质。块根褐化面积与 MDA 含量显著正相关,说明耐贮藏种质在贮藏期间,其细胞膜受损伤程度较轻,究其原因可能是耐贮藏种质具有更强的抗氧化能力,能够有效减轻采后生理腐烂引起的氧化应激反应。植物在逆境条件下 MDA 会积累增加,且不同品种增幅有差异,增幅越大的品种对逆境的忍耐力越弱^[34,39],本研究结果与前人^[34,39]一致。MDA 含量的变化可以作为评估植物对逆境耐受性的一个重要生理指标。

抗氧化酶在植物体内扮演着至关重要的角色,它们有助于维持机体的代谢平衡,并清除活性氧^[40]。其中,SOD、CAT 和 POD 是植物体内主要的抗氧化酶。在逆境条件下,这些酶能够清除活性氧自由基,从而抵御植物体内膜脂过氧化,保护细胞膜结构^[35]。SOD、POD、CAT 等酶活性与果实贮藏品质密切相关,可作为评价其氧化程度的重要指标^[41]。研究表明,SOD、CAT 和 POD 能将超氧阴离子自由基转换和清除,使木薯块根中采后活性氧代谢得到有效调节^[11]。本研究结果显示,贮藏前期(0~12 d),各种质酶活性均较低,但整体上耐贮藏种质 SOD、CAT 和 POD 酶活性高于不耐贮藏种质;而贮藏后期(18~30 d),不耐贮藏种质 SOD、CAT 和 POD 酶活性从贮藏 18 d 开始不断上升,耐贮藏种质从贮藏 24 d 开始不断上升,且不耐贮藏种质 3 个酶活性明显高于耐贮藏种质,均在贮藏第 30 d 达到峰值。以上说明在贮藏前期,耐贮藏种质比不耐贮藏种质具有更强的抗氧化能力,保持着较高的 SOD、POD 和 CAT 活性,以减少活性氧的积累,从而保证块根不损害。自贮藏第 18 d 开始,不耐贮藏种质褐化面积开始大范围扩散,采后腐烂程度逐步加重,MDA 大量积累,因而需要诱导木薯块根内保护酶活性的提升,通过持续增强 SOD、POD 和 CAT 的活性响应氧化应激反应,以增强其对采后生理腐烂逆境的抵御能力^[35]。樊吴静等^[42]研究发现,淀粉较高的木薯品种块根贮藏期间易发生变质,其 SOD、POD 和 CAT 酶活性显著高于变质抗性强、淀粉较低的品种。本研究发现,贮藏前期(0~12 d),耐贮藏、

淀粉含量低的种质如 X045 的 SOD、POD 和 CAT 酶活性高于淀粉含量高、不耐贮藏种质如 X062, 但贮藏后期(18~30 d)反之, X062 高于 X045。本研究结果与樊吴静等^[42]的研究发现存在差异, 可能与试验贮藏环境、贮藏时间长短、块根褐化程度以及试验品种不同有关。在樊吴静等^[42]的试验设计中, 块根的最长贮藏时间为 20 d, 此时不耐贮藏品种 RS01 已经全部褐化, 但是并没有出现腐烂的现象。本研究延长贮藏时间至 30 d, 此时不耐贮藏的种质块根全部褐化且出现大面积腐烂现象。可见, 对于木薯块根耐贮性的评价, 需要综合考虑贮藏时间和环境、品种特性以及多种生理指标的变化。综上所述, 木薯块根的耐贮性受其内部生理特性的协同调控, 但其复杂的互作网络尚未完全解析, 需通过进一步的实验研究进行深入解析。

本研究从木薯新选 048 自交系的 166 份材料中, 筛选了耐贮藏和不耐贮藏材料各 5 个, 其中耐贮藏材料为 X045、X077、X088、X126、X147, 不耐贮藏材料为 X024、X062、X085、X100、X133。并测定 10 个种质在贮藏期间的干物质含量、淀粉含量、β-胡萝卜素含量、MDA 含量、SOD、CAT 和 POD 活性, 分析其与块根的褐化面积(24 d)相关性, 发现褐化面积与植物生理指标之间存在一定的相关性。其中, 干物质含量、淀粉含量高、β-胡萝卜素含量低的种质较容易发生采后腐烂, 耐贮性越差。随着贮藏时间的延长, 木薯块根采后腐烂程度不断加重, MDA 含量不断积累, 块根通过不断提高 SOD、CAT 和 POD 活性来抵御逆境。本研究不仅为木薯耐贮性育种提供了宝贵的核心亲本材料, 也为深入解析木薯抗采后生理腐烂分子机制奠定了坚实基础。下一步应加强利用现代分子生物学技术, 如基因测序、基因表达分析、蛋白质组学等, 以探究抗采后生理腐烂种质的遗传基础, 解析木薯抗采后生理腐烂的分子机制, 助力木薯突破新品种改良及产业的可持续壮大发展。

参考文献

- [1] 段春芳, 李月仙, 宋记明, 姜太玲, 肖明昆, 沈正松, 刘倩, 熊贤坤, 耿沙, 车彬, 张钦, 李林虹, 严炜, 刘光华. 木薯自交后代疫霉根腐病抗性评价及抗性材料遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2025, <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241024001>
- [2] Duan C F, Li Y X, Song J M, Jiang T L, Xiao M K, Shen Z S, Liu Q, Xiong X K, Geng S, Che B, Zhang Q, Li L H, Yan W, Liu G H. Evaluation of *Phytophthora* root rot resistance and genetic diversity analysis of resistant materials in cassava inbred progeny. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241024001>
- [3] Chen Q, Liang X, Wu C L, Gao J T, Chen Q, Zhang Z. Density threshold-based acaricide application for the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* on cassava: From laboratory to the field. Pest Management Science, 2019, 75 (10): 2634-2641
- [4] 陆柳英, 曾文丹, 尚小红, 曹升, 肖亮, 程冬, 施平丽, 龙紫媛, 李祥, 严华兵. 8 份木薯二倍体及其同源四倍体资源部分表型性状鉴定与分析. 植物遗传资源学报, 2025, <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240902002>
- [5] Lu L Y, Zeng W D, Shang X H, Cao S, Xiao L, Cheng D, Shi P L, Long Z Y, Li X, Yan H B. Identification and analysis of partial phenotypic traits on diploidy and homologous tetraploid of 8 cassava resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240902002>
- [6] Zainuddin I M, Fathoni A, Sudarmonowati E, Beeching J R, Gruijssem W, Vanderschuren H. Cassava post-harvest physiological deterioration: From triggers to symptoms. Postharvest Biology and Technology, 2018, 142: 115-123
- [7] Yan Y, Li M Y, Ding Z H, Yang J H, Xie Z G, Ye X X, Tie W W, Tao X G, Chen G L, Huo K S, Ma J X, Ye J Q, Hu W. The regulation mechanism of ethephon-mediated delaying of postharvest physiological deterioration in cassava storage roots based on quantitative acetylproteomes analysis. Food Chemistry, 2024, 458: 140252
- [8] Li R M, Yuan S, Zhou Y J, Wang S J, Zhou Q, Ding Z P, Wang Y J, Yao Y, Liu J, Guo J C. Comparative transcriptome profiling of cassava tuberous roots in response to postharvest physiological deterioration. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(1): 246
- [9] Djabou A S M, Carvalho L, Li Q X, Niemenak N, Chen S B. Cassava postharvest physiological deterioration: A complex phenomenon involving calcium signaling, reactive oxygen species and programmed cell death. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(4): 91
- [10] An F F, Cui M J, Chen T, Cheng C, Liu Z, Luo X Q, Xue J J, Tang Y Q, Cai J, Chen S B. Flavonoid accumulation modulates the responses of cassava tuberous roots to postharvest physiological deterioration. Tropical Plant Biology, 2023, 3: 112254
- [11] An F F, Xue J, Luo X Q, Chen T, Wei Z W, Zhu W L, Ou W J, Li K M, Cai J, Chen S B. MePOD12 participates the regulation to postharvest physiological deterioration by ROS scavenging and lignin accumulation in cassava tuberous roots. Postharvest Biology and Technology, 2024, 207: 112609
- [12] Huang J, Bachem C, Jacobsen E, Visser R G F. Molecular analysis of differentially expressed genes during postharvest deterioration in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) tuberous roots. Euphytica, 2001, 120: 85-93
- [13] Beeching J R, Reilly K, GómezVásquez R, Li H, Han Y,

- Rodriguez M X, Buschmann H, Taylor N, Fauquet C, Tohme J. Post-harvest physiological deterioration of cassava. *Nagoya Journal of Law&Politics*, 2002, 245: 323-381
- [12] 文明富, 胡梅珍, 陈新, 王海燕, 卢诚, 王文泉. 八个木薯品种(系)储藏根采后耐贮性生化指标的变化. *作物学报*, 2013, 39(1): 172-176
Wen M F, Hu M Z, Chen X, Wang H Y, Lu C, Wang W Q. Changes in biochemical indicators of postharvest storability for eight cassava varieties (lines). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(1): 172-176
- [13] 姚庆群, 张振文. 木薯采后生理性变质与淀粉特性研究. *热带农业科学*, 2012, 32(12): 12-15
Yao Q Q, Zhang Z W. Physiological deterioration and starch characteristics of harvest cassava tuberous root. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2012, 32(12): 12-15
- [14] Morante N, Sánchez T, Ceballos H, Calle F, Pérez J C, Egesi C, Cuambe C E, Escobar A F, Ortiz D, Chávez A L, Fregene M. Tolerance to postharvest physiological deterioration in cassava roots. *Crop Science*, 2010, 50(4): 1333-1338
- [15] 罗妙明, 陈松笔, 安飞飞, 薛晶晶, 蔡杰, 罗秀芹. 木薯块根 β -胡萝卜素与采后腐烂的相关性研究. *热带农业科学*, 2021, 41(6): 82-86
Luo M M, Chen S B, An F F, Xue J J, Cai J, Luo X Q. Correlation between β -carotene in cassava tuberous roots and postharvest deterioration. *Tropical Agricultural Science*, 2021, 41(6): 82-86
- [16] Sánchez T M, Chavez A L, Ceballos H, Rodriguez-Amaya D B, Nestel P S, Ishitani M. Reduction or delay of post-harvest physiological deterioration in cassava roots with higher carotenoid content. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86: 634-639
- [17] Reilly K, Bernal D, Cortés D F, Gómez-Vásquez R, Tohme J, Beeching J R. Towards identifying the full set of genes expressed during cassava post-harvest physiological deterioration. *Plant Molecular Biology*, 2007, 64 (1/2): 187-203
- [18] Bayoumi S A, Rowan M G, Blagbrough I S, Beeching J R. Biosynthesis of scopoletin and scopolin in cassava roots during post-harvest physiological deterioration: The E-Z-isomerisation stage. *Phytochemistry*, 2008, 69(17): 2928-2936
- [19] Yan Y, Zhao S H, Ye X X, Tian L B, Shang S, Tie W W, Zeng L W, Zeng L M, Yang J H, Li M Y, Wang Y, Xie Z G, Hu W. Abscissic acid signaling in the regulation of postharvest physiological deterioration of sliced cassava tuberous roots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70 (40): 12830-12840
- [20] 王聪聪. 壳聚糖处理延缓木薯采后退化机制初步研究. 海口: 海南大学, 2023
Wang C C. Preliminary study on the mechanism of chitosan treatment in delaying postharvest deterioration of cassava tuberous roots. Haikou: Hainan University, 2023
- [21] Wu X Y, Xu J, Ma Q X, Ahmed S, Lu X L, Ling E, Zhang P. Lysozyme inhibits postharvest physiological deterioration of cassava. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2022, 64(3): 621-624
- [22] Gu J B, Ma X W, Ma Q X, Xia Z Q, Lin Y, Yuan J B, Li Y, Li C, Chen Y H, Wang W Q, Zhang P, Wang Z Y. RNA splicing modulates the postharvest physiological deterioration of cassava storage root. *Plant Physiology*, 2024, 196 (1): 461-478
- [23] 李恒锐, 张秀芬, 陈会鲜, 杨海霞, 梁振华, 兰秀, 黄珍玲, 莫周美, 何文, 郭素云. 木薯雌雄花分化形态结构观察及生理调控研究. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(1): 255-262
Li H R, Zhang X F, Chen H X, Yang H X, Liang Z H, Lan X, Huang Z L, Mo Z M, He W, Guo S Y. Study on morphological structure and physiological regulation of female and male flowers differentiation in cassava. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1): 255-262
- [24] 罗兴录. 木薯新品种新选048选育与应用. *中国农学通报*, 2009, 25(24): 501-505
Luo X L. Report on applying and breeding of new cassava cultivar Xinxuan 048. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(24): 501-505
- [25] 尚小红, 谢向誉, 曹升, 严华兵, 肖亮, 王颖, 曾文丹, 陆柳英, 陈会鲜. 木薯‘新选048’自交系群体表型鉴定评价及遗传多样性分析. *植物生理学报*, 2019, 55(9): 1277-1290
Shang X H, Xie X Y, Cao S, Yan H B, Xiao L, Wang Y, Zeng W D, Lu L Y, Chen H X. Phenotypic identification and genetic diversity of cassava cultivar ‘Xinxuan 048’ inbred lines. *Plant Physiology Journal*, 2019, 55(9): 1277-1290
- [26] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.3 食品安全国家标准 食品中水分的测定. 北京: 中国标准出版社, 2010
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3 National food safety standard-Determination of moisture in foods. Beijing: Standards Press of China, 2010
- [27] 张振文, 李开绵. 木薯块根采后腐烂及贮藏方法研究进展. *热带作物学报*, 2012, 33(7): 1326-1331
Zhang Z W, Li K M. Research progress on postharvest rot and storage methods of cassava tuber. *Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(7): 1326-1331
- [28] Ceballos H, Fregene M, Pérez J C, Morante N, Calle F. Cassava genetic improvement// Kang M S, Priyadarshan P M. *Breeding Major Food Staples*. Hoboken: Blackwell Publishing, 2007: 365-391
- [29] Van Oirschot Q E A, O'Brien G M, Dufour D, El-Sharkawy M A, Mesa E. The effect of pre-harvest pruning of cassava upon root deterioration and quality characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80 (13): 1866-1873
- [30] Zhao K Y, Wang X Q, Yue X Z, Lv J Y, Xu X D, Lu H S, Zuo J H, Xu X B, Chen B, Yuan S Z, Wang Q. A comprehensive physiological and -Omic analysis of trypsin-mediated protection of green pepper fruits from chilling injury.

- Food Chemistry, 2024, 460(2): 140547
- [31] 袁帅, 李瑞梅, 周杨骄, 仇婷婷, 姚远, 刘姣, 段瑞军, 符少萍, 胡新文, 郭建春. 两个木薯种质田间农艺性状及叶片生理指标比较分析. 分子植物育种, 2018, 16(7): 2316-2321
Yuan S, Li R M, Zhou Y J, Qiu T T, Yao Y, Liu J, Duan R J, Fu S P, Hu X W, Guo J C. Comparative analysis of agronomic traits and leaf physiological indices of two cassava germplasms in the field. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(7): 2316-2321
- [32] Drapal M, Ovalle Rivera T M, Luna Meléndez J L, Perez-Fons L, Tran T, Dufour D, Becerra Lopez-Lavalle L A, Fraser P D. Biochemical characterisation of a cassava (*Manihot esculenta* crantz) diversity panel for post-harvest physiological deterioration; metabolite involvement and environmental influence. Journal of Plant Physiology, 2024, 301: 154303
- [33] 韦丽君, 盘欢, 李军, 卢赛清, 俞奔驰, 郑华, 雷开文. 木薯块根采后主要耐贮性生化指标的分析. 西南农业学报, 2016, 29(3): 525-530
Wei L J, Pan H, Li J, Lu S Q, Yu B C, Zheng H, Lei K W. Analysis of the main biochemical indicators of storability of cassava tuberous roots after harvest. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(3): 525-530
- [34] 王旭明, 麦琦君, 周鸿凯, 赵夏夏, 陈景阳, 龚茂健, 杨善, 谢平, 莫俊杰, 叶昌辉. 盐胁迫对4个水稻种质抗逆性生理的影响. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(2): 149-156
Wang X M, Mai Q J, Zhou H K, Zhao X X, Chen J Y, Gong M J, Yang S, Xie P, Mo J J, Ye C H. Effects of salt stress on resistance physiology of four rice germplasms. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(2): 149-156
- [35] 韦婉玲, 何文, 阮丽霞, 梁振华, 杨海霞, 陈会鲜, 李恒锐, 黄振玲. 华南205木薯二倍体及其同源四倍体对朱砂叶螨取食胁迫的生理响应. 植物保护学报, 2024, 51(2): 456-466
Wei W L, He W, Ruan L X, Liang Z H, Yang H X, Chen H X, Li H R, Huang Z L. Physiological responses of cassava SC205 diploids and their autotetraploids to feeding stress by carmine spider mite *Tetranychus cinnabarinus*. Journal of Plant Protection, 2024, 51(2): 456-466
- [36] 王鹏伟, 闫晓文, 刘珍宇, 孙丽, 刘振威, 李新峥. 百蜜系列南瓜品种(系)采后品质变化和耐贮性比较. 河南农业科学, 2024, 53(3): 158-168
Wang P W, Yan X W, Liu Z Y, Sun L, Liu Z W, Li X Z. Comparison of post-harvest quality changes and storability of Baimi series pumpkin varieties (lines). Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(3): 158-168
- [37] 张群, 宁密密, 舒楠. 预冷不同时间对阳光玫瑰葡萄贮藏品质的影响. 湖南农业科学, 2024(1): 45-50
Zhang Q, Ning M M, Shu N. Effects of pre-cooling duration on postharvest quality of sunshine rose grapes. Hunan Agricultural Sciences, 2024(1): 45-50
- [38] 毕莹, 李慧, 马鑫, 王新宇, 黄帅, 张琪, 雷雅馨, 王雪, 王富鑫, 许文昌, 王静. 不同品种哈密瓜果实采后品质与耐冷性关系分析. 食品科技, 2023, 48(10): 27-34
Bi Y, Li H, Ma X, Wang X Y, Huang S, Zhang Q, Lei Y X, Wang X, Wang F X, Xu W C, Wang J. Analysis on the relationship between postharvest quality and cold resistance of different Hami melon varieties. Food Science and Technology, 2023, 48(10): 27-34
- [39] 刘琳, 毛凯, 干友民, 白史且, 李君, 唐雪辉. 抗寒锻炼对假俭草SOD、POD活性及MDA含量的影响. 湖北农业科学, 2005, 44(6): 87-89
Liu L, Mao K, Gan Y M, Bai S Q, Li J, Tang X H. Effects of cold hardening on SOD, POD activities and MDA contents indifferent populations of wild centipede grass. Hubei Agricultural Sciences, 2005, 44(6): 87-89
- [40] 梁美, 王纪辉, 胡伯凯, 刘亚娜, 耿阳阳, 张时馨, 曾亚军, 何佳丽, 杨光. 泡核桃青果贮藏期间生理指标响应. 南京师大学报:自然科学版, 2023, 46(4): 21-28
Liang M, Wang J H, Hu B K, Liu Y N, Geng Y Y, Zhang S X, Zeng Y J, He J L, Yang G. Response of physiological indicators during the storage of *Juglans sigillata* green fruit. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 2023, 46(4): 21-28
- [41] 姜元昊, 张凯浩, 高亚宁, 马新超, 杨鸿基, 轩正英. 不同番茄品种采后品质变化和耐贮性比较. 中国瓜菜, 2023, 36(6): 114-119
Jiang Y H, Zhang K H, Gao Y N, Ma X C, Yang H J, Xuan Z Y. Comparison of postharvest quality changes and storage resistance of different varieties of tomatoes. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(6): 114-119
- [42] 樊吴静, 罗兴录, 翟瑞宁, 覃徐建. 不同淀粉型木薯品种采后块根变质生理特性的比较. 中国农业大学学报, 2019, 24(3): 39-44
Fan W J, Luo X L, Zhai R N, Qin X J. Comparison on the physiological characteristics of tuberous roots of cassava varieties with different starch content during post-harvest deterioration. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(3): 39-44