



植物遗传资源学报

Journal of Plant Genetic Resources

ISSN 1672-1810, CN 11-4996/S

《植物遗传资源学报》网络首发论文

题目：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
作者：黄珍玲，阮丽霞，严华兵，王天亮，阮孟斌，何观永，梁振华，李恒锐，杨海霞，李文彬，蔡兆琴，邓清文，黄若兰，兰秀，张秀芬，郭素云，何文，莫周美，李天元，韦婉羚
DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20241214001
收稿日期：2024-12-14
网络首发日期：2025-03-31
引用格式：黄珍玲，阮丽霞，严华兵，王天亮，阮孟斌，何观永，梁振华，李恒锐，杨海霞，李文彬，蔡兆琴，邓清文，黄若兰，兰秀，张秀芬，郭素云，何文，莫周美，李天元，韦婉羚. 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[J/OL]. 植物遗传资源学报.
<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20241214001>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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, 何观永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, 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)是木薯特有的一种逆境胁迫现象,严重制约其商品化进程。而抗PPD种质资源缺乏是限制木薯产业发展的关键瓶颈。因此,木薯抗PPD新种质的创制、筛选及抗性机理解析,对于有效解决木薯PPD问题具有重要意义。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0d、6d、12d、18d、24d和30d的生理腐烂程度,并取样测定块根的相关生理指标。结果表明,X045和X126于贮藏第24d、X077、X088、X147于贮藏第30d开始出现褐化现象,且五个种质褐化面积均小于10%,可见这五个种质比较抗PPD、耐贮藏性好,可作为木薯抗PPD育种的优异材料;X024和X100于贮藏第12d、X062、X085和X133于贮藏第18d开始出现不同程度的褐化现象,贮藏24d五个种质褐化面积均达50%以上,30d块根严重腐烂,表明其采后块根容易发生PPD、耐贮藏性差。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。β-胡萝卜素含量可作为木薯自交系抗PPD评价的主要指标。研究结果为木薯耐贮藏性、抗PPD机制和新品种选育提供材料基础,对于木薯壮大发展具有重要意义。

关键词:木薯;自交系;耐贮藏性;采后生理腐烂

Evaluation of Postharvest Physiological Deterioration (PPD)

Resistance and Analysis of Physiological Changes in Cassava Cultivar

Xin Xuan 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)” represents a unique postharvest stress response in cassava (*Manihot esculenta*), severely constraining its commercialization. The scarcity of PPD-tolerant germplasm resources constitutes a critical bottleneck restricting industrial development of cassava. Therefore, creation and selecting novel PPD-tolerant cassava germplasms, coupled with the elucidation of their resistance mechanisms, are of critical importance for effectively addressing cassava PPD

收稿日期: 2024-12-14

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

通信作者: 李天元, 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(2023YFD1600600); 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 (2023YFD1600600); Guangxi Natural Science Foundation (2024GXNSFBA010406, 2024GXNSFAA010006); Guangxi Academy of Agricultural Sciences Basic Research Business Special Project (Guinongke 2023YM27, Guinongke 2023YM28, Guinongke 2021YT157)

challenges. In this study, 166 germplasms of Xin Xuan 048 (XX048) inbred line of cassava were used as research objects to observe and evaluate the degree of decay of cassava tubers stored for 0d, 6d, 12d, 18d, 24d and 30d after harvesting, and samples were taken to determine relevant physiological indicators of the tubers. The results showed that X045 and X126 began to brown on the 24th day of storage, X077, X088, and X147 began to brown on the 30th day of storage, and the browning area of the five germplasms were all less than 10%, which showed that these five germplasms were more PPD resistant and had good storage resistance, and could be used as excellent materials for breeding cassava for PPD resistance. X024 and X100 showed varying degrees of browning on the 12th day of storage, and X062, X085, and X133 began to show browning on the 18th day of storage. After 24 days of storage, the browning area of all five germplasms exceeded 50%, and the tubers were seriously decayed after 30 days of storage, which indicated that they were prone to PPD and had poor storage tolerance after harvesting. Correlation analysis showed that the browning area of germplasm was positively correlated with dry matter content, starch content and POD enzyme activity significantly, positively correlated with SOD and CAT enzyme activity and MDA content, and negatively correlated with β -carotene content. It can be seen that germplasm with high dry matter content and starch content of cassava tubers are more susceptible to postharvest decay and poor PPD resistance. The content of β -carotene can be used as the main indicator for evaluating the PPD tolerance of cassava inbred lines. The results of this study will provide data support for the research of on the mechanism of regulating PPD resistance in cassava and the breeding of new varieties resistant to PPD. The findings provide a material basis for storage tolerance, PPD resistance mechanisms and new varieties breeding of cassava. At the same time, it is of great significance for the growth and development of cassava.

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]。在我国的广西、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。因此, 木薯在保障粮食安全、食品加工以及生物质能领域具有不可替代的作用^[4]。然而, 木薯块根极不耐贮藏, 通常在收获后 24 至 72 小时内发生褐化变质, 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)^[5-6]。PPD 的发生会导致木薯块根变得不可口且无法销售, 给农民和加工企业造成巨大的经济损失, 严重制约了木薯加工利用和产业大规模生产的快速发展进程^[7-8]。据不完全统计, 每年因 PPD 导致的新鲜木薯块根损失约占全球总产量的三分之一^[8-9]。2021 年全球因 PPD 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^[10-11]。据统计, 若木薯的储存期限能够延长至 45 天, 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^[8]。因此, 解析木薯块根 PPD 的发生机制并选育抗 PPD 优异木薯种质, 已成为木薯产业发展亟待解决的关键科学问题。

PPD 是由块根收获时的机械损伤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^[6-7]。研究表明, PPD 反应是一个多维度的复杂内源性过程, 涉及活性氧 ROS 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^[12-14]。且这一过程的发生与收获时的机械损伤、环境因子和微生物侵染, 所共同作用引起的活性氧 (ROS, reactive oxygen species) 急剧增加紧密相关^[15-16]。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, 其越容易变质^[17-18]。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^[19-21]。此外, 次生代谢物在 PPD 调控中呈现双重作用: 采后 2-3 d, 木薯块根中萜萜亭、萜萜苷等有色化合物的迅速积累易引发褐变现象^[22-23]; 而木质素与类黄酮等次生代谢物质的积累, 在一定程度上可延缓木薯块根 PPD 发生^[10-11]。针对减缓 PPD 发生, 现有研究提出了多种干预策略。如外源脱落酸 (ABA, abscisic acid) 通过降低木薯块根中内源性 H_2O_2 含量, 缓解 PPD 症状^[24]; 壳聚糖处理通过直接抑菌减少病原体感染, 促进块根伤口愈合速度及诱导抗性, 来增强木薯块根对 PPD 的防御能力^[25]; 基因编辑技术如表达鸡蛋清溶菌酶 (HEWL, hen egg-white lysozyme) 以抑制多酚氧化酶的活性^[26], 以及 RNA 剪接蛋白 *MeSCL33* 调控 ABA 生物合成关键基因 *MeABA1* 表达, 导致 ABA 水平升高, ROS 积累减少, 从而延缓木薯 PPD 发生

[27]。尽管前人对木薯块根 PPD 发生的影响因素、分子机理、延缓 PPD 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,PPD 核心诱因尚未完全解析,现有防控技术成本高或操作复杂,且抗 PPD 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。

高产优质高抗突破性木薯种质创新,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^[28],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^[29],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^[30],是构建自交系群体的理想材料。但目前,关于新选 048 自交系的耐贮特性以及子代群体中 PPD 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 PPD 抗性,并筛选出采后较耐贮藏和不耐贮藏的种质各 5 个,比较研究其贮藏期间块根的生理指标变化情况,旨在筛选抗 PPD 优良材料、探讨块根 PPD 与生理特性的相关性,并为抗 PPD 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

通过亲本新选 048 木薯隔离种植在广西壮族自治区龙州县(22°27'N, 106°37'E),使其进行自花授粉获得的自交后代材料,分别编号,并保存于广西壮族自治区龙州县所广西南亚热带农业科学研究所木薯试验地(22°20'N, 106°47'E)。

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。每个种质各种植 10 株,种植株行距为 80 cm×100 cm。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 0 d,并分别在贮藏期的 0 d、6 d、12 d、18 d、24 d 和 30 d 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 10 cm 处各切一个厚度约 1 cm 的切片,观察记录其褐变情况,同时取样以用于生理指标的测定。取样时,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 100 g,并切成约 0.2 cm 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 0 d、6 d、12 d、18 d、24 d 和 30 d 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 PPD 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 PPD 发生程度划分为 6 个等级。其中,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% 以下;二级腐烂,为 10%~20%;三级腐烂,为 20%~40%;四级腐烂,为 40%~60%;五级腐烂,为 60%~80%;六级腐烂,为 80%~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 100 g 左右块根薄片置于信封中,80℃烘箱中杀青 15 min、65℃烘干至恒重^[31]。淀粉含量:称取约 0.05 g 块根干样,参照试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)说明书采用蒽酮比色法测定。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:称取约 0.1 g 块根鲜样,参照试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)说明书处理样本、采用比色法测定。β-胡萝卜素含量采用高效液相色谱法(HPLC, high performance liquid chromatography):样品提取方法:称取约 0.2 g 块根鲜样,加入 1 mL 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,以 12000 r/min 的速度离心 5 min,重复提取 2 次,直到提取液无色,合并提取液,用氮气吹干,用 1 mL 甲

醇复溶, 后将样品用 0.22 μ m 滤膜过滤。测定条件: 流动相为甲醇/异丙醇 (70/30), 检测波长 450 nm, 柱温 (40 \pm 0.1) $^{\circ}$ C, 进样量 10 μ L, 流速 1 mL/min。样品测定过程中每个种质均设 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 贮藏期内褐化面积始终 \leq 5%, X045 和 X126 在贮藏第 24 d 开始褐化, 褐化面积分别为 10% 和 5%, 以上五个种质 PPD 等级维持一级, 可见这五个种质比较抗 PPD、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, 表明其采后块根容易发生 PPD、耐贮性差。

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 during postharvest storage

种质 Germplasm	0 d		6 d		12 d		18 d		24 d		30 d	
	褐化面积 (%)	PPD 等 级	褐化面积 (%)	PPD 等 级	褐化面积 (%)	PPD 等 级	褐化面 积(%)	PPD 等 级	褐化面积 (%)	PPD 等 级	褐化面 积(%)	PPD 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	完好	85	六级	100	六级
X100	0	完好	0	完好	20	三级	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

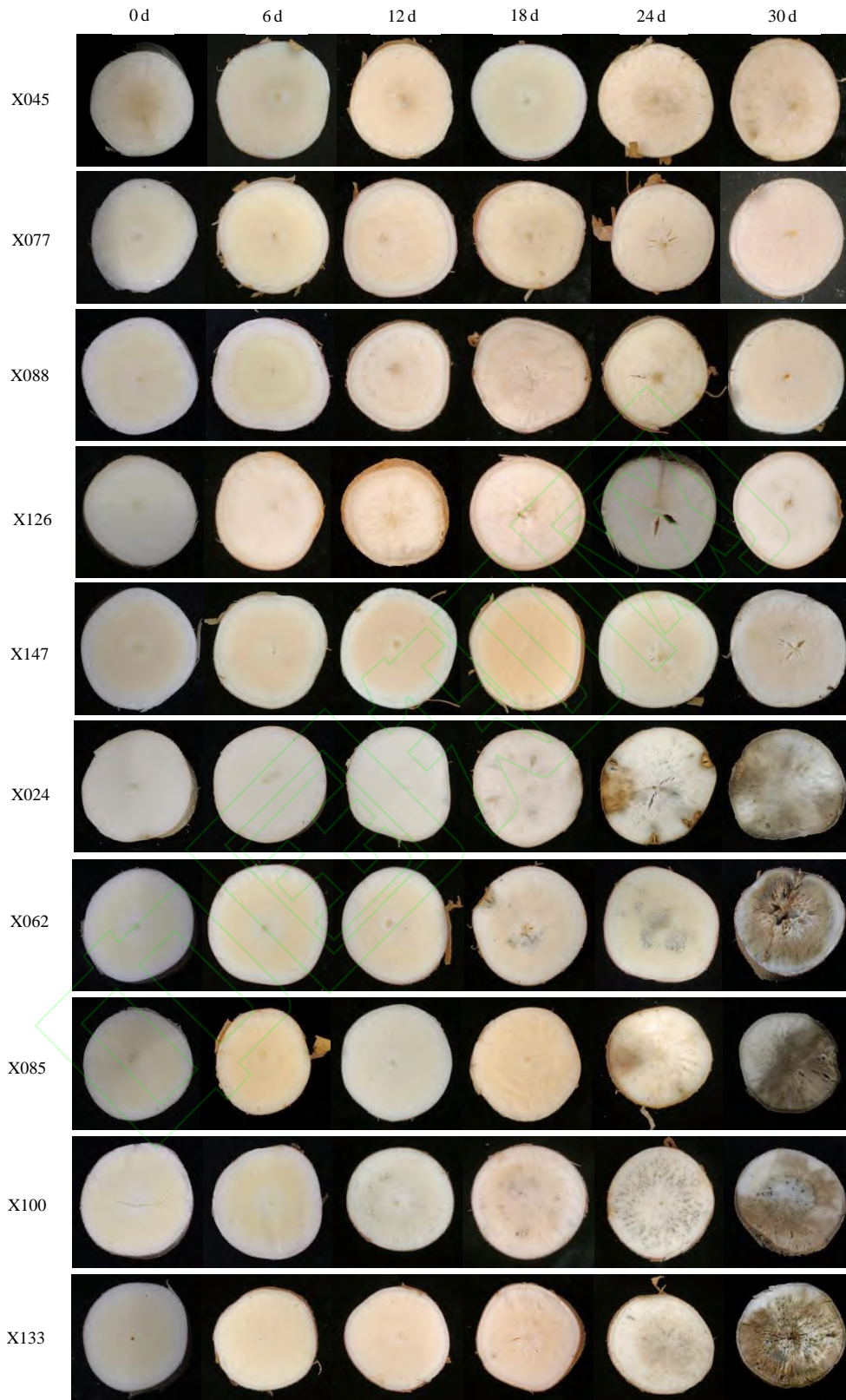
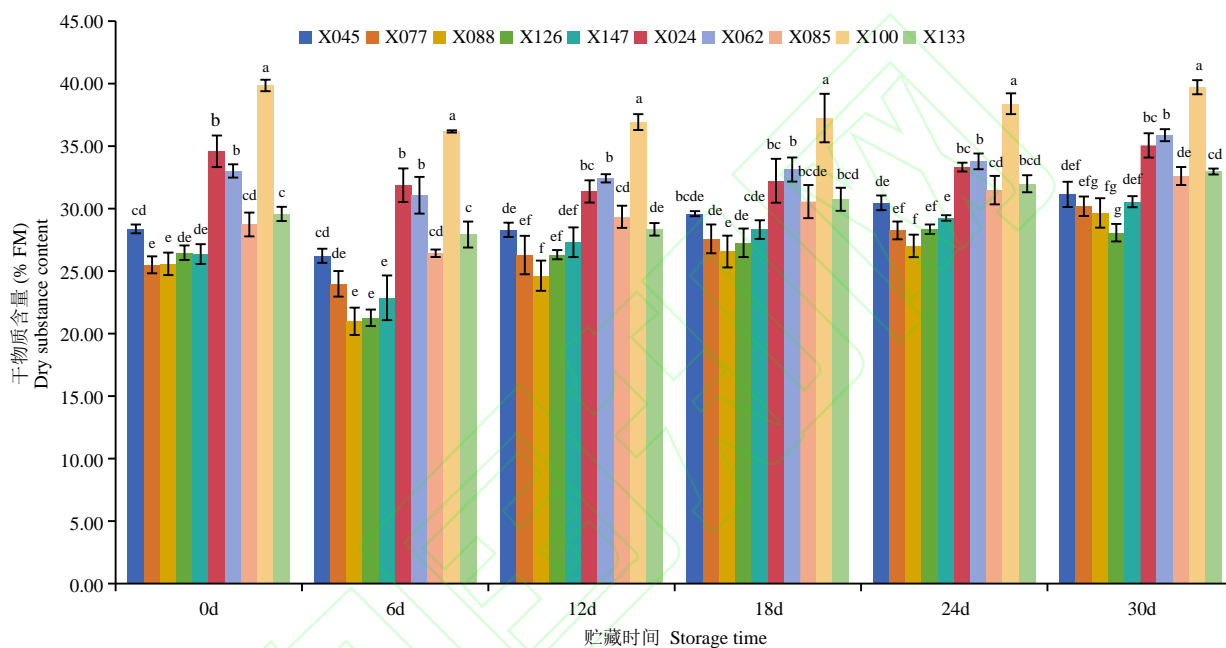


图1 木薯块根采后贮藏期间腐烂程度对比图

Fig. 1 Comparison Chart of Rotting Degree in Cassava Tuber During Postharvest Storage

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 木薯块根采收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0d~6d干物质含量快速下降,6d后逐步回升。贮藏0d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6d,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24d,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。贮藏初期(0d~6d),各种质的干物质降幅差异较大,为5.61%~19.68%。其中,X126、X088降幅较大,分别为19.68%、17.98%,X147为13.27%,X077降幅较小(5.96%),但其后期(30d)上升幅度较大,较贮藏第6d增幅25.90%。贮藏0d至30d,X062干物质含量从33.01%升至35.88%(增幅8.70%)。



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 ($P < 0.05$), the same as below

图2 木薯自交系块根采收后贮藏期间干物质含量变化

Fig. 2 Dry matter content contrast of cassava inbred lines tuberous roots in different periods 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,随后逐步降低。贮藏0d,种质间淀粉含量存在差异,最高值出现在X100(79.03%),显著高于其他种质;最低值出现在X147(62.33%),其含量显著低于除X126(64.75%)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(10.5%),达87.33%,为10个种质中最高值;X147含量升至65.71%,仍为10个种质中最低值。X100在贮藏期间虽表现出较大波动(6d~30d降幅为21.9%),但其淀粉含量维持全程最高,30d时仍比次高种质X062高11.4%。相反,X147(49.82%)的含量始终最低,较峰值下降24.2%,两者间差异显著。

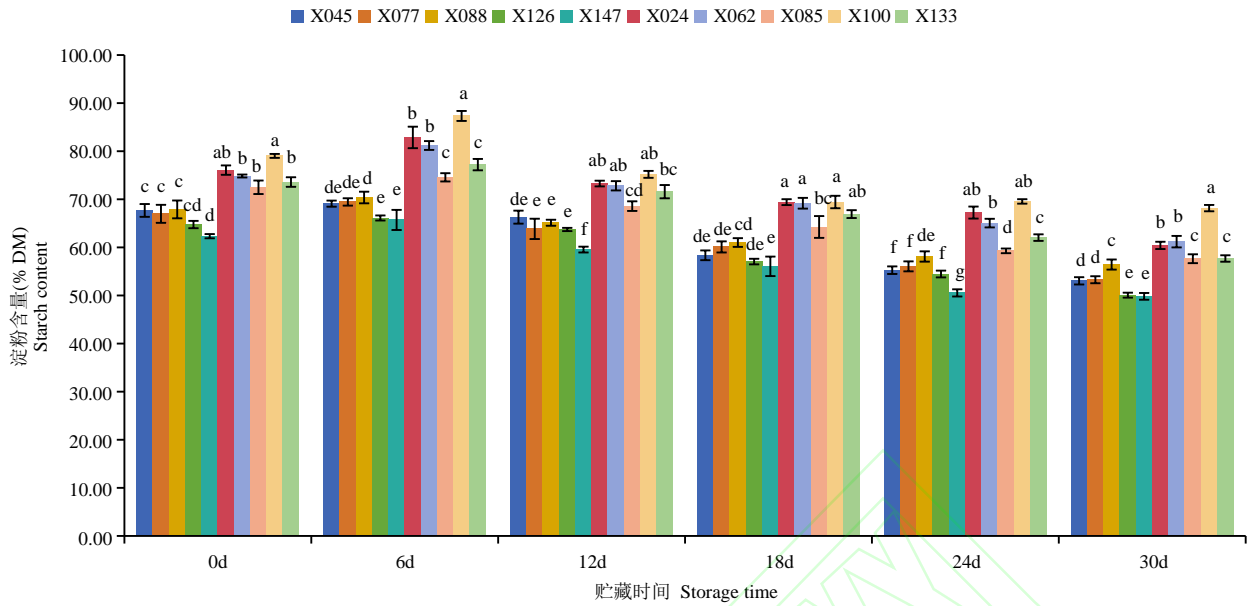


图3 木薯自交系块根采后贮藏期间淀粉含量变化

Fig. 3 Starch content contrast of cassava inbred lines tuberous roots in different periods of storage

2.2.3 β -胡萝卜素含量 由图4可知,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,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 -胡萝卜素含量变化有差异。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;X062、X085、X100和X133呈先上升后下降的趋势。贮藏初期(0d~6d)所有种质含量均上升,其中X077、X100和X088增幅较大,分别增幅72.5%、69.20%和66.70%;而X024和X062变化幅度不大变化幅度分别为0.03%和2.66%。贮藏中期(12d~24d),X024、X085、X147仍保持上升趋势,其中X085在24d达峰值(42.25%),是初始值的2.09倍;X133和X100分别在12d、18d达到峰值后,24d分别下降12.62%和19.90%。贮藏末期(30d),X100(35.64%)、X133(33.63%)、X062(30.54%)较24d进一步下降,X077(82.22%)、X088(79.66%)、X045(78.85%)在30d达到峰值,且显著高于其他种质。

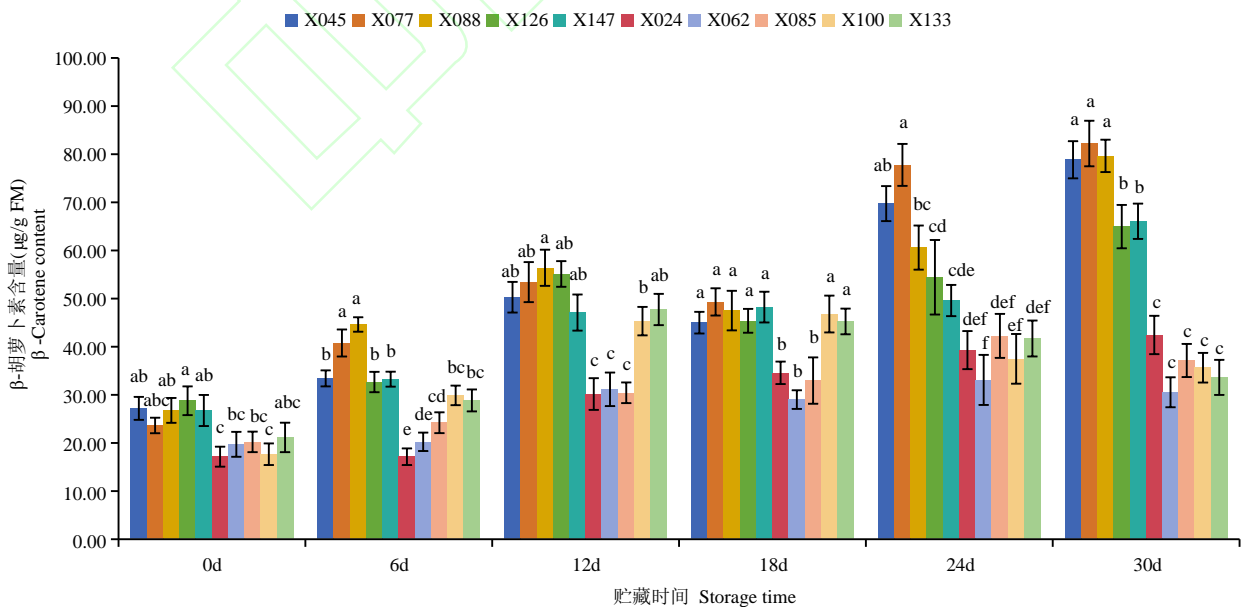


图4 木薯自交系块根采后贮藏期间 β -胡萝卜素含量变化

Fig. 4 Beta-carotene content contrast of cassava inbred lines tuberous roots in different periods 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, X085、X100、X133、X024、X062、X085、X100、X133 块根中 MDA 含量持续增长, 至贮藏 30d 达到峰值; X045 和 X147 先上升到中期达到后下降, 但仍高于贮藏 0d。X147 的 MDA 含量在贮藏 18d 时最高, 贮藏是 0d 的 1.29 倍, X045 的 MDA 含量在贮藏 24d 时达到峰值, 是 0d 的 1.44 倍。X085、X100、X133 在贮藏 18d~30d MDA 含量急剧上升, 24d 时分别为 0d 的 2.00 倍、2.13 倍、1.71 倍, 30d 时达到峰值。贮藏 24d~30d, X024、X062、X085、X100、X133 的 MDA 含量均高于 X045、X077、X088、X126、X147。

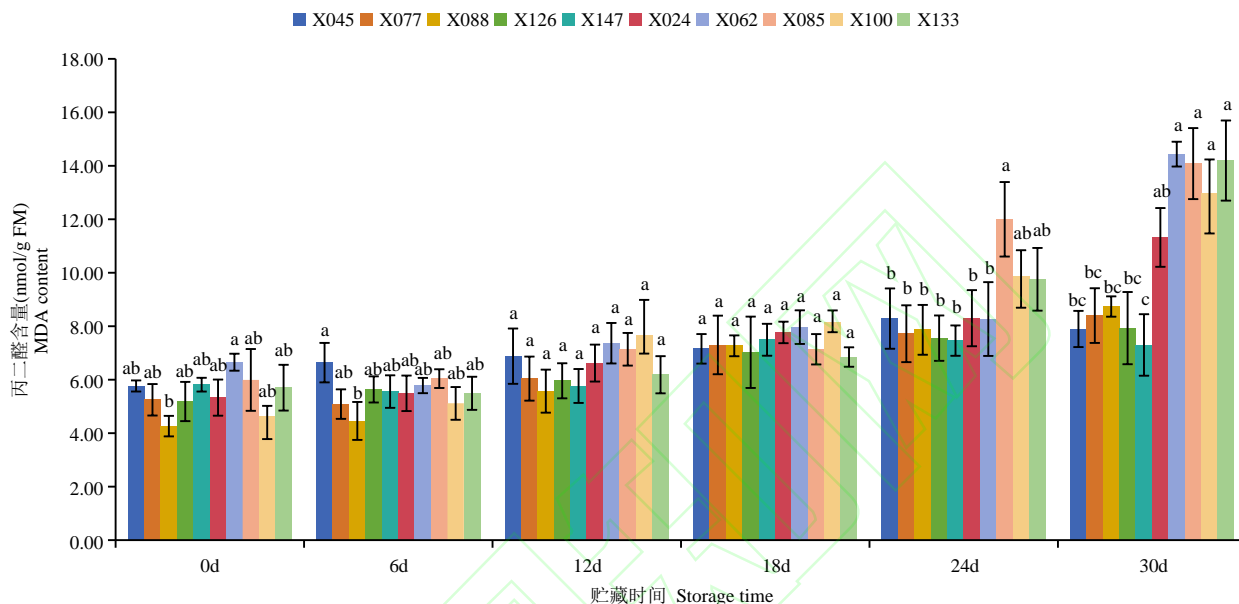


图 5 木薯自交系块根采后贮藏期间 MDA 含量变化对比

Fig. 5 MDA content contrast of cassava inbred lines tuberous roots in different periods of storage

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—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, 其中, SOD 活性最高的为 X045、最低的是 X062, 两者间差异显著。贮藏 6d, X147 的 SOD 活性最高, X133 次之, X100 最低; 贮藏 12d, 除 X147 含量低于 X133 外, X045、X077、X088、X126 均高于 X024、X062、X085、X100、X133 这五个种质。贮藏 18d~30d, X024、X062、X085、X100、X133 的 SOD 活性均高于 X045、X077、X088、X126、X147。贮藏 24d 时, SOD 活性由高到低排序依次为 X062>X085>X133>X100>X147>X024>X126>X088>X045>X077, 其中, SOD 活性最高的为 X062、最低的是 X077, 两者间差异显著。贮藏 24d 时, X062、X085、X133、X100、X147、X024、X126、X088、X045、X077 的 SOD 活性分别是 0d 的 2.59 倍、2.37 倍、1.83 倍、2.27 倍、1.80 倍、1.67 倍、1.58 倍、1.77 倍、1.34 倍、1.31 倍。

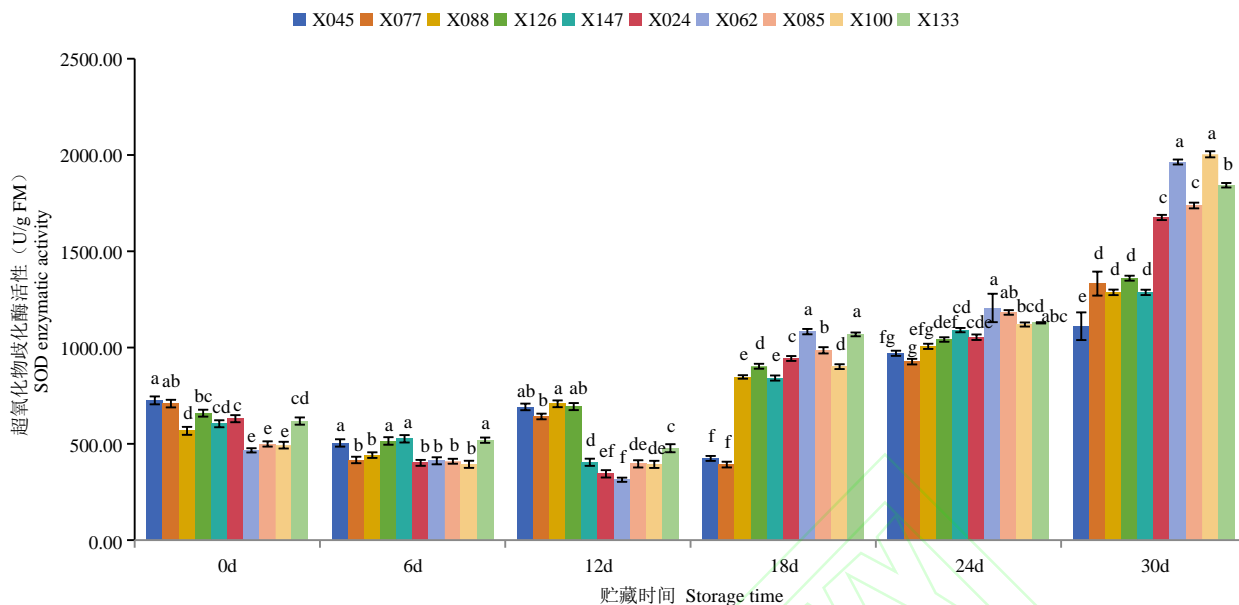


图 6 木薯自交系块根采后贮藏期间 SOD 活性变化对比

Fig. 6 SOD enzymatic activity of cassava inbred lines tuberous roots in different periods 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 整体上呈上升的变化趋势。除 X126 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，其中，CAT 活性最高的为 X045、最低的是 X024，两者间差异显著。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，其中，CAT 活性最高的为 X085、最低的是 X045，两者间差异显著。贮藏 24 d 时，X085、X100、X062、X133、X147、X024、X077、X088、X126、X045 的 CAT 活性分别是 0 d 的 2.57 倍、1.66 倍、2.58 倍、1.52 倍、1.44 倍、3.06 倍、1.38 倍、1.35 倍、1.59 倍和 1.17 倍。贮藏 18 d、30 d，X024、X062、X085、X100、X133 的 CAT 活性均高于 X045、X077、X088、X126、X147。

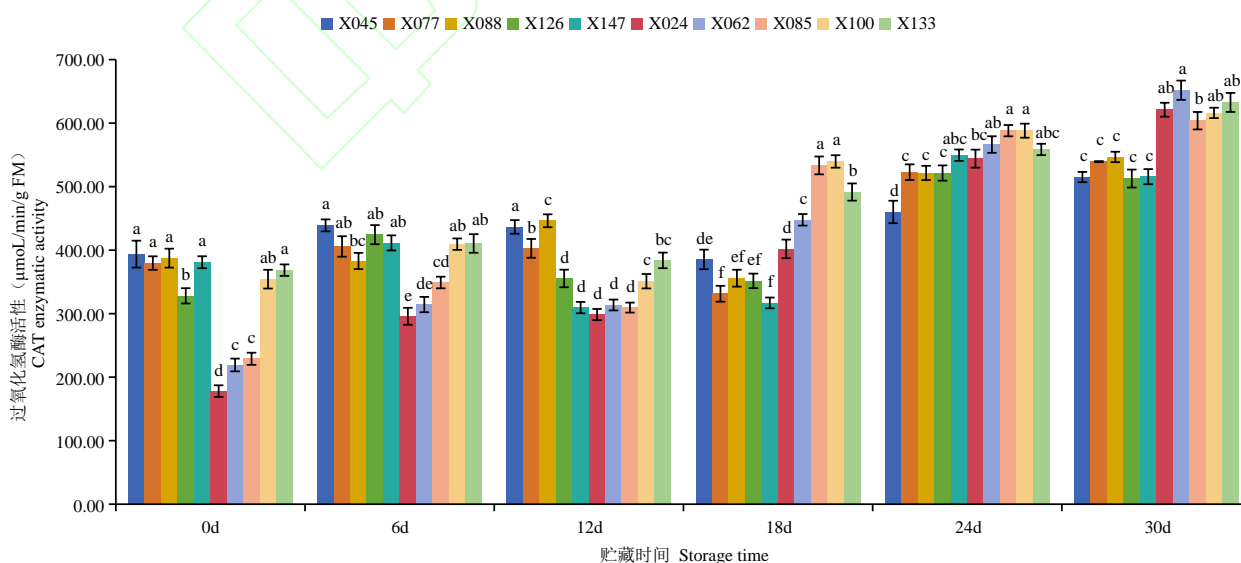


图 7 木薯自交系块根采后贮藏期间过 CAT 活性变化对比

Fig. 7 CAT enzymatic activity of cassava inbred lines tuberous roots in different 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，除 X133 呈现不断上升趋势外，其他种质整体上均呈现先下降后上升趋势。除 X133 外，最小值均出现在第 6 d；X088 最大值在 12 d，X147、X024、X085 和 X100 最大值在 24 d，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，其中，POD 活性最高的为 X077、最低的是 X062，两者间差异显著。贮藏 6 d~12 d，X133 的 POD 活性最高，X077 最低，两者间差异显著。贮藏 18 d~30 d，X024、X062、X085、X100、X133 的 POD 活性均高于 X045、X077、X088、X126、X147。贮藏 24 d 时，X100、X085、X133、X024、X062、X126、X045、X147、X077、X088 的 POD 活性分别是 0 d 的 9.74 倍、7.18 倍、8.42 倍、9.97 倍、10.67 倍、3.95 倍、4.61 倍、3.62 倍、3.11 倍、3.91 倍。

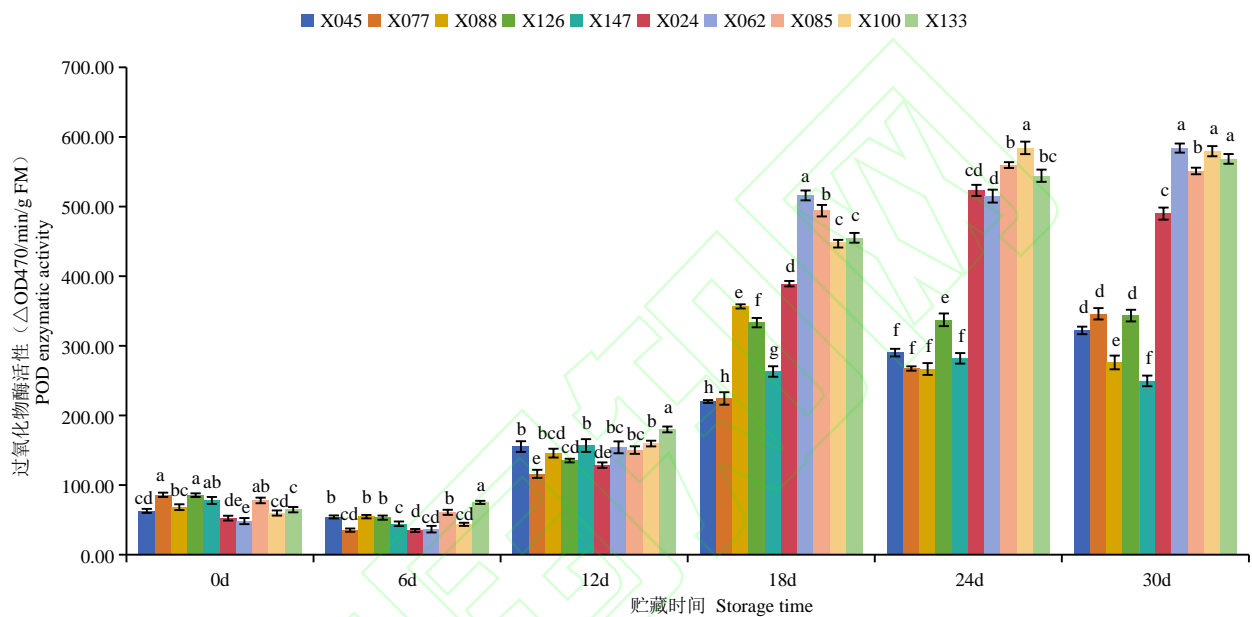


图 8 木薯自交系块根采后贮藏期间 POD 酶活性变化对比

Fig. 8 POD enzymatic activity of cassava inbred lines tuberous roots in different periods of storage

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，结果如表 2。由表可知，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（ROS）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，PPD 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，PPD 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 PPD 抗性差，细胞受损程度严重，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	干物质含量	淀粉含量	β-胡萝卜素含量	SOD 酶活性	CAT 酶活性	POD 酶活性	MDA 含量
Postharvest rotting degree	Dry matter content	Starch content	Beta-carotene content	SOD enzymatic activity	CAT enzymatic activity	POD enzymatic activity	MDA content
褐化面积	0.864**	0.845**	-0.763*	0.632*	0.644*	0.958**	0.721*
browning area							

** 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

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PPD抗性进行调查,筛选出5个抗PPD、耐贮性好的种质,分别为X045、X077、X088、X126、X147,以及5个不抗PPD、耐贮性差的种质,分别为X024、X062、X085、X100、X133。其中,不抗PPD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,PPD等级均达6级,块根大面积腐烂;而抗PPD种质X126和X045在贮藏24d才陆续出现轻微褐化情况,PPD等级均达1级,X077、X088和X147贮藏至第30d发生褐化,但发生程度轻,PPD等级均为1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PPD等级普遍进入二级以上(X062=20%,X100=55%),贮藏24d时抗性较好种质X045出现10%褐变,而不抗种质褐化面积已超50%,表明该时间点可作为抗性筛选的临界窗口。此外,可筛选X077、X088、X147等抗PPD种质可作为木薯耐贮性育种提供核心亲本,而不抗种质X024和X100的快速劣变特征亦可成为解析PPD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^[32]。高干物质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^[33],却因其采后代谢活动(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^[33-34]。类胡萝卜素最重要的特性之一是能够清除ROS,因此是植物抗氧化防御系统的一个组成部分^[35]。研究表明, β -胡萝卜素可延缓块根的腐烂^[19,36]。由表1和图2、3可知,木薯块根贮藏前期(0d~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^[37]。X077、X088、X147贮藏初期(0d~6d)干物质降幅大,但其后期恢复率较低,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30d达100%(PPD六级)。说明这些种质因淀粉降解产生大量还原糖,为ROS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,PPD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。袁帅等^[38]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^[17]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。这和前人的研究结果一致。此外,Morante等^[19]和Drapal等^[36]认为类胡萝卜素具有抗氧化作用,富含类胡萝卜素的木薯品种能够延缓PPD的发生。本研究结果还显示,抗PPD种质 β -胡萝卜素含量普遍高于不抗PPD种质,且抗PPD种质块根出现褐化时间较迟、发生程度轻。其中,X077和X088呈先上升后下降再上升的趋势,在贮藏前期(0d~6d)增幅最大,其后期(12d~24d)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呈先上升后下降的趋势,在12d~18d达到峰值,而后下降。该类种质贮藏后期采后生理腐烂程度不断加重,其 β -胡萝卜素含量下降可能与贮藏中后期活性氧(ROS)积累加速氧化裂解有关。相关性分析结果表明,褐化面积与 β -胡萝卜素含量显著负相关。研究结果与罗妙明等^[20]、Sánchez等^[21]的结果相一致。Sánchez等^[21]、罗妙明等^[20]以及Drapal等^[36]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。说明,采后腐烂程度低、抗PPD的木薯种质,其 β -胡萝卜素含量高。可见, β -胡萝卜素的抗氧化特性在延缓PPD发生中发挥着重要作用。由此推测,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,而 β -胡萝卜素通过直接清除ROS维持氧化还原稳态。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。丙二醛(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^[39-40]。大量研究表明,随着贮藏时间的延长,果

实中积累的丙二醛含量增加^[41-43]。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ROS积累有关,其耐贮性差;X147增幅较小,24d时MDA仅为0d的1.28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(24d~30d),抗PPD种质MDA含量普遍高于不抗PPD种质,与贮藏0d相比,贮藏30dMDA含量增幅小于不抗PPD种质。块根褐化面积与MDA含量显著正相关。说明抗PPD种质在贮藏期间,其细胞膜受损伤程度较轻,究其原因可能是抗PPD种质具有更强的抗氧化能力,能够有效减轻PPD引起的氧化应激反应。植物在逆境条件下丙二醛会积累增加,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^[39,44]。本研究结果与前人^[39,44]一致。木薯块根贮藏期间MDA含量的变化直接反映膜脂过氧化程度。丙二醛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^[45]。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^[40]。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^[46]。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^[15]。本研究结果显示,贮藏前期(0~12d),各种质酶活性均较低,但整体上抗PPD种质SOD、CAT和POD酶活性高于不抗PPD种质;而贮藏后期(18~30d),不抗PPD种质SOD、CAT和POD酶活性从贮藏18d开始不断增减,抗PPD种质从贮藏24d开始不断上升,且不抗PPD种质3个酶活性明显高于抗PPD种质,均在贮藏第30d达到峰值。以上说明在贮藏前期,抗PPD种质比不抗PPD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18d开始,不抗PPD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,以增强其对PPD逆境的抵御能力,这是植物应对逆境胁迫的一种氧化应激反应^[40]。樊吴静等研究发现,SOD、POD和CAT酶活性显著高于变质抗性强的淀粉较低品种^[47]。本研究发现,贮藏前期(0d~12d),PPD耐性强、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,PPD耐性差的种质如X062,但贮藏后期(18d~30d)反之,X062高于X045。本研究结果与樊吴静等^[47]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^[47]的实验设计中,块根的最长贮藏时间为20d,此时不抗PPD品种RS01已经全部褐化,但是并没有处理腐烂的现象。本研究延长贮藏时间至30d,此时不抗PPD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,但其复杂但其多因子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,筛选了抗PPD和不抗PPD材料各5个,其中抗PPD材料为X045、X077、X088、X126、X147,不抗PPD材料为X024、X062、X085、X100、X133。并测定该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和SOD、CAT和POD活性,分析其与块根的褐化面积(24d)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,PPD抗性越差。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PPD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PPD种质的遗传基础,解析木薯抗PPD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

- Dun 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>
- [2] Chen Q, Liang X, Wu CL, Gao JT, 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
- [3] 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>
- 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>
- [4] Hu W, Kong H, Guo Y, Zhang Y L, Ding Z H, Tie W W, Yan Y, Huang Q X, Peng M, Shi H T, Guo A P. Comparative physiological and transcriptomic analyses reveal the actions of melatonin in the delay of postharvest physiological deterioration of cassava. *Frontiers in Plant Science*, 2016,7:736
- [5] 安飞飞, 蔡杰, 薛晶晶, 朱文丽, 陈松笔, 罗秀芹. 类黄酮合成关键基因MeF3H在木薯块根采后腐烂中的功能分析. *中国农业大学学报*, 2024, 29(1): 31-39
- An F F, Cai J, Xue J J, Zhu W L, Chen S B, Luo X Q. Functional analysis of *MeF3H*, a key gene for flavonoid synthesis, in cassava postharvest deterioration. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(1): 31-39
- [6] Zainuddin I M, Fathoni A, Sudarmonowati E, Beeching J R, Gruissem W, Vanderschuren H. Cassava post-harvest physiological deterioration: From triggers to symptoms. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 142: 115-123
- [7] Mbinda W, Mukami A. Breeding for postharvest physiological deterioration in cassava: Problems and strategies. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2022, 3: 30
- [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] 安飞飞, 薛晶晶, 韦卓文, 陈松笔. 小甘露糖苷酶与木薯块根采后生理变质的关系. *江苏农业科学*, 2022, 50: 165-169
- An F F, Xue J J, Wei Z W, Chen S B. The relationship between α -mannosidase and postharvest physiological deterioration in cassava tuberous root. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50: 165-169
- [13] 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
- [14] Ravi V and Aked J. Review on tropical root and tuber crops. II. Physiological disorders in freshly stored roots and tubers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1996, 36: 711-731
- [15] Beeching J R, Reilly K, GómezVázquez 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
- [16] Reilly K, Bernal D, Cortés D F, Gómez-Vázquez 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
- [17] 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
- [18] 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,

- [19] 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
- [20] 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
- [21] Sanchez 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
- [22] Reilly K, Bernal D, Cortés D F, Gómez-Vázquez 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
- [23] 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
- [24] 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. Abscisic 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
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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
- [32] 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
- [33] Ceballos H, Fregene M, Pérez J C, Morante N, Calle F. Cassava genetic improvement// Kang M S, Priyadarshan P M. *Breeding Major Food Staples*. Ames, IA, US: Blackwell Publishing, 2007: 365-391
- [34] 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
- [35] 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
- [36] 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

- [37] 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
- [38] 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 germplasm in the field. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(7): 2316-2321
- [39] 王旭明, 麦绮君, 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 germplasm. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(2): 149-156
- [40] 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
- [41] 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
- [42] 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
- [43] 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
- [44] 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
- [45] 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
- [46] 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 X, 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
- [47] 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