

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2024)01-0010-11

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2024.01.002

马铃薯抗褐变品种的鉴定与筛选

商靖雯^{1,2}, 石 瑛^{1,2}

(1. 东北农业大学农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 寒地粮食作物种质创新与生理生态教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 褐变是马铃薯贮藏和加工过程中常见现象, 影响其营养、感官和食味品质, 降低其商品价值。以24个马铃薯品种为试验材料, 通过测定多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)活性、褐变强度、维生素C含量和褐化指数4个相关指标, 对不同马铃薯品种抗褐变能力进行综合鉴定和评价。不同马铃薯品种PPO活性、褐变强度、维生素C含量、褐化指数均存在明显差异。选择PPO活性在15 U以内的11个品种为预选褐变材料; 选择维生素C含量在8 mg/100 g以上的7个品种为预选褐变材料; 选择初始褐变强度小于0.2, 变化值在0.5以内的7个品种为预选褐变材料; 选择24 h总褐化指数在Ⅱ级以内, 且开始发生褐变时间大于1 h的11个品种为预选褐变材料。对4个褐变相关指标进行相关性和聚类分析, 将测试的24个马铃薯品种聚为3类。类型Ⅰ为易褐变类型, 类型Ⅱ是中间水平类型, 类型Ⅲ是抗褐变类型。筛选出6个抗褐变马铃薯品种, 即‘东农314’‘东农324’‘东农325’‘东农328’‘延薯13号’和‘中薯5号’。研究可为马铃薯种质资源创新和抗褐变育种提供基础材料。

关键词: 马铃薯; 抗褐变; 多酚氧化酶; 褐化指数; 褐变强度

Identification and Screening of Brown-resistant Varieties in Potatoes

SHANG Jingwen^{1,2}, SHI Ying^{1,2}

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 2. Key Laboratory of Germplasm Enhancement, Physiology and Ecology of Food Crops in Cold Region, Ministry of Education, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: Browning is a common phenomenon in the storage and processing of potatoes, which can affect their nutritional, sensory and taste qualities, and reduce their commodity value. In this study, 24 potato varieties were used as experimental materials to comprehensively evaluate and identify the browning resistance of 24 potato varieties based on their polyphenol oxidase (PPO) activity, browning intensity, vitamin C content and browning index. There were obvious differences in PPO activity, browning intensity, vitamin C content and browning index in different potato varieties. Preliminary browning resistant materials were identified, including eleven varieties with PPO activity less than 15 U, seven varieties with vitamin C content more than 8 mg/100 g, seven varieties with initial browning intensity less than 0.2 and change value within 0.5, and 11 varieties with the total browning index in 24 h less than type Ⅱ and the initial

收稿日期: 2023-11-19

基金项目: 黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2022ZXJ06B02)。

作者简介: 商靖雯(1998-), 女, 硕士, 主要从事马铃薯育种研究。

*通信作者(Corresponding author): 石瑛, 教授, 主要从事马铃薯育种与栽培研究, E-mail: yshi@neau.edu.cn。

browning time more than 1 h. Four browning-related indexes were used for correlation analysis and cluster analysis, and the 24 potato varieties tested were clustered into three categories. Type I, II and III were browning prone type, medium type and browning resistant type, respectively. Finally, six browning-resistant potato varieties were identified, i.e. 'Dongnong 314', 'Dongnong 324', 'Dongnong 325', 'Dongnong 328', 'Yanshu 13' and 'Zhongshu 5'. This research would provide basic materials for germplasm resource innovation and browning resistant breeding of potatoes.

Key Words: potato; browning resistance; polyphenol oxidase; browning index; browning intensity

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是一种具备多用途的作物, 营养和经济价值较高^[1]。随着马铃薯生产规模不断扩大和人们生活水平不断提高, 消费者对马铃薯营养价值和加工质量的需求越来越高, 但加工过程中的机械损伤使马铃薯产生生理生化反应, 增加乙烯合成速率和膜脂过氧化程度, 引起马铃薯氧化褐变^[2,3]。褐变是马铃薯贮藏和加工过程中一种常见现象, 对其鲜食和贮运产生影响, 从而影响其营养、感官和食味品质, 降低商品价值^[3], 制约马铃薯加工业的迅速发展。

邵毅等^[4]及闵婷等^[5]将褐变类型分为两类: 其中有酶参与的称为酶促褐变, 没有酶参与的称为非酶促褐变。酶促褐变是水果和蔬菜生产中常见褐变类型, 对肉色浅的水果和蔬菜尤为明显^[6], 其反应发生迅速, 即在极短时间内可完成^[7]。酶促褐变是酚类物质在有氧条件下被酚酶催化形成醌及其聚合物形成的过程^[8]。例如, 当有机体受损或处于不良环境, 如受冻、受热时, 会使细胞发生破裂, 酶与其底物中的酚类化合物接触发生氧化反应, 然后与细胞中的蛋白质进一步聚合反应。产生的有色物质沉积在组织表面, 导致植物受损组织表面变成褐色, 从而发生褐变^[9]。多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)是引起组织褐变的主要酶类^[10], 存在于大多数果蔬中, 在酶促褐变反应中决定酶促褐变率的重要因素是组织中活性PPO和酚类化合物浓度, 抑制PPO活性能有效降低褐变发生。非酶促褐变反应主要指碳水化合物在热作用下的复杂反应^[11], 是不需要酶催化的复杂反应, 包括美拉德反应、抗坏血酸的氧化和脱镁叶绿素的褐变等^[12]。其中抗坏血酸(Ascorbic acid, AA)是一种较强的抗氧化剂和抗褐变剂, 具有良

好的还原性, 广泛应用于果蔬加工中^[13]。在酶促褐变中抗坏血酸能抑制PPO活性, 在褐变中间产物醌形成褐色色素前还原其为原始酚类化合物, 从而对抑制果蔬酶促褐变有较好效果。新鲜马铃薯的褐变主要是酶促反应造成的, 为降低新鲜马铃薯酶促褐变的发生, 大多数策略主要集中在PPO调控上^[14]。目前, 国内外对包括马铃薯在内的果蔬褐变进行了大量研究, 但大多集中于对褐变的预防, 比如控制PPO活性、降低多酚类物质含量、降低氧浓度等物理方法、化学方法和生物方法等^[15]。上述措施可有效控制褐变, 但在生产加工过程中会增加生产成本和增大工艺难度。因此, 随着对褐变机制的进一步研究, 培育抗褐变新品种已成为减少和解决褐变问题根源的有效途径^[16]。不同马铃薯品种的遗传特性各不相同, 因此褐变抗性在不同马铃薯品种中差异较大^[17]。

本研究以24份鲜食或加工品种为试验材料, 对其块茎进行褐变相关指标测定分析, 筛选出具有相对较高抗褐变能力的品种, 为后续选育抗褐变的马铃薯新品种提供基础育种材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取24份马铃薯品种为材料(表1), 其中鲜食类型: '克新25' '克新28号' '龙薯11' '龙薯12' '延薯13号' '尤金' '中薯5号'; 加工类型: '大西洋' '东农310' '东农312' '东农314' '东农317' '东农321' '东农322' '东农324' '东农325' '东农326' '东农328' '克新17号' '克新27号' '克新30号' '内-9' '维拉斯' '延薯5号'。所有试验品种均于2022年5月种植于东北农业大学向阳试验

实习基地, 并于9月收获。从收获的每个马铃薯品种中选取10个新鲜, 块茎大小一致, 无病虫害, 块茎完整, 无损伤, 表皮无霉菌, 无绿皮的马铃薯

薯块茎用于试验。

1.2 多酚氧化酶(PPO)活性测定

多酚氧化酶活性测定参考曹建康等^[15]方法。

表1 24个供试马铃薯品种

Table 1 Twenty-four potato varieties tested

编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety
1	大西洋 Atlantic	13	克新25 Kexin 25
2	东农310 Dongnong 310	14	克新27号 Kexin 27
3	东农312 Dongnong 312	15	克新28号 Kexin 28
4	东农314 Dongnong 314	16	克新30号 Kexin 30
5	东农317 Dongnong 317	17	龙薯11 Longshu 11
6	东农321 Dongnong 321	18	龙薯12 Longshu 12
7	东农322 Dongnong 322	19	内-9 Nei-9
8	东农324 Dongnong 324	20	维拉斯 Vilas
9	东农325 Dongnong 325	21	延薯5号 Yanshu 5
10	东农326 Dongnong 326	22	延薯13号 Yanshu 13
11	东农328 Dongnong 328	23	尤金 Youjin
12	克新17号 Kexin 17	24	中薯5号 Zhongshu 5

称取5.0 g马铃薯块茎, 将其放入研钵中, 加入5.0 mL提取缓冲液, 将其在冰浴条件下研磨成匀浆, 在4 ℃、12 000 r/min离心30 min, 收集上清液, 为酶提取液, 并放入4 ℃冰箱中保存。

在10 mL离心管中加入4.0 mL乙酸-乙酸钠缓冲液(50 mmol/L、pH 5.5)、1.0 mL邻苯二酚溶液(50 mmol/L)及100 μ L酶提取液。加入后立刻开始计时, 并将反应混合液倒入比色杯中, 置于分光光度计样品室中计数。以去离子水为对照, 在反应15 s时开始记录反应体系在波长420 nm处吸光值, 并将其作为初始值, 后每隔10 s记录1次, 进行连续测定, 并至少采集6个时间间隔的数据。设置每分钟OD₄₂₀变化0.01为1个PPO活性单位(U)。

1.3 褐变强度测定

褐变强度测定参考李山云等^[18]方法。

初始褐变强度测定: 称取10.0 g马铃薯块茎放入研钵, 冰浴环境研磨成匀浆, 置于30 ℃水浴锅中加热20 min, 取部分匀浆离心10 min, 以去离子水为对照, 测定离心后上清液在420 nm处吸光值。

24 h褐变强度测定: 将剩余材料于4 ℃放置24 h后, 取部分匀浆离心10 min, 并再次测定离心后上清液在420 nm处吸光值。

1.4 维生素C含量测定

采用2, 6-二氯酚酚滴定法测定马铃薯中维生素C含量^[16]。

1.5 褐化指数测定

褐化指数测定参考王清等^[19]方法。

每个品种选取3个大小相似无青皮的块茎, 洗净, 擦干, 均匀切出3片大小相似、厚0.5 cm的薯片, 置于室温(25 ℃)下, 拍照并测算第0、1、2、3、6、12和24 h褐变面积, 计算块茎褐化指数。褐变等级分为5级。0级: 无褐变; 1级: 褐变面积<25%; 2级: 25%≤褐变面积<50%; 3级: 50%≤褐变面积<75%; 4级: 褐变面积≥75%。

褐化指数 = $\sum [(\text{褐化级别} \times \text{该级别块茎数}) / (\text{最高级数} \times \text{总块茎数})] \times 100\%$

褐化指数根据褐变面积分为4级。I级: 褐化

指数 < 25%; II 级: 25% ≤ 褐化指数 < 50%; III 级: 50% ≤ 褐化指数 < 75%; IV 级: 褐化指数 ≥ 75%。褐化指数越高, 褐变程度越严重。

1.6 数据处理与分析

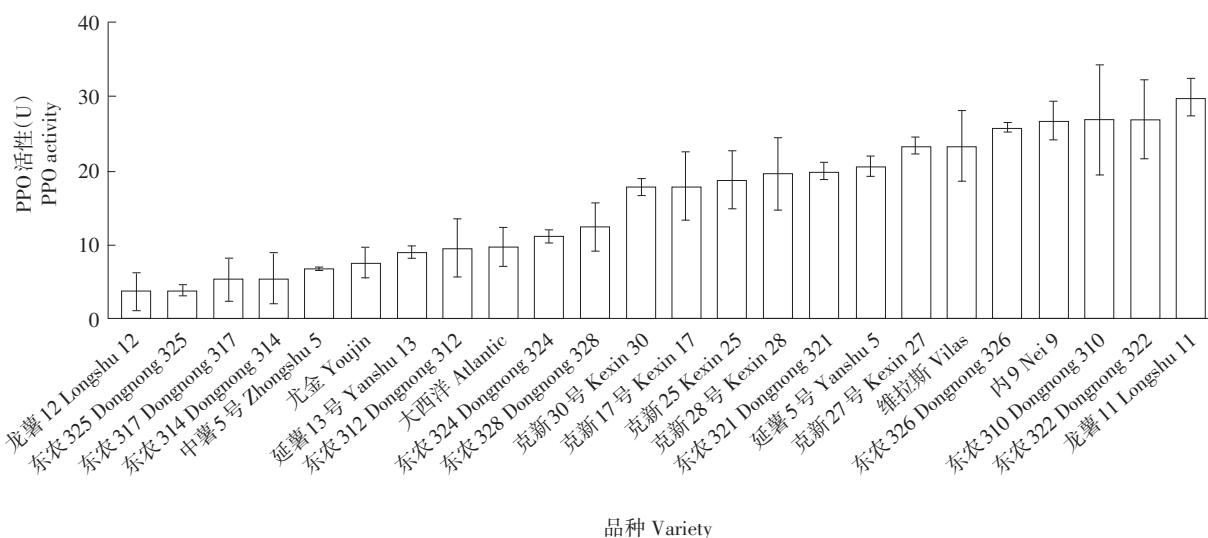
PPO 活性、褐变强度、维生素 C 含量、褐化指数运用 SPSS 19.0 和 Graphpad Prism 9.5 软件进行统计学分析并制图; 用 Microsoft Excel 2019 软件计算各个指标, 取 3 次重复的平均值并制表; 采用方差分析法、相关性分析法和聚类分析法等对数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同马铃薯品种 PPO 活性

本研究选定 PPO 活性 15 U 以内作为筛选抗褐

变预选材料标准。通过对不同马铃薯品种 PPO 活性测定, 发现其 PPO 活性存在明显差异(图 1)。PPO 活性变化为 3.800~29.900 U, 变异系数是 53.19%, 说明品种对 PPO 活性有较大影响。其中活性最低的是‘龙薯 12’, PPO 活性仅为 3.800 U, PPO 活性在 5 U 以下的材料有 2 份, 分别为‘龙薯 12’和‘东农 325’, 说明这两份材料在 PPO 活性方面有较好表现。PPO 活性在 15 U 以内的马铃薯材料有 11 份; 在 15~25 U 的材料有 8 份, PPO 活性高于 25 U 的材料有 5 份; 其中‘龙薯 11’的 PPO 活性最高为 29.900 U, 是‘龙薯 12’的 7.87 倍。综上分析, 符合要求的预选材料共有 11 份, 分别为‘龙薯 12’‘东农 325’‘东农 317’‘东农 314’‘中薯 5 号’‘尤金’‘延薯 13 号’‘东农 312’‘大西洋’‘东农 324’‘东农 328’。



注: 误差线代表标准差。下同。

Note: Error bar represent standard deviation. The same below.

图 1 不同马铃薯品种的 PPO 活性

Figure 1 PPO activity of different potato varieties

2.2 不同马铃薯品种褐变强度

不同马铃薯品种褐变强度存在明显差异(图 2)。初始褐变强度变化为 0.069~0.435, 变异系数为 38.09%, 其中‘大西洋’的初始褐变强度最低, 为 0.069, ‘内-9’的初始褐变强度最高, 为 0.435; 在 4 °C 放置 24 h 后所有品种褐变强度均有所上升, 变化为 0.216~1.603, 变异系数为 52.30%。

‘东农 314’褐变强度最低为 0.216, ‘内-9’褐变强度最高为 1.603。将马铃薯材料匀浆后 4 °C 放置 24 h, 在这过程中颜色随着褐变强度增加而加深。其中褐变强度在 0.300 以内, 匀浆呈现白色或者乳白色, 褐变强度在 0.300~0.500, 匀浆颜色呈橙红色或红棕色, 褐变强度大于 0.500, 匀浆颜色呈棕色甚至是黑色。

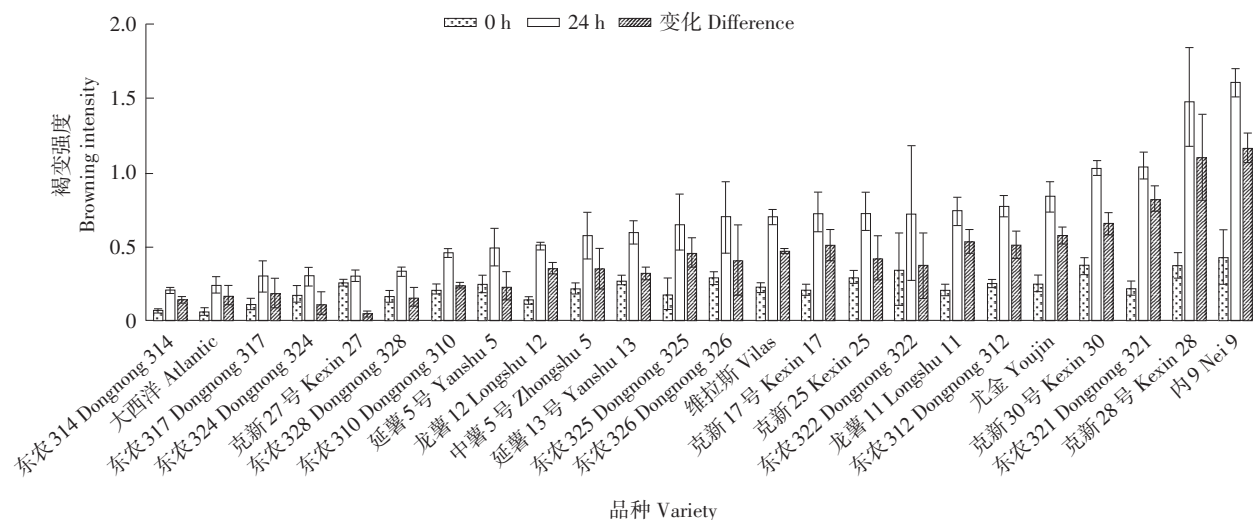


图2 不同马铃薯品种褐变强度

Figure 2 Browning intensity of different potato varieties

本研究选取初始褐变强度小于0.2, 变化值在0.5以内的7份品质品种, 作为抗褐变马铃薯预选材料(表2)。

2.3 不同马铃薯品种维生素C含量

本试验以维生素C含量在8.00 mg/100 g以上作为筛选抗褐变预选材料标准, 试验表明, 不同品种的维生素C含量存在差异(图3)。

维生素C的变化为5.19~12.54 mg/100 g, 变异系数是12.74%。其中‘东农328’的维生素C含量最

低, 为5.19 mg/100 g, ‘东农312’的维生素C含量最高, 为12.54 mg/100 g, 是‘东农328’的2.42倍。维生素C含量在6 mg/100 g以内的品种共有6个, 分别是‘东农328’‘克新30号’‘克新17号’‘东农326’‘克新27号’和‘东农317’; 维生素C含量在6~8 mg/100 g的材料有11份; 维生素C含量在8 mg/100 g以上符合要求的预选材料有7份, 分别为‘克新25’‘内-9’‘东农310’‘延薯13号’‘维拉斯’‘延薯5号’‘东农312’。

表2 预选品种褐变强度

Table 2 Browning intensity of preselected varieties

品种 Variety	褐变强度 Browning intensity		
	30 °C/20 min	4 °C/24 h	变化 Difference
东农324 Dongnong 324	0.187±0.049	0.311±0.053	0.124±0.071
东农314 Dongnong 314	0.070±0.014	0.216±0.017	0.146±0.024
东农328 Dongnong 328	0.174±0.038	0.339±0.025	0.165±0.063
大西洋 Atlantic	0.069±0.018	0.246±0.056	0.177±0.061
东农317 Dongnong 317	0.121±0.035	0.310±0.098	0.189±0.102
龙薯12 Longshu 12	0.151±0.012	0.512±0.022	0.361±0.033
东农325 Dongnong 325	0.187±0.103	0.653±0.203	0.466±0.101

注: 数据为平均值±标准差。下同。

Note: Data are expressed as mean±standard deviation. The same below.

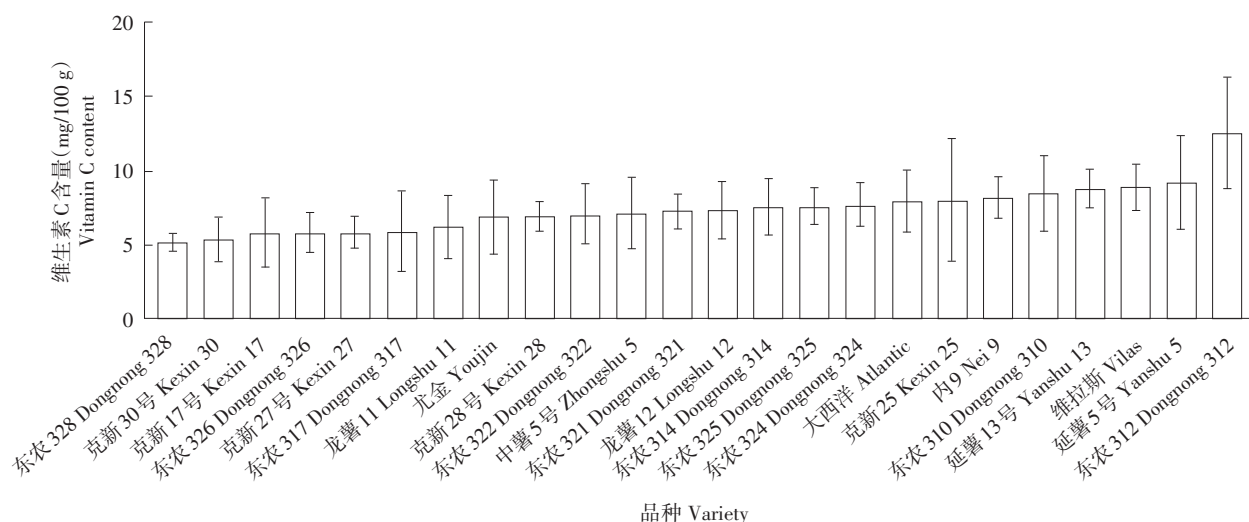


图3 不同马铃薯品种维生素C含量

Figure 3 Vitamin C content of different potato varieties

2.4 不同马铃薯品种切片观察和褐化指数

褐变程度随时间逐渐增加,切片3 h时所有品种均发生褐变(图4)。其中‘东农317’‘东农310’‘东农312’‘东农326’‘克新17号’‘内-9’‘维拉斯’和‘延薯5号’在试验开始1 h内发生褐变;在1~2 h发生褐变的材料有8份,分别是‘克新27号’‘龙薯12’‘大西洋’‘东农322’‘克新25’‘克新30号’‘龙薯11’‘尤金’。

在空气中放置1 h后,部分材料发生褐化(图5),有15份材料褐化指数为Ⅰ级,6份材料褐化指数为Ⅱ级;切片3 h时,有1份材料褐化指数为Ⅰ级,15份材料褐化指数为Ⅱ级,7份材料褐化指数为Ⅲ级,1份材料褐化指数为Ⅳ级,严重褐化;切片6 h时,部分品种褐变程度逐渐增加,有1份材料的褐化指数为Ⅰ级,12份材料的褐化指数为Ⅱ级,6份材料的褐化指数为Ⅲ级,5份材料的褐化指数为Ⅳ级;切片12 h时,有1份材料的褐化指数为Ⅰ级,8份材料的褐化指数为Ⅱ级,8份材料的褐化指数为Ⅲ级,7份材料的褐化指数为Ⅳ级;24 h后,褐化指数为Ⅰ级的材料有1份,为‘东农314’,褐化指数为Ⅱ级的材料有6份,褐化指数为Ⅲ级的材料有6份,褐化指数为Ⅳ级的材料有11份,严重褐化。

本试验将开始发生褐变时间大于1 h,24 h总褐化指数在Ⅱ级以内的11份品种作为抗褐变马铃薯

薯预选材料(表3)。

2.5 马铃薯品种各生理指标的聚类分析

将马铃薯褐变指标进行相关性分析(表4)。在新鲜马铃薯块茎中褐化指数与PPO活性相关系数0.642($P<0.01$),呈极显著正相关,说明PPO活性越高马铃薯块茎越易发生褐变,且褐变程度较高;褐化指数与初始褐变强度相关系数0.437($P<0.05$),呈显著正相关,说明初始褐化指数在一定程度上能预测马铃薯褐变情况,初始褐变强度越高马铃薯块茎越易发生褐变;褐化指数与24 h后褐变强度相关系数0.453($P<0.05$),也呈显著正相关,说明24 h后褐变强度越大马铃薯褐变情况越高;褐化指数与维生素C含量不存在显著相关性。

对褐变程度的相关指标(PPO活性、初始褐变强度、24 h后褐变强度和褐化指数)采用K-Means聚类法进行聚类分析,将测试的24个马铃薯品种聚为3类(图6)。类型Ⅰ为易褐变类型,共6个,包括‘克新25’‘克新30号’‘克新17号’‘延薯5号’‘克新28号’和‘东农321’,其PPO活性、初始褐变强度、24 h后褐变强度、褐化指数都是最高的;类型Ⅱ是中间水平类型,共7个,包括‘维拉斯’‘克新27号’‘龙薯11’‘内-9’‘东农326’‘东农322’和‘东农310’,其PPO活性、初始褐变强度、24 h后褐变强度、褐化指数均处于中间水平;类型Ⅲ是抗褐

变的类型, 共 11 个, 包括‘龙薯 12’‘东农 325’‘东农 317’‘东农 314’‘东农 328’‘东农 324’‘中薯 5 号’‘尤金’‘延薯 13 号’‘东农 312’和‘大西洋’, 其 PPO 活性、初始褐变强度、24 h 后褐变强度、褐化指数

是最低的, 有较好的抗褐变特性。综合分析可知, 新鲜马铃薯的褐变与 PPO 活性、初始褐变强度、24 h 后褐变强度、褐化指数相关, 与维生素 C 含量相关性不明显。

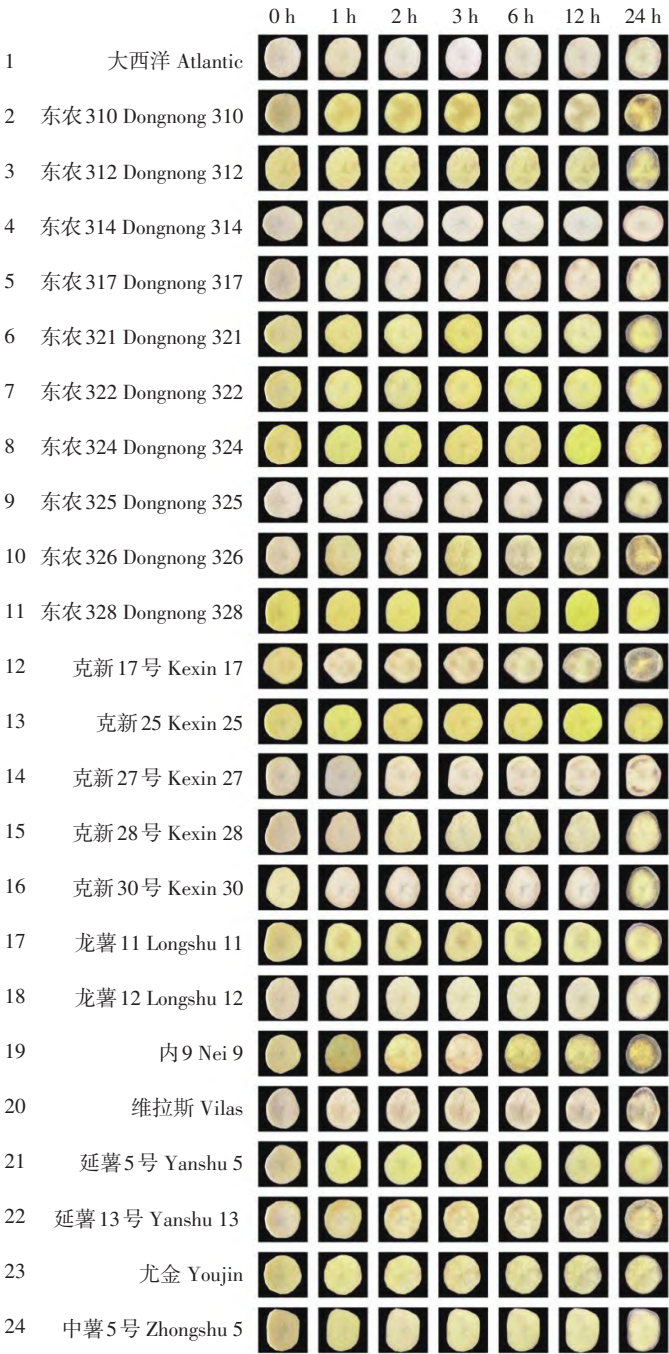


图 4 不同马铃薯品种切片的褐变表型

Figure 4 Browning phenotype of slices of different potato varieties

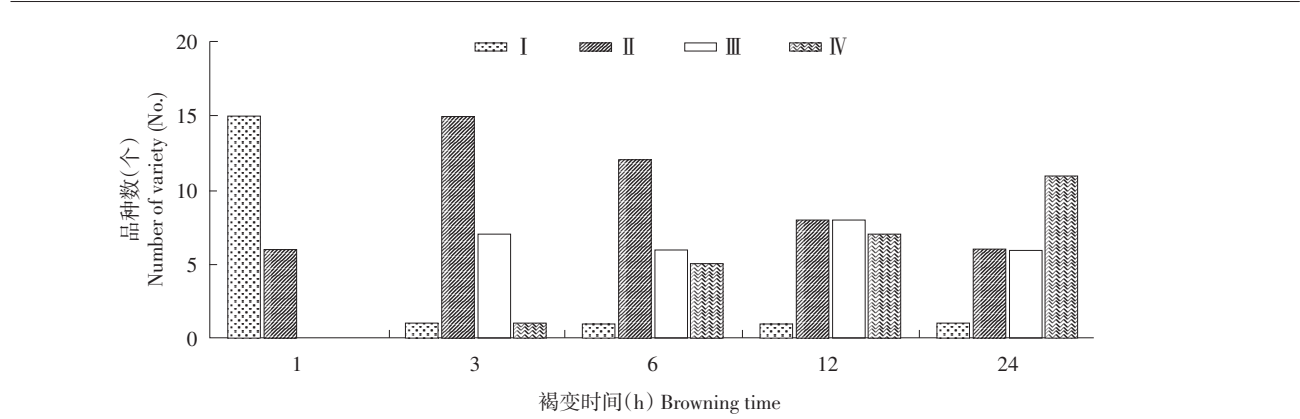


图5 不同马铃薯品种的褐化指数

Figure 5 Browning index of different potato varieties

表3 预选品种的褐化指数

Table 3 Browning indexes of preselected varieties

品种 Variety	初始褐变时间(h) Initial browning time	褐化指数(%) Browning index					均值 Average
		1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	
东农 314 Dongnong 314	3	0	16.7	16.7	25.0	25.0	16.7
延薯 13 号 Yanshu 13	3	8.3	25.0	25.0	33.3	25.0	23.3
东农 328 Dongnong 328	3	8.3	25.0	25.0	41.7	16.7	23.3
东农 324 Dongnong 324	3	8.3	25.0	25.0	41.7	41.7	28.3
大西洋 Atlantic	2	8.3	25.0	33.3	33.3	50.0	30.0
克新 25 Kexin 25	3	0	33.3	33.3	41.7	41.7	30.0
东农 317 Dongnong 317	2	0	33.3	33.3	41.7	41.7	30.0
东农 325 Dongnong 325	3	8.3	33.3	41.7	50.0	50.0	36.7
中薯 5 号 Zhongshu 5	3	8.3	33.3	41.7	50.0	50.0	36.7
尤金 Youjin	2	8.3	41.7	41.7	66.7	66.7	45.0
克新 30 号 Kexin 30	2	8.3	41.7	50.0	58.3	75.0	46.6

表4 褐变指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of browning indicators

项目 Item	PPO 活性 PPO activity	初始褐变强度 Initial browning intensity	24 h 后褐变强度 Browning intensity after 24 h	维生素 C 含量 Vitamin C content
初始褐变强度 Initial browning intensity	0.568**			
24 h 后褐变强度 Browning intensity after 24 h	0.401	0.804**		
维生素 C 含量 Vitamin C content	0.121	0.031	0.047	
褐化指数 Browning index	0.642**	0.437*	0.453*	0.252

注：*, **分别表示0.05和0.01水平差异显著。
Note: *, ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

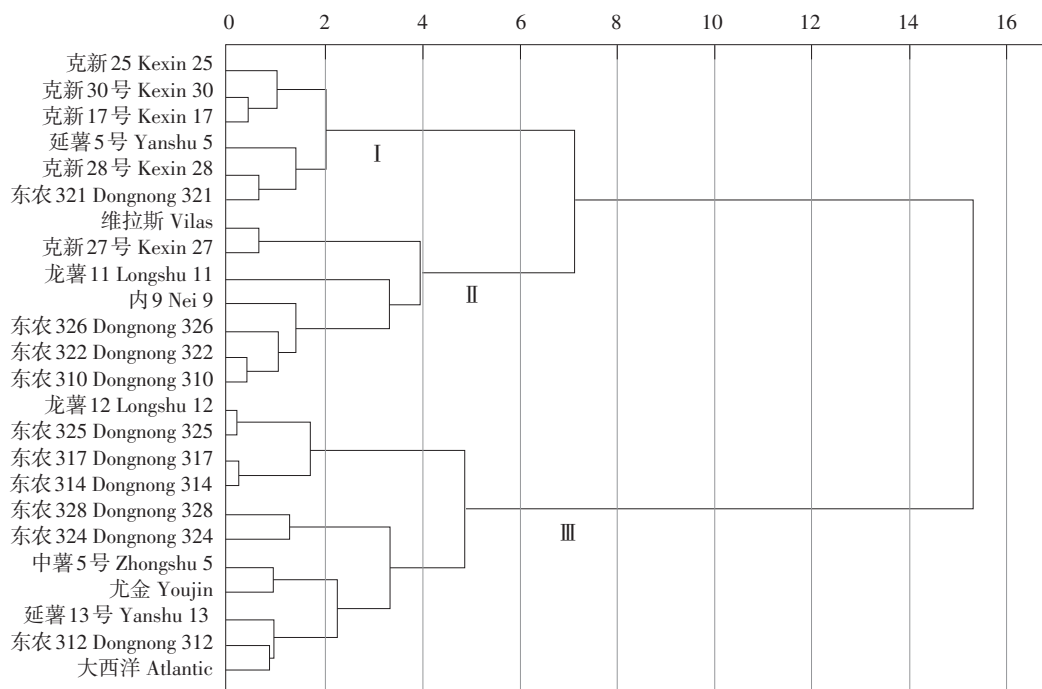


图6 不同马铃薯品种褐变指标的聚类分析

Figure 6 Cluster analysis of browning indicators of different potato varieties

2.6 马铃薯品种抗褐变能力的综合评价

经相关性分析, 抗褐变材料要求其 PPO 活性、褐变强度及褐化指数均较低。本试验测定了 4 个褐变相关指标, 因褐化指数和褐变强度能直观体现褐变情况, 且两者均采用多时间点观察方法能更准确观察褐变趋势, 所以在满足褐化指数和

褐变强度前提下, 结合 PPO 活性对测定结果进行综合分析。在类型Ⅲ抗褐变的 11 个品种中‘东农 314’‘东农 328’‘延薯 13 号’‘东农 324’‘东农 325’‘中薯 5 号’拥有更低的褐化强度及褐化指数, 有更好的抗褐变能力。因此, 筛选出这 6 个品种作为抗褐变材料(表 5)。

表5 不同马铃薯品种褐变指标综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of browning indicators of different potato varieties

品种 Variety	PPO 活性(U) PPO activity	褐变强度 Browning intensity			褐化指数(%) Browning index
		30 °C/20 min	4 °C/24 h	变化 Difference	
东农 314 Dongnong 314	5.5±3.4	0.070±0.014	0.216±0.017	0.146±0.024	16.7
东农 328 Dongnong 328	12.4±3.3	0.174±0.038	0.339±0.025	0.165±0.063	23.3
延薯 13 号 Yanshu 13	9.0±0.8	0.279±0.034	0.604±0.072	0.325±0.040	23.3
东农 324 Dongnong 324	11.2±0.9	0.187±0.049	0.311±0.053	0.124±0.071	28.3
东农 325 Dongnong 325	3.9±0.7	0.187±0.103	0.653±0.203	0.466±0.101	36.7
中薯 5 号 Zhongshu 5	6.8±0.2	0.226±0.038	0.584±0.149	0.358±0.138	36.7

3 讨 论

马铃薯褐变包括酶促褐变与非酶褐变, 褐变普遍发生在加工、贮藏和鲜食中, 严重影响马铃薯品质, 而抗褐变马铃薯品种的选育是解决马铃薯鲜食和加工中发生酶促和非酶促褐变的根本途径^[20]。抗褐变能力的材料筛选主要通过褐化指数和褐变强度2个指标进行评价, 这与陈明俊等研究一致^[21], 褐化指数和褐变强度是衡量马铃薯块茎褐化的主要指标, 能直接体现马铃薯的褐变情况。两者区别在于, 前者直接将块茎进行切片处理, 褐变仅受破碎切面区多酚氧化酶和酚类物质的影响, 而后者则是通过完全研磨, 打破多酚氧化酶和酚类物质的区域化分布, 达到充分接触^[19]。本试验选取与褐变程度相关性较强PPO活性、褐变强度和褐化指数3个指标对马铃薯材料进行筛选, 通过聚类分析将材料聚为3类, 类型Ⅰ为易褐变类型、类型Ⅱ是中间水平类型、类型Ⅲ是抗褐变类型, 在抗褐变的类型Ⅲ中筛选出抗性相对较好的6个马铃薯材料, 为‘东农314’‘东农324’‘东农325’‘东农328’‘延薯13号’和‘中薯5号’。

通过观察切片的褐化面积计算得出褐化指数, 可直观展现马铃薯褐变情况, 本试验参考陈明俊等^[21]和王丽等^[3]筛选标准, 将开始发生褐变时间大于1 h, 24 h总褐化指数在Ⅱ级以内作为抗褐变预选材料。褐变强度没有统一的分类标准, 本试验参考王海艳等^[22]筛选标准确定, 根据统计观察本试验将初始褐变强度设置为0.2, 变化褐变强度设置为0.5。此外, 本试验通过对褐化指数和褐变强度2个指标进行相关性分析发现, 褐化指数与初始褐变强度和24 h褐变强度均存在显著正相关关系, 说明两者可能存在协同性。

温靖等^[23]发现果蔬中PPO活性与果蔬贮藏加工过程中出现的褐变密切相关。本试验参考陈明俊等^[21]筛选标准将PPO活性在15 U以内作为抗褐变预选材料, 经试验分析在15 U以内的品种PPO活性增加趋势较为缓慢, PPO活性越低越抗褐变, 因此将15 U以内的材料作为预选材料。通过对褐化指数和PPO活性的相关性分析发现, 褐化指数与PPO

活性存在极显著正相关关系, 即PPO活性越低褐变程度越低。鞠志国等^[24]对莱阳茡梨研究发现, 梨组织褐变程度与组织中PPO活性呈显著正相关。董喆等^[25]在葡萄多酚氧化酶研究中发现, 不同葡萄品种PPO活性也存在差异, PPO活性与品种褐变存在线性关系, 这与本试验研究结果一致。

维生素C可抑制PPO活性及其催化氧化还原反应^[26], 且维生素C对PPO活性有一定抑制作用, 即添加抗氧化剂维生素C越多, PPO活性越低。经试验分析, 不同品种维生素C含量差距较小, 因此选定维生素C含量为8.00 mg/100 g以上的品种作为预选材料。但本试验并未发现维生素C含量与褐变程度存在相关性。杨铭铎和龙志芳^[27]发现马铃薯中维生素C含量与多酚氧化酶活性存在相关性, 但马铃薯褐变度与维生素C含量两者不存在线性关系。

抗褐变品质受多种因素影响。目前, 对马铃薯褐变机理和抗褐变品种分类及筛选研究较少, 前人研究^[28-30]主要集中在探究马铃薯多酚氧化酶活性和筛选抗褐变抑制剂。本试验测定4个褐变相关指标, 通过相关性分析最终选定3个相关性强且具有代表性指标进行深入评价, 这种方法使评价和分析结果更有说服力, 并为抗褐变新品种选育和褐变理论研究提供基础材料。

本试验通过测定和分析24个马铃薯品种4个褐变相关指标, 可较为全面评价马铃薯褐化特性, 为马铃薯抗褐变品种筛选和抗褐变育种提供有效方法。本试验筛选出6个抗褐变马铃薯品种均具有较高抗褐变能力和抗性指标, 可为抗褐变育种和种质资源创新提供基础材料, 解决加工和生产过程中褐变问题。其他褐变程度较高的品种可用于马铃薯褐变机理的基础研究。

[参 考 文 献]

- [1] 韩黎明. 马铃薯加工现状分析及对策建议[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2011(12): 20-25.
- [2] 刘晓慧, 张爱冬, 尚静, 等. 不同茄子抗褐变种质资源的鉴定与筛选[J]. 分子植物育种, 2023, 21(3): 997-1005.
- [3] 王丽, 王万兴, 索海翠, 等. 马铃薯块茎酶促褐变及与相关生理

- 指标的关系[J]. 园艺学报, 2019, 46(8): 1519-1530.
- [4] 邵毅, 罗云波, 陈安均, 等. 1-MCP处理和贮藏温度对黑宝石李果肉褐变的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 128-133.
- [5] 闵婷, 谢君, 郑梦林, 等. 果蔬采后酶促褐变的机制及控制技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 273-276.
- [6] 黄彭, 丁捷, 胡晓敏, 等. 鲜切果蔬物理防褐保鲜的研究进展[J]. 园艺学报, 2021, 48(6): 1217-1232.
- [7] 沈金玉, 黄家音, 李晓莉. 果蔬酶促褐变机理及其抑制方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2005(6): 150-156.
- [8] 谭谊谈, 曾凯芳. 鲜切果蔬酶促褐变关键酶研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(17): 376-379.
- [9] Yoruk R, Marshall M R. Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: a review [J]. Journal of Food Biochemistry, 2003, 27(5): 361-422.
- [10] 王彬, 陈敏敏, 朱海生, 等. 果蔬酶促褐变研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 189-194.
- [11] 汪东风, 孙丽平, 张莉. 非酶褐变反应的研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2006(10): 9-19.
- [12] 连毅, 李燕. 果蔬褐变及其影响因素研究进展[J]. 食品与药品, 2006(10): 32-36.
- [13] 李彩云, 李洁, 严守雷, 等. 抗坏血酸处理对鲜榨莲藕汁酶促褐变和品质特征的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 151-158.
- [14] 杨昕臻, 李梅, 吴小华. 鲜切马铃薯褐变控制技术研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(13): 112-119.
- [15] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [16] 李润丰, 赵希艳, 高亚弟. 2, 6-二氯酚反滴定法测定红色果蔬中还原型VC[J]. 营养学报, 2012, 34(5): 507-509.
- [17] 陈军, 陈洪彬, 郭凤仙, 等. 氧化白藜芦醇协同抗坏血酸抑制余甘子酶促褐变的机制研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 240-249.
- [18] 李山云, 隋启君, 白建明, 等. 抗机械损伤褐变马铃薯品种(系)的筛选[J]. 中国马铃薯, 2010, 24(4): 193-196.
- [19] 王清, 黄惠英, 马文芳, 等. 反义PPO基因对马铃薯块茎褐化的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(11): 1822-1827.
- [20] 程双, 胡文忠, 马跃, 等. 鲜切果蔬酶促褐变发生机理的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(1): 74-77, 80.
- [21] 陈明俊, 舒启琼, 徐建飞, 等. 抗褐变马铃薯品种(系)鉴定与筛选[J]. 作物学报, 2020, 46(8): 1208-1216.
- [22] 王海艳, 王立春, 李风云, 等. 马铃薯抗褐变种质资源的鉴定与筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(2): 263-270.
- [23] 温靖, 徐玉娟, 肖更生, 等. 广东省17个不同荔枝品种果实品质比较分析[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(2): 39-45.
- [24] 鞠志国, 朱广廉, 曹宗巽. 气调贮藏条件下CO₂对莱阳茡梨果肉褐变的影响[J]. 园艺学报, 1988(4): 229-232.
- [25] 董磊, 袁春龙, 闫小宇, 等. 葡萄与葡萄酒中多酚氧化酶研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 271-277.
- [26] 常成, 张海萍, 尤明山, 等. 抗坏血酸对小麦多酚氧化酶活性抑制的研究[J]. 中国粮油学报, 2007(1): 14-18.
- [27] 杨铭铎, 龙志芳. 马铃薯防褐变过程中质构与Vc含量的研究[C]//浙江省科学技术协会, 中国食品科学技术学会, 浙江工商大学. 食品安全监督与法制建设国际研讨会暨第二届中国食品研究生论坛论文集(下), 2005.
- [28] 王成, 王辉, 娄丽娜, 等. 普通丝瓜果肉褐变的鉴定方法[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(11): 137-138.
- [29] 花秀凤, 陈铄, 黄斌斌. 普通丝瓜果肉褐变的变异及低褐变品种的筛选[J]. 中国农学通报, 2013, 29(19): 103-106.
- [30] 巩慧玲, 赵萍, 袁惠君, 等. 马铃薯贮藏期间褐变强度与多酚氧化酶活性变化的研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(11): 282-286.