

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672—3635(2022)05—0429—09

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2022.05.006

贮藏加工

不同贮藏时期马铃薯类胡萝卜素含量及抗氧化活性的变化

段永红¹, 姚燕辉¹, 李晋田¹, 梅超¹, 安苗¹, 彭锁堂^{1,2*}

(1. 山西农业大学农学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西蓬勃农业科技股份有限公司, 山西 大同 037000)

摘要: 马铃薯块茎中类胡萝卜素是抗氧化剂, 使薯肉呈现黄色, 影响马铃薯的营养品质和商品价值。为明确不同贮藏条件下马铃薯类胡萝卜素含量及抗氧化活性变化规律, 进而筛选高类胡萝卜素含量的马铃薯品种, 以26份马铃薯品种(系)为试验材料, 测定不同贮藏时期马铃薯类胡萝卜素含量及抗氧化活性, 分析其差异并探究变化规律。不同品种(系)马铃薯类胡萝卜素含量有显著差异, 在贮藏期间, 20个马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量呈现先升高后降低的趋势, 1个品种类胡萝卜素含量持续升高, 5个品种(系)类胡萝卜素含量是先降低后升高; 贮藏60 d时, 与贮藏0 d相比, 20个品种(系)含量升高, 6个品种(系)含量降低。不同品种(系)马铃薯抗氧化活性差异显著, 在贮藏期间, 9个马铃薯品种(系)抗氧化活性呈现先升高后降低的趋势, 14个品种(系)抗氧化活性持续升高, 2个品种(系)抗氧化活性先降低后升高, 1个品种抗氧化活性持续降低; 贮藏60 d时, 与0 d相比, 24个马铃薯品种(系)抗氧化活性升高, 2个品种活性降低。筛选出高类胡萝卜素含量的马铃薯品种‘华颂7号’。研究将为马铃薯合理贮藏提供研究基础, 也为高类胡萝卜素马铃薯新品种的选育提供研究材料。

关键词: 马铃薯; 类胡萝卜素; 抗氧化活性; 贮藏; 变化趋势

Change of Carotenoid Content and Antioxidant Activity of Potatoes in Different Storage Periods

DUAN Yonghong¹, YAO Yanhui¹, LI Jintian¹, MEI Chao¹, AN Miao¹, PENG Suotang^{1,2*}

(1. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030600, China;

2. Shanxi Pengbo Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Datong, Shanxi 037000, China)

Abstract: Carotenoids in potato tubers are antioxidants and confer potato flesh yellow color, affecting the nutritional quality and marketable value of potatoes. In order to clarify the changing patterns of carotenoids and antioxidant activity under different storage conditions and select potato varieties (lines) with high carotenoid content, the carotenoid content and antioxidant activity in different storage periods of potato were determined, and the differences were analyzed and the variation patterns were explored, using 26 potato varieties (lines) as experimental materials. There were significant differences of carotenoid content in potato varieties (lines). During storage period, the carotenoid content of 20 potato varieties (lines) showed a trend of first increasing and then decreasing; the carotenoid content of one variety continued to increase; and the carotenoid content of five potato varieties (lines) decreased first and then increased. When stored

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202203021211272); 山西省重点研发计划项目(202102140601004); 山西农业大学校市合作项目(2020HX51); 山西农业大学农学院育种工程专项(YZ2021-04); 山西省现代农业马铃薯产业技术体系建设专项资金(202206G-10); 山西农业大学校企合作项目(2019HX73)。

作者简介: 段永红(1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为种质创新与遗传工程。

***通信作者(Corresponding author):** 彭锁堂, 博士, 副教授, 研究方向为作物分子育种, E-mail: 452069088@qq.com。

for 60 days, the carotenoid content of 20 varieties (lines) increased and six varieties (lines) decreased compared with that of 0 day of storage. Also, there were significant differences of antioxidant activity in potato varieties (lines). During storage period, the antioxidant activity of nine potato varieties (lines) showed a trend of first increasing and then decreasing; the antioxidant activity of 14 varieties (lines) continued to increase; the antioxidant activity of two varieties (lines) first decreased and then increased; and the antioxidant activity of one variety continued to decrease. When stored for 60 days, compared with 0 day of storage, the antioxidant activity of 24 potato varieties (lines) increased and two varieties decreased. Finally 'Huasong 7' was selected as a potato variety with high carotenoid content. This study would provide the basis for the rational storage of potato, and also provide research materials for the breeding of new potato varieties with high carotenoids.

Key Words: potato; carotenoid; antioxidant activity; storage; change trend

类胡萝卜素是一类脂溶性天然色素, 具有异戊二烯结构, 种类繁多。主要存在于植物中, 少数动物体内也有存在, 类胡萝卜素不能由人体自主合成, 需要从膳食中获取^[1,2]。马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 含多种营养成分, 被称为“能源植物”“地下苹果”等^[3,4], 其块茎中富含叶黄素、新黄质、紫黄质和玉米黄素等多种类胡萝卜素^[5,6]。马铃薯类胡萝卜素合成代谢相关基因的高度表达调控会导致类胡萝卜素的积累差异, 造成类胡萝卜素含量的不同, 使块茎薯肉颜色呈现出白色、黄色或橘黄色, 类胡萝卜素含量越高, 块茎的颜色越深^[7,8]。同时, 类胡萝卜素作为一种多烯类化合物, 具有强抗氧化能力, 有重要的保健功能, 如促进人体清除自由基, 提高人体免疫力, 降低一些疾病如夜盲症、心脑血管疾病的发病率等, 与人类健康密切相关^[9-12]。高类胡萝卜素含量的马铃薯是天然的功能食品, 有较高的营养价值和保健功能。因此, 筛选并培育高类胡萝卜素含量的马铃薯新品种, 进而改善马铃薯块茎营养品质, 已成为当前马铃薯产业研究的重点^[13-15]。目前, 关于类胡萝卜素的研究报道较多, 主要着重于生物合成途径研究^[16]、功能分析^[17]、组分含量测定^[13]以及相关基因表达^[18,19]等方面。郝智勇等^[13]通过测定马铃薯类胡萝卜素含量, 筛选出2个高含量的马铃薯品种。但类胡萝卜素调控包括基因调控、表观调控、转录调控, 同时也受储存调控和环境调控等的影响^[20]。马铃薯收获后需要合理贮藏, 不同的贮藏条件会导致马铃薯类胡萝卜素含量发生改变^[21,22]。陈雷等^[23]以5个薯肉颜色各异的马铃

薯为研究材料, 测定了类胡萝卜素含量与抗氧化活性, 经比较分析指出随着贮藏时间的延长, 二者均降低; 张春秋^[24]测定了贮藏2个月、4℃低温条件下, 马铃薯类胡萝卜素的含量, 结果表明块茎中类胡萝卜素总含量增加, 叶黄素与玉米黄素的含量基本保持不变。但上述研究报道选用的试验材料不多, 没有明确不同贮藏条件下马铃薯类胡萝卜素含量的变化规律。

为此, 本试验以26份黄色薯肉马铃薯品种为试验材料, 设置60 d贮藏, 在0, 30和60 d时, 测定马铃薯块茎类胡萝卜素含量和抗氧化活性, 旨在探究不同贮藏时间下类胡萝卜素含量、抗氧化活性的变化趋势以及相关性和相关性, 以期筛选出高类胡萝卜素含量的马铃薯品种, 为马铃薯新品种的选育提供试验材料和研究基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以26份黄色薯肉马铃薯为研究材料, 马铃薯皮色各异, 均由山西蓬勃农业科技有限公司提供(表1)。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计, 设置3次重复, 小区长宽为6 m × 4 m, 小区内种植6垄, 垄距0.75 m, 每垄18株。收获后于各小区选取5个单株, 挑选出5个大小一致、薯形整齐的马铃薯块茎, 放置5℃恒温箱(无光照, 湿度为70%左右)贮藏。贮藏0, 30和60 d时, 进行指标测定。

表 1 试验材料

Table 1 Materials used in experiment

编号 Number	品种(系) Variety (line)	皮色 Skin color	肉色 Flesh color	编号 Number	品种(系) Variety (line)	皮色 Skin color	肉色 Flesh color
1	克新28号	淡黄	淡黄	14	希森6号	黄	黄
2	陇薯12号	淡黄	淡黄	15	费乌瑞它	黄	黄
3	兴佳2号	淡黄	淡黄	16	陇薯10号	黄	黄
4	中薯5号	淡黄	淡黄	17	下寨65号	黄	黄
5	荷兰15号	淡黄	黄	18	V6	黄	黄
6	陇薯7号	黄	浅黄	19	V7	黄	鲜黄
7	中306	黄	浅黄	20	S号	黄	鲜黄
8	CV	黄	浅黄	21	N号	黄	鲜黄
9	中加2号	黄	黄	22	中加5号	黄	鲜黄
10	腾育1号	黄	黄	23	华颂5号	黄	鲜黄
11	大同里外黄	黄	黄	24	华颂7号	黄	金黄
12	同薯20号	黄	黄	25	旭美1号	深黄	浅黄
13	斯凡特	黄	黄	26	麦肯1号	深黄	黄

1.3 试验方法

马铃薯块茎类胡萝卜素总含量测定参考郝智勇等^[13]的方法。新鲜马铃薯洗净去皮,称取1 g马铃薯薯肉,研磨后加入提取液8 mL(丙酮与石油醚的混合液,体积比为4:1),50℃水浴30 min(全程避光),8 000 r/min离心20 min,在波长440 nm处测定吸光值。

类胡萝卜素含量($\mu\text{g}/100\text{ g}$) = $(100\,000 \times A \times V)/2\,500 \times m$

式中: A 为样品的吸光值; V 为提取液体积; 2 500 为类胡萝卜素的平均吸光系数; m 为马铃薯薯肉的质量(g)。

采用DPPH法测定块茎总抗氧化能力^[25]。准确称取0.2 g马铃薯薯肉,研磨后加入10 mL的70%甲醇溶液。50℃超声震荡提取30 min。取上清液,定容至10 mL。分别取2 mL提取液与DPPH溶液混匀,记为AI; 2 mL提取液与2 mL 70%甲醇溶液混匀,记为AJ; 2 mL 70%甲醇溶液与DPPH溶液混匀,记为A0。3支试管于37℃避光静置20 min,然后于517 nm处分别测其吸光度。

自由基清除率 $S(\%) = [A0 - (AI - AJ)]/A0$

式中: A0 为DPPH自由基本身的吸光度; AI 为样品与DPPH自由基反应后的吸光度; AJ 为样品

本身的吸光度。

1.4 数据处理

采用Excel 2010 软件对试验数据进行初步整理,SPSS 23.0软件进行方差分析、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 26份马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量变化

2.1.1 不同贮藏时期马铃薯类胡萝卜素含量变化

应用双因素方差分析,探究品种(系)、贮藏条件对马铃薯类胡萝卜素含量的影响。方差结果显示,不同品种(系)马铃薯块茎在贮藏期间类胡萝卜素含量有显著差异($F = 29.627, P < 0.05$),表明品种(系)对类胡萝卜素含量有显著影响;不同贮藏时期,马铃薯类胡萝卜素含量也呈显著差异($F = 221.576, P < 0.05$),表明贮藏时间对类胡萝卜素含量也有显著影响;品种(系)、贮藏条件的交互作用有统计学意义,对类胡萝卜素含量影响显著($F = 7.723, P < 0.05$)。

贮藏0 d时,马铃薯类胡萝卜素含量的变幅为15.51~56.63 $\mu\text{g}/100\text{ g}$;贮藏30 d时,类胡萝卜素含量为12.83~62.35 $\mu\text{g}/100\text{ g}$;60 d时,类胡萝卜素含量为16.85~57.17 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。不同贮藏时期,‘CV’类胡萝卜素含量最低,‘华颂7号’含量最高(表2)。贮藏0 d时,马铃薯类胡萝卜素含量在20.01~

30.00 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 分布的品种(系)最多, 有 16 份, 占总份数的 61.54%; 贮藏 30 d 时, 类胡萝卜素含量为 40.01~50.00 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 的材料有 9 份, 占总材料份数 34.61%; 贮藏 60 d 时, 12 份类胡萝卜素含量介于 20.01~30.00 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, 占总材料份数 46.15% (图 1~3)。

2.1.2 不同贮藏时期马铃薯类胡萝卜素含量变化趋势

贮藏 30 d 时, 26 份马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量与 0 d 相比, 21 个品种(系)含量升高, 增幅介

于 5.72~31.78 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, ‘大同里外黄’变化幅度最大, 增加 114.52%。5 个品种(系)含量降低, 降幅介于 0.21~3.59 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。贮藏 60 d 的类胡萝卜素含量与贮藏 0 d 相比, 20 个品种(系)含量升高, 增幅介于 0.09~19.80 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, ‘中薯 5 号’增幅最大, 增加 88.72%, 但仍低于‘华颂 7 号’的含量, 经 60 d 贮藏后, ‘华颂 7 号’类胡萝卜素含量增加 0.54 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。6 个品种(系)含量降低, 降幅介于 0.88~7.49 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。贮藏 60 d 变化幅度低于贮藏 30 d (表 2)。

表 2 不同品种(系)不同贮藏时期马铃薯类胡萝卜素含量

Table 2 Carotenoid content of potato varieties (lines) at different days of storage

品种(系) Variety (line)	类胡萝卜素含量($\mu\text{g}/100\text{ g}$) Carotenoid content		
	0 d	30 d	60 d
克新 28 号 Kexin 28	31.61 $\pm$ 4.81 bed	45.86 $\pm$ 0.14 cdefg	29.41 $\pm$ 6.32 defgh
陇薯 12 号 Longshu 12	27.26 $\pm$ 1.74 bedefg	53.47 $\pm$ 0.17 bcd	27.40 $\pm$ 1.17 defghi
兴佳 2 号 Xingjia 2	28.19 $\pm$ 1.91 bedefg	51.72 $\pm$ 0.16 bcde	30.86 $\pm$ 2.40 defg
中薯 5 号 Zhongshu 5	21.19 $\pm$ 9.99 fghi	32.72 $\pm$ 0.10 hi	40.99 $\pm$ 8.78 bc
荷兰 15 号 Netherlands 15	23.28 $\pm$ 1.14 efgh	32.56 $\pm$ 0.10 hi	32.10 $\pm$ 6.57 defg
陇薯 7 号 Longshu 7	33.41 $\pm$ 3.76 b	33.20 $\pm$ 0.10 hi	45.68 $\pm$ 2.11 b
中 306 Zhong 306	32.34 $\pm$ 3.51 bc	38.11 $\pm$ 0.12 gh	24.85 $\pm$ 0.83 ghi
CV	15.51 $\pm$ 1.41 i	12.83 $\pm$ 0.04 k	16.85 $\pm$ 1.28 j
中加 2 号 Zhongjia 2	31.82 $\pm$ 2.07 bed	29.56 $\pm$ 0.09 i	33.95 $\pm$ 3.59 cde
腾育 1 号 Tengyu 1	28.44 $\pm$ 0.62 bedef	44.21 $\pm$ 0.14 efg	28.53 $\pm$ 15.21 defghi
大同里外黄 Datongliwaihuang	27.75 $\pm$ 6.15 bedefg	59.53 $\pm$ 0.19 ab	35.00 $\pm$ 1.25 cd
同薯 20 号 Tongshu 20	26.90 $\pm$ 4.62 bedefg	39.65 $\pm$ 0.12 gh	25.33 $\pm$ 2.37 fghi
斯凡特 Spunta	24.92 $\pm$ 6.24 defgh	52.88 $\pm$ 0.17 bcd	28.89 $\pm$ 1.99 defghi
希森 6 号 Xisen 6	30.06 $\pm$ 3.12 bcde	53.94 $\pm$ 0.17 bc	45.26 $\pm$ 0.71 b
费乌瑞它 Favorita	24.41 $\pm$ 1.81 defgh	43.77 $\pm$ 0.14 efg	28.19 $\pm$ 2.47 defghi
陇薯 10 号 Longshu 10	33.56 $\pm$ 2.50 b	44.06 $\pm$ 0.14 efg	31.95 $\pm$ 0.56 defg
下寨 65 号 Xiazhai 65	18.57 $\pm$ 1.38 hi	32.59 $\pm$ 0.10 hi	22.55 $\pm$ 2.83 hij
V6	26.40 $\pm$ 12.44 bedefg	48.74 $\pm$ 0.15 cdef	33.52 $\pm$ 4.74 def
V7	31.78 $\pm$ 5.83 bed	39.49 $\pm$ 0.12 gh	30.39 $\pm$ 0.59 defgh
S 号 S	26.87 $\pm$ 0.32 bedefg	24.91 $\pm$ 0.08 ij	25.99 $\pm$ 1.54 efghi
N 号 N	22.27 $\pm$ 10.55 fghi	48.68 $\pm$ 0.15 cdef	31.50 $\pm$ 3.93 defg
中加 5 号 Zhongjia 5	24.54 $\pm$ 1.64 defgh	20.95 $\pm$ 0.07 j	26.69 $\pm$ 2.55 efghi
华颂 5 号 Huasong 5	28.03 $\pm$ 2.95 bedefg	43.71 $\pm$ 0.14 efg	28.62 $\pm$ 3.80 defghi
华颂 7 号 Huasong 7	56.63 $\pm$ 6.32 a	62.35 $\pm$ 0.19 a	57.17 $\pm$ 4.50 a
旭美 1 号 Xumei 1	25.40 $\pm$ 0.61 cdefgh	40.84 $\pm$ 0.13 fgh	26.38 $\pm$ 0.74 efghi
麦肯 1 号 Innovator	20.90 $\pm$ 1.42 ghi	45.07 $\pm$ 0.14 defg	30.21 $\pm$ 0.13 defgh
平均 Average	27.77	41.36	31.47

注: 数据为平均值 $\pm$ 标准差。同列数据上标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。采用邓肯氏新复极差法。下同。

Note: Data is presented as mean $\pm$ standard deviation. Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$) using Duncan's multiple range test method. The same below.

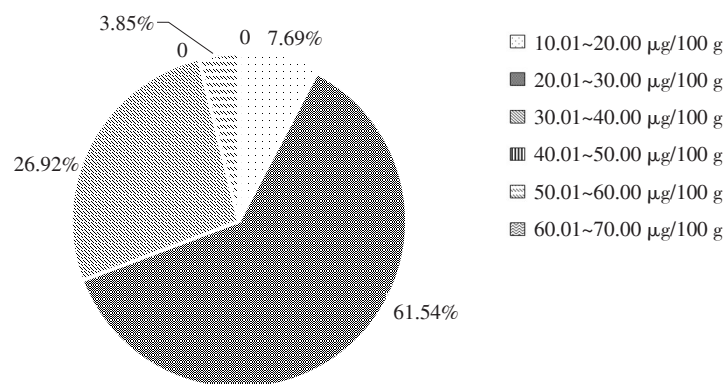


图1 贮藏0 d不同马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量分布

Figure 1 Distribution of carotenoid content in different potato varieties (lines) at 0 days of storage

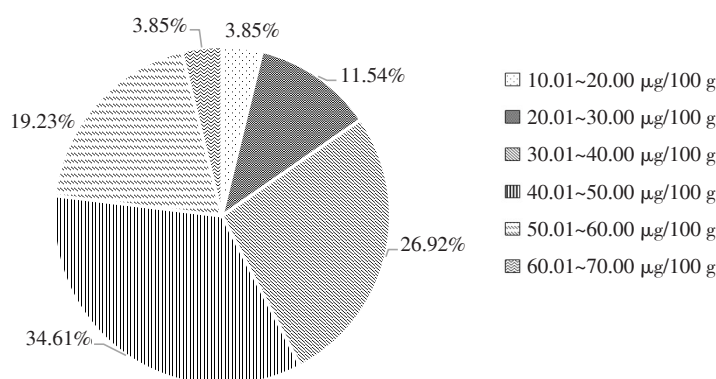


图2 贮藏30 d不同马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量分布

Figure 2 Distribution of carotenoid content in different potato varieties (lines) at 30 days of storage

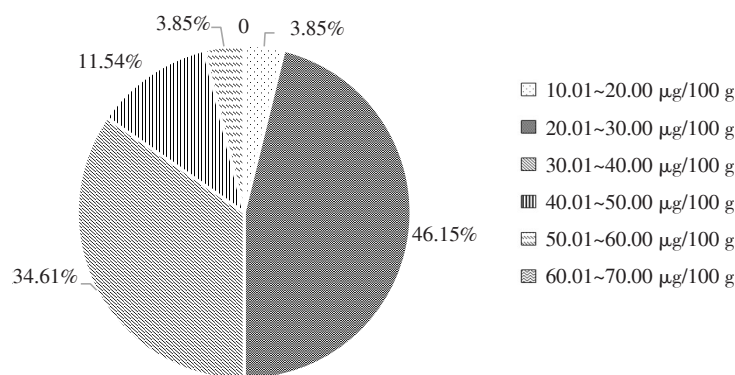


图3 贮藏60 d不同马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量分布

Figure 3 Distribution of carotenoid content in different potato varieties (lines) at 60 days of storage

随着贮藏时间的增加, 20个马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量呈现先升高后降低的趋势, 1个品种(系)类胡萝卜素含量是持续升高, 5个品种(系)

类胡萝卜素含量是先降低后升高。贮藏60 d后, 与贮藏0 d相比, 20个马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量升高, 6个品种(系)含量降低。

2.2 26份马铃薯品种(系)块茎抗氧化能力分析

2.2.1 不同贮藏时期马铃薯总抗氧化活性差异

应用双因素方差分析,探究品种(系)、贮藏条件对马铃薯抗氧化能力的影响。方差结果显示,不同品种(系)马铃薯块茎在贮藏期间的抗氧化能力有显著差异($F=6.729$, $P<0.05$),表明品种(系)对抗氧化能力影响显著;不同贮藏时间,马铃薯抗氧化能力也呈显著差异($F=179.825$, $P<0.05$),表明贮藏时间对抗氧化能力也有显著影响;品种

(系)、贮藏条件的交互作用有统计学意义,对抗氧化能力影响显著($F=7.558$, $P<0.05$)。

贮藏0 d时总抗氧化活性变化为20.47%~51.60%,‘陇薯7号’最低,‘N号’最高;贮藏30 d后总抗氧化活性变化为28.04%~78.73%,‘旭美1号’最低,‘斯凡特’最高;贮藏60 d后总抗氧化活性变化为32.45%~72.79%,‘希森6号’最低,‘旭美1号’最高。不同贮藏时间下,各个时期抗氧化活性最高和最低的品种(系)各有差异(表3)。

表3 不同品种(系)不同贮藏时期马铃薯总抗氧化活性差异

Table 3 Differences in the total antioxidant activity of potato varieties (lines) at different days of storage

品种(系) Variety (line)	马铃薯总抗氧化活性(%) Total antioxidant activity		
	0 d	30 d	60 d
克新28号 Kexin 28	33.28 ± 2.31 cdef	43.30 ± 2.39 defg	40.42 ± 2.94 jkl
陇薯12号 Longshu 12	42.04 ± 4.97 abc	50.45 ± 1.91 cdef	42.44 ± 0.28 ikl
兴佳2号 Xingjia 2	25.60 ± 0.58 defg	45.58 ± 6.12 defg	44.73 ± 3.36 ghijk
中薯5号 Zhongshu 5	33.58 ± 3.23 cdef	40.58 ± 3.28 defg	42.90 ± 5.76 ikl
荷兰15号 Netherlands 15	26.59 ± 2.12 defg	51.89 ± 8.35 cde	59.65 ± 7.19 bed
陇薯7号 Longshu 7	20.47 ± 0.41 g	39.91 ± 1.46 efgh	44.97 ± 5.98 ghijk
中306 Zhong 306	27.23 ± 2.11 defg	37.10 ± 4.27 gh	43.41 ± 11.89 hijkl
CV	27.82 ± 0.39 defg	45.08 ± 4.86 defg	45.46 ± 0.86 fghijk
中加2号 Zhongjia 2	42.13 ± 8.66 abc	44.55 ± 4.92 defg	45.40 ± 1.43 fghijk
腾育1号 Tengyu 1	26.02 ± 3.13 defg	47.66 ± 8.61 defg	46.31 ± 0.99 efghijk
大同里外黄 Datongliwaihuang	38.00 ± 11.83 bed	39.42 ± 5.24 fgh	53.30 ± 9.71 bcdefghi
同薯20号 Tongshu 20	30.31 ± 5.17 cdefg	69.96 ± 2.36 ab	51.14 ± 0.89 cdefghij
斯凡特 Spunta	32.14 ± 5.64 cdefg	78.73 ± 12.95 a	56.25 ± 6.30 bcdef
希森6号 Xisen 6	49.65 ± 14.31 ab	35.98 ± 4.39 gh	32.45 ± 3.16 l
费乌瑞它 Favorita	33.93 ± 4.34 cdef	50.74 ± 5.22 cdef	54.39 ± 10.23 bcdefgh
陇薯10号 Longshu 10	33.20 ± 1.82 cdef	52.52 ± 15.24 cd	49.79 ± 3.13 defghij
下寨65号 Xiazhai 65	32.07 ± 2.73 cdefg	44.72 ± 8.22 defg	55.76 ± 6.44 bcdefg
V6	30.82 ± 1.05 cdefg	39.49 ± 2.62 efgh	40.60 ± 2.19 jkl
V7	35.20 ± 4.06 cde	46.01 ± 0.20 defg	62.12 ± 1.33 abc
S号 S	21.09 ± 2.44 fg	62.69 ± 5.10 bc	56.54 ± 1.18 bcde
N号 N	51.60 ± 15.20 a	41.73 ± 1.57 defg	62.94 ± 1.31 ab
中加5号 Zhongjia 5	24.23 ± 1.56 efg	40.23 ± 3.92 defgh	46.09 ± 8.18 efghijk
华颂5号 Huasong 5	29.84 ± 3.06 cdefg	40.77 ± 0.03 defg	54.31 ± 6.61 bcdefgh
华颂7号 Huasong 7	41.48 ± 4.30 bc	47.63 ± 4.52 defg	35.29 ± 1.48 kl
旭美1号 Xumei 1	30.63 ± 4.96 cdefg	28.04 ± 4.21 h	72.79 ± 4.98 a
麦肯1号 Innovator	35.77 ± 13.00 cde	47.70 ± 6.22 defg	55.39 ± 3.93 bcdefg
平均 Average	32.85	46.63	49.80

2.2.2 不同贮藏时期马铃薯块茎总抗氧化活性变化趋势

贮藏30 d后, 23个品种(系)的总抗氧化活性高于0 d的, 3个品种(系)‘希森6号’‘N号’以及‘旭美1号’低于0 d, ‘斯凡特’增幅最高, 可达144.95%, ‘旭美1号’降幅最小, 为8.45%。贮藏60 d后, 24个品种(系)的总抗氧化活性高于常温0 d的, ‘希森6号’‘华颂7号’低于常温0 d, ‘旭美1号’增幅最大, 为103.49%, ‘华颂7号’降幅最小, 为14.92%。与贮藏30 d相比, 贮藏60 d后有16个品种(系)抗氧化活性升高, 10个品种(系)降低(表3)。

随着贮藏时间的增加, 9个马铃薯品种(系)总抗氧化活性呈现先升高后降低的趋势, 14个品种

(系)总抗氧化活性持续升高, 2个品种(系)总抗氧化活性是先降低后升高, 1个品种总抗氧化活性是持续降低。贮藏60 d后, 与贮藏0 d相比, 24个马铃薯品种(系)总抗氧化活性升高, 2个品种活性降低。

2.2.3 马铃薯类胡萝卜素含量与抗氧化活性相关性分析

将不同时期的总类胡萝卜素含量和总抗氧化活性做相关性分析。贮藏0 d时, 马铃薯块茎总类胡萝卜素含量与总抗氧化活性呈极显著正相关, 相关系数为0.529; 贮藏30 d时, 马铃薯块茎总类胡萝卜素含量与总抗氧化活性呈显著负相关, 相关系数为-0.397; 贮藏60 d时, 马铃薯块茎总类胡萝卜素含量与总抗氧化活性呈负相关, 相关系数为-0.071, 但不显著(表4)。

表4 马铃薯品种(系)块茎总类胡萝卜素含量和总抗氧化活性的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of carotenoid content and antioxidant activity in tubers of potato varieties (lines)

项目 Item	A1	A2	A3	B1	B2	B3
A1	1					
A2	0.170	1				
A3	0.460*	-0.019	1			
B1	0.529**	0.479*	0.152	1		
B2	-0.091	-0.397*	-0.026	-0.290	1	
B3	0.349	0.708**	-0.071	0.482*	-0.543**	1

注: *表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$)。A1. 贮藏0 d块茎总类胡萝卜素含量; A2. 贮藏30 d后, 块茎总类胡萝卜素含量; A3. 贮藏60 d后, 块茎总类胡萝卜素含量; B1. 贮藏0 d块茎总抗氧化活性; B2. 贮藏30 d后, 块茎总抗氧化活性; B3. 贮藏60 d后, 块茎总抗氧化活性。

Note: * denotes significant correlation ($P < 0.05$); ** denotes highly significant correlation ($P < 0.01$). A1. Carotenoid content of tubers at 0 day of storage; A2. Carotenoid content in tubers after 30 days of storage; A3. Carotenoid content in tubers after 60 days of storage; B1. Antioxidant activity of tubers at 0 day of storage; B2. Antioxidant activity in tubers after 30 days of storage; and B3. Antioxidant activity in tubers after 60 days of storage.

3 讨 论

马铃薯种质资源丰富, 薯肉颜色从白色到奶白色, 浅黄色到黄色、橘黄色, 以及红色、紫色等。类胡萝卜素、花青素等色素物质含量的差异导致薯肉颜色的不同, 一般来说, 黄色薯肉马铃薯的类胡萝卜素含量高于白色薯肉、红色薯肉、紫色薯肉^[7]。为避免不同薯肉马铃薯类胡萝卜素含量的个体差异, 本试验均选用黄色薯肉的马铃薯作为研究材料, 贮藏前26份马铃薯类胡萝卜素含量的变幅

为15.51~56.63 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, ‘CV’类胡萝卜素含量最低, ‘华颂7号’含量最高。郝智勇等^[13]采用比色法测定类胡萝卜素含量, 含量为12.80~91.84 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。张春秋^[24]测定马铃薯块茎中类胡萝卜素与酚酸含量, 指出黄肉马铃薯类胡萝卜素含量为87.85~160.92 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ 。本试验所测类胡萝卜素含量低于张春秋^[24]测定结果但高于陈雷等^[23]研究结果, 究其原因与类胡萝卜素的表达调控相关, 类胡萝卜素代谢受基因调控、表观调控、转录调控、储存调控和环境调控等的影响^[20]。试验中研究材料各异, 不同

基因型马铃薯会导致类胡萝卜素代谢差异, 由于代谢路径相关基因的表达、蛋白丰度或者活性发生了变化, 进而引起一系列相关代谢物合成的含量和组分随之改变^[26,27]。同时, 种植地环境条件的差异, 诸如光照、土壤、温度、营养等环境因子也会影响类胡萝卜素含量的变化^[28]。

通过测定不同贮藏时期马铃薯类胡萝卜素的含量, 结果表明, 贮藏 60 d 的含量与贮藏 0 d 相比, 20 个品种(系)含量升高, 6 个品种(系)含量降低。张春秋^[24]将马铃薯低温冷藏 2 个月, 发现马铃薯类胡萝卜素含量增加, 含量增加的多少因品种而异。陈雷等^[23]将马铃薯贮藏 4 个月, 指出随着贮藏时间的延长, 3 个品种含量一直降低, 2 个品种呈先升高后降低的趋势。本试验中 20 份马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量呈现先升高后降低的趋势, 1 个品种(系)类胡萝卜素含量是持续升高, 5 个品种(系)类胡萝卜素含量是先降低后升高。变化趋势的不一致可能与不同品种马铃薯中类胡萝卜素的种类、各组分所占的比例有关。同时, 贮藏条件对类胡萝卜素的含量及各组分也有一定的影响^[24], 储存调控和环境调控的共同作用会影响类胡萝卜素合成代谢途径, 造成类胡萝卜素的氧化降解情况不同, 进而影响类胡萝卜含量及组分变化^[24,28]。

本试验将不同贮藏时期的类胡萝卜素含量和抗氧化活性做相关性分析, 贮藏 0 d 时, 马铃薯块茎类胡萝卜素含量与抗氧化活性呈极显著正相关。表明这个时期类胡萝卜素浓度大小对抗氧化活性影响显著^[29]。贮藏 30 d 时, 21 个马铃薯品种(系)类胡萝卜素含量升高, 5 个品种(系)类胡萝卜素含量降低; 23 个品种(系)的总抗氧化活性升高, 3 个品种(系)总抗氧化活性降低, 二者的变化趋势基本一致。但发生变化的品种(系)没有对应关系。马铃薯基因型的差异会引起代谢路径中关键基因的转录表达差异, 加之储存调控以及环境因子的影响, 导致类胡萝卜素的含量出现不同的变化趋势^[30]。随着贮藏时期的变化, 类胡萝卜素组分也随之改变, 其中游离的 β -胡萝卜素与抗氧化活性密切相关, 如果游离的 β -胡萝卜素含量较少, 类胡萝卜素对抗氧化活性的贡献率可忽略不

计。李洋等^[31]提取枸杞果肉中的类胡萝卜素, 采用多种方法均测不到任何体外抗氧化活性。也说明在体外试验中, 一定含量的胡萝卜素与抗氧化活性无关。同时, 唐忠厚等^[32]研究结果指出抗氧化能力与总黄酮、花青素、胡萝卜素、总酚等呈极显著相关性。抗氧化活性受具有强消除自由基能力化合物的影响, 与各成分之间存在拮抗或者协同作用, 是一个复杂的代谢过程。不能通过单一指标对其进行评价, 需要进一步分析相关化合物与其之间的互相作用, 进而明确其变化规律^[33,34]。

本试验表明, 60 d 贮藏期间, 不同品种(系)马铃薯类胡萝卜素含量与抗氧化活性均呈显著差异, 二者存在不同的变化趋势; 筛选出耐贮藏的高类胡萝卜素含量马铃薯品种‘华颂 7 号’。

[参 考 文 献]

- [1] 张冠华, 刁倩楠. 类胡萝卜素研究进展 [J]. 现代农业, 2021(4): 46-49.
- [2] 易建勇, 侯春辉, 毕金峰, 等. 果蔬食品中类胡萝卜素生物利用度研究进展 [J]. 中国食品学报, 2019, 19(9): 286-297.
- [3] 曾凡逢, 许丹, 刘刚. 马铃薯营养综述 [J]. 中国马铃薯, 2015, 29(4): 233-243.
- [4] 李彦军, 耿伟, 史超, 等. 马铃薯营养特性及产业发展前景 [J]. 中国果菜, 2017, 37(8): 16-17, 20.
- [5] Barros E, Mashaba C S. Screening South African potato, tomato and wheat cultivars for five carotenoids [J]. South African Journal of Science, 2011(107): 9-10.
- [6] 张春秋, 刘杰, 谢开云, 等. 高效液相色谱法测定马铃薯薯肉中类胡萝卜素 [J]. 食品科学, 2008, 29(4): 302-305.
- [7] Morris W L, Ducreux L, Griffiths D W, et al. Carotenogenesis during tuber development and storage in potato [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(399): 975-982.
- [8] 陆晨飞, 刘钰婷. 类胡萝卜素代谢调控与植物颜色变异 [J]. 北方园艺, 2016(16): 193-199.
- [9] 王岁楼, 张沛. 水芹类胡萝卜素粗提物的分离纯化、结构鉴定及抗氧化活性研究 [J]. 食品工程, 2020(4): 33-36.
- [10] Concepcion M R, Avalos J, Bonet M L, et al. A global perspective on carotenoids: metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and

- health [J]. *Progress in Lipid Research*, 2018(70): 62–93.
- [11] 孙宇杰, 赵琳, 王岁楼. 枸杞类胡萝卜素的分离纯化及抗氧化活性研究 [J]. *农产品加工*, 2020(11): 4–7.
- [12] Silva J S, Chaves G V, Stenzel A P, *et al.* Improvement of anthropometric and biochemical, but not of vitamin A, status in adolescents who undergo roux-en-Y gastric bypass: a 1-year follow up study [J]. *Surgery for Obesity and Related Diseases*, 2017, 13(2): 227–233.
- [13] 郝智勇, 杨广东, 邱广伟, 等. 马铃薯高类胡萝卜素资源材料筛选 [J]. *作物杂志*, 2019(2): 71–77.
- [14] 黄凤玲, 张琳, 李先德, 等. 中国马铃薯产业发展现状及对策 [J]. *农业展望*, 2017, 13(1): 25–31.
- [15] 索海翠, 刘计涛, 王丽, 等. 马铃薯类胡萝卜素研究进展 [J]. *广东农业科学*, 2021, 48(12): 111–119.
- [16] 周琳, 梁轩铭, 赵磊. 天然类胡萝卜素的生物合成研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2022, 38(7): 61–67.
- [17] 王丹, 张建, 王晓蕊, 等. 番茄果实类胡萝卜素组成含量与色泽相关性分析 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(6): 1554–1564.
- [18] 汤雨晴, 万水林, 闫承璞, 等. 朱红橘果实成熟过程中类胡萝卜素的积累及相关基因的表达分析 [J]. *生物技术通报*, 2022, 36(3): 567–577.
- [19] 周伟权. 杏果实类胡萝卜素代谢与积累机理研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [20] Cazzonelli C I, Pogson B J. Source to sink: regulation of carotenoid biosynthesis in plants [J]. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(5): 266–274.
- [21] 杨素. 马铃薯贮藏期间加工品质变化研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [22] 陈雷. 不同贮藏和熟化方法对马铃薯营养品质及风味物质的影响研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [23] 陈雷, 李欢, 陆国权. 5个马铃薯品种贮藏期间品质及抗氧化活性的变化 [J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(1): 130–134.
- [24] 张春秋. 马铃薯块茎中类胡萝卜素和酚酸的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [25] 王和才, 胡秋辉. DPPH法测定紫红薯提取物清除自由基的能力 [J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(1): 132–135.
- [26] 马帅, 王若凡, 陈霖, 等. 不同产地的两种橙色大白菜类胡萝卜素积累差异分析 [J]. *西北农业学报*, 2021, 30(3): 395–405.
- [27] Barickman T C, Kopsell D A, Sams C E. Absciscic acid increases carotenoid and chlorophyll concentrations in leaves and fruit of two tomato genotypes [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2014, 139: 261–266.
- [28] Wimalasiri D, Brkljaca R, Piva T J, *et al.* Comparative analysis of carotenoid content in *Momordica cochinchinensis* (Cucurbitaceae) collected from Australia, Thailand and Vietnam [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(9): 2814–2824.
- [29] 孙宇杰, 赵琳, 王岁楼. 枸杞类胡萝卜素的分离纯化及抗氧化活性研究 [J]. *农产品加工*, 2020, 516(11): 4–7.
- [30] 马亚男. 不同处理方式的枸杞中类胡萝卜素生物可及性与抗氧化性研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [31] 李洋, 马文平, 倪志婧. 宁夏枸杞体外抗氧化机理研究 [J]. *食品科学*, 2014, 35(1): 79–84.
- [32] 唐忠厚, 李洪民, 马代夫. 不同肉色甘薯抗氧化特性的基因型差异及其相关性研究 [J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(5): 47–52.
- [33] 李梦杰, 潘思轶. 膳食结构对柑橘类胡萝卜素生物利用度和抗氧化活性的影响 [J/OL]. *食品科学*: 1–11[2022–10–14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220309.2220.044.html>.
- [34] 殷丽琴, 韦献雅, 钟成, 等. 不同品种彩色马铃薯总花色苷含量与总抗氧化活性 [J]. *食品科学*, 2014, 35(5): 96–100.