

彩色马铃薯块茎形成和贮藏过程中花色苷变化及抗氧化活性分析

李倩^{1,2}, 柳俊^{1,2}, 谢从华^{1,2}, 周志³, 齐迎春¹, 吴承金⁴, 宋波涛^{1,2,*}

(¹华中农业大学, 武汉 430070; ²园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉 430070; ³湖北民族学院生物科学与技术学院, 湖北恩施 445000; ⁴恩施州农业科学院, 湖北恩施 445000)

摘要: 以不同彩色马铃薯基因型为材料, 对块茎形成和贮藏过程中花色苷的种类及含量变化进行了研究。结果表明, 在块茎发育过程中, 不同马铃薯基因型块茎中花色苷出现的时间与含量多少各有差异, 颜色较深的基因型花色苷达到最高含量的时间先于颜色浅的基因型, 且不同组分的出现与累积变化规律基本上与花色苷合成的先后顺序一致; 在常温和低温贮藏过程中, 花色苷含量均呈下降趋势, 但下降比例并无明显差异。抗氧化活性测定表明, 几种彩色马铃薯基因型块茎均有一定的清除 DPPH· 和 ABTS⁺ 能力以及 Fe³⁺ 还原能力, 但不同基因型间抗氧化能力存在差异。

关键词: 彩色马铃薯; 花色苷; 块茎发育阶段; 花色苷含量变化; 抗氧化活性

中图分类号: S 532

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 07-1309-09

Variation of Anthocyanin of Colored-flesh Potato Tubers and Measurement of Their Antioxidant Activity During the Tuber Development and Storage

LI Qian^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, XIE Cong-hua^{1,2}, ZHOU Zhi³, QI Ying-chun¹, WU Cheng-jin⁴, and SONG Bo-tao^{1,2,*}

(¹Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; ²Ministry of Education, Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; ³Hubei University for Nationalities, Enshi, Hubei 445000, China; ⁴Agricultural Science Academy of Enshi, Enshi, Hubei 445000, China)

Abstract: The accumulation and variation of anthocyanins components of colored-flesh potato tubers were investigated during tuber development and storage conditions. The results showed that content of anthocyanins and the time points of anthocyanin synthesis were varied in different genotypes during the tuber development. The time points of anthocyanin syntheses beginning and reaching the highest concentration were earlier in genotypes with dark color flesh than that of light color flesh potatoes, and the variation of anthocyanin components was mainly corresponding to the pathway of anthocyanin synthesis in all genotypes. The anthocyanin content showed decreased trend during storage process and no significantly differences were found when tubers were stored under normal and low temperature condition. In addition, the determination of activity of antioxidant indicated that anthocyanins of all colored-flesh potato genotypes had certain ability to eliminate DPPH· and ABTS⁺ as well as the ability to reduce Fe³⁺, but the

收稿日期: 2013-03-11; 修回日期: 2013-06-14

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS10P06); 武汉市科技攻关项目 (20112072218-3)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: songbotao@mail.hzau.edu.cn)

antioxidant ability of anthocyanins was significantly varied among genotypes.

Key words: colored-flesh potato; anthocyanin; tuber development stage; anthocyanin content variation; antioxidant activity

“彩色马铃薯”是指马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 中块茎的“皮”和/或“肉”为红、紫、蓝或橙色的类型。如英国的紫皮紫肉品种 Congo、美国的红皮红肉品种 All Red、日本的 Northern Ruby 品种等 (Andersen et al., 2002), 中国的紫肉品种‘转心乌’和‘黑美人’等。近年来彩色马铃薯因其抗氧化功能和药用价值受到人们青睐, 而且随着薯条、薯片需求量日益增加, 如能开发彩色马铃薯片、薯条等, 也将极大增加彩色马铃薯的利用价值。此外, 在工业生产中天然色素主要来源于葡萄、红甘蓝 (紫甘蓝) 等, 而彩色马铃薯因其种植成本低, 技术简单, 产量高, 对环境适应能力强, 花青素的含量相对高等优势, 也将成为天然色素的又一重要来源 (Rodriguez-Saona et al., 1998)。

花色苷由花青素与糖类以糖苷键的形式结合而成, 它的基本结构单元是 2-苯基苯并呋喃阳离子, 由于 A 环和 B 环取代基的数量和种类不同构成了各种苷元, 其中以天竺葵色素 (Pelargonidin)、矢车菊色素或花青素 (Cyanidin)、芍药色素 (Peonidin)、花翠素或飞燕草色素 (Delphinidin)、矮牵牛色素 (Petunidin) 及锦葵色素 (Malvidin) 等 6 种非配糖体为主 (Escribano-bailon et al., 2004; Jansen & Flamme, 2006), 且其稳定性受花色苷的结构、pH 值、温度、光照以及环境体系中其它因子的影响 (Ozkan et al., 2005; Debicki-Pospiil et al., 2006; Fernando & Cisneros-Zevallos, 2007)。花色苷的提取一般采用溶液浸提法, 近年来, 加压溶剂萃取、超高压辅助提取、微波辅助提取、超声波辅助提取、高压脉冲电场辅助提取和微生物发酵或酶解法等一些新的提取方法也在花色苷的提取上有所应用 (Chen et al., 2007; Luque-rodriguez et al., 2007; Arapitsas & Turner, 2008; Corrales et al., 2008; Eduardo et al., 2013)。在花色苷组分分离与测定方面, 目前利用高效液相色谱 (HPLC) 与质谱 (MS) 或核磁共振仪 (NMR) 等联用的方法进行定性或定量分析的较多。如 Kim 等 (2013) 利用 HPLC-MS 法对紫甘薯品种 ‘Shinzami’ 花色苷进行了定性研究, 分离并确定 15 种独立的花色苷。此外, 花青素还是一种天然抗氧化剂, 可以消除人体内因代谢产生的有害物质一自由基, 因此花青素具有抗癌、延缓机体组织衰老、增强血管弹性、改善循环系统和增进皮肤的光滑度、抑制炎症和过敏、改善关节的柔韧性等功效 (Stelljes, 2001; Wrolstad et al., 2003; Lachman & Hamouz, 2005; Hayashi et al., 2006; Reddivari et al., 2007)。

虽然国内外对马铃薯花色苷的研究较多, 但主要集中在花色苷的遗传与抗氧化活性等方面, 对其马铃薯块茎发育阶段的累积及贮藏后期的变化研究相对较少。本研究中以几种不同彩色马铃薯基因型为材料, 研究了在块茎发育过程中和不同贮藏条件下花色苷的种类与含量累积变化规律, 并对其抗氧化活性进行了分析, 将为彩色马铃薯品种的选育以及花色苷的利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 植物材料与取样

所用材料均来自于华中农业大学马铃薯实验室资源库, 包括 08Ca0801 和 All Red 等 2 个红色薯肉基因型和 08Ca0338、08Ca0552、Adirondack 和 Congo 等 4 个紫色薯肉基因型, 其中 08Ca0338、08Ca0552、All Red、Adirondack 和 Congo 等 5 个材料种植在华中农业大学华中蔬菜改良分中心实验基地内, 用于发育阶段花色苷组分与含量变化分析; 08Ca0801、08Ca0552 和 Congo 等 3 个材料 2011 年种植于湖北省恩施州农科院长岭岗基地, 用于贮藏期间花色苷总量变化分析。

彩色马铃薯块茎发育各个阶段花色苷累积规律研究所需样品取自华中农业大学华中蔬菜改良分中心基地, 在马铃薯出苗后 30 d 开始取样, 每隔 7 d 取样 1 次, 直到植株成熟为止, 取每株中最大薯的薯重作为块茎膨大的标准来衡量块茎膨大速度; 取样设 3 个重复, 每重复随机选取 3 个单株。样品取好后, 去皮后切成小块混合, 并速冻后贮于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中。

用于不同贮藏温度处理的样品来源于湖北省恩施州农科院长岭岗基地。挑选大小一致且无损伤的薯块, 随机分为两组, 室温放置 1 周后, 一组放置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养箱中, 另一组放置于 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷库中, 分别在贮藏的 0、5、10、20、30 和 60 d 进行取样。设 3 个重复, 每个重复取 3 个薯块。

花色苷标准样品矢车菊色素 (Cyanidin, Cy)、天竺葵色素 (Pelargonidin, Pg)、飞燕草色素 (Delphinidin, Dp)、锦葵色素 (Malvidin, Mv), 购于 Sigma Aldrich (上海) 贸易有限公司; 芍药色素 (Peonidin, Pn)、牵牛花色素 (Petunidin, Pt) 购于 Chromadex 公司; 其他试剂均购于国药集团化学试剂有限公司。

1.2 花色苷的提取与总量测定

花色苷提取方法采用溶剂浸取法 (Lewis et al., 1999)。将马铃薯用捣碎机捣碎, 称取 2.0 g, 加入含 0.01% 盐酸的 70% 乙醇 (体积比) 提取剂, 放入 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中浸提, 提取时间 90 min, 离心, 取上清液, 即得粗提液。粗提液用乙酸乙酯除去脂溶性杂质, 再用 XAD-7 大孔树脂柱层析纯化 (Fossen, 2003)。花色苷总量测定采用 pH 示差法, 参考 Lee 等 (2005) 的方法进行。将酸化的乙醇浸提所得彩色马铃薯的色素液, 经旋转蒸发仪 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下浓缩后, 取适量体积用紫外可见分光光度计 (岛津 UV-2450) 在 200~800 nm 波长内进行全波段扫描, 确定最大特征吸收波长及相应吸光值, 并以此计算总花色苷的总量。花色苷含量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) = $(A/\epsilon L) \times Mr \times DF \times V/Wt$ 。式中: A 为吸光度, $A = (A_{\lambda_{\text{max}}, \text{pH}1.0} - A_{700\text{nm}, \text{pH}1.0}) - (A_{\lambda_{\text{max}}, \text{pH}4.5} - A_{700\text{nm}, \text{pH}4.5})$; ϵ 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的消光系数, 29600; DF 为稀释倍数; Mr 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的相对分子质量 449.2; V 为最终体积 (mL); Wt 为样品质量 (g); L 为光程 (1 cm)。

1.3 花色苷组分分离与各组分含量确定

花色苷分离与测定用高效液相色谱配合紫外检测器 (Agilent 1200) 进行, 纯化与测定参照李倩等 (2012) 方法。Lichrospher C18 色谱柱 (2.2 mm \times 250 mm, 5 μm); 流动相: A 液为甲酸-水 (1:9), B 液为甲酸-水-甲醇 (1:4:5); 线性梯度洗脱 0~45 min, B 液从 10% 升至 100%; B 液 100% 等度洗脱 13 min; B 液从 100% 降至 10%, 1 min; 流速 0.8 mL \cdot min⁻¹。柱温 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$; 检测波长 520 nm。

1.4 抗氧化活性测定

分别用 ABTS 法、FRAP 法和 DPPH 法对不同彩色马铃薯基因型抗氧化能力进行了测定。ABTS 法和 FRAP 法试剂盒购于碧云天生物技术研究所 (中国上海), 测定参照试剂盒推荐操作流程进行 (<http://www.beyotime.com/reactive-oxygen/s0119.html>); DPPH 法参照 Ferreres 等 (2006) 进行。

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段块茎大小、薯肉颜色及花色苷含量的变化

试验结果表明, 所用 5 个马铃薯基因型生育期各有差异, Congo 和 08Ca0552 在出苗 65 d 后块茎停止膨大, 而 Adirondack 和 All Red 的生育期则达到 79 d。而就块茎膨大速率而言, 5 个基因型在块茎发育的前期 (出苗后 30~58 d) 基本一致, 而出苗 58 d 后, 08Ca0338 的膨大速率显著高于

其他基因型(图1)。从块茎颜色变化上来看, Adirondack 薯肉着色一直较深, 且在整个发育阶段基本没有明显变化; 08Ca0552 和 08Ca0338 薯肉颜色变化基本一致, 从发育开始, 颜色逐步变深, 到成熟时颜色最深; Congo 薯肉颜色在块茎形成时较淡, 在出苗后 37~44 d 时颜色最深, 成熟时又变浅; 而红肉基因型 All Red 则到出苗后 51 d 时薯肉才出现浅红色, 72 d 时薯肉颜色达到最深, 而成熟时略微变淡(图2)。

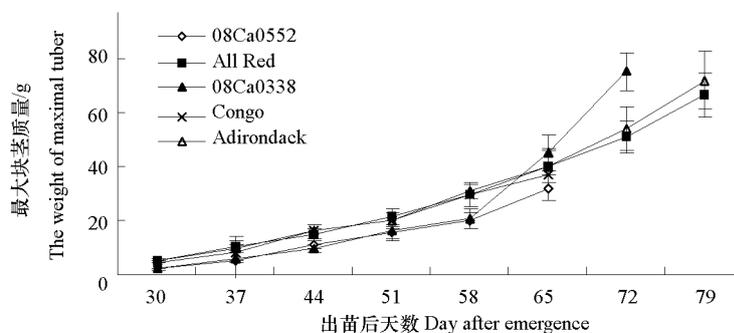


图1 不同马铃薯基因型块茎膨大过程

Fig. 1 Tubers weight during the development

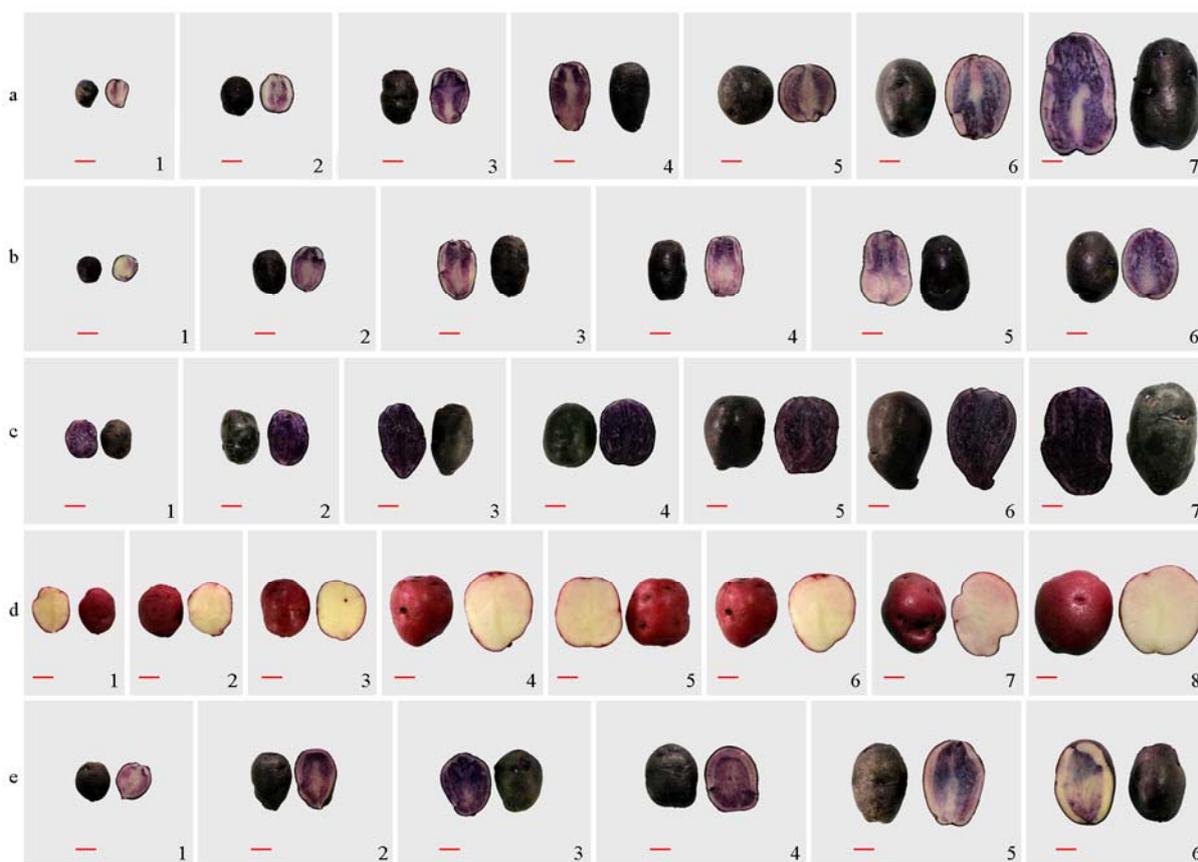


图2 彩色马铃薯不同发育期的薯块颜色变化

1~8 分别代表出苗后 30、37、44、51、58、65、72 和 79 d 时的最大薯块图片;

a~e 分别为 08Ca0338、08Ca0552、Adirondack、All Red 和 Congo; 红线显示标尺为 1 cm。

Fig. 2 The variation of colored potato during development

1 - 8, the pictures of the biggest tubers at 30, 37, 44, 51, 58, 65, 72 and 79 d after seedling;

a - e, the tuber pictures of 08Ca0338, 08Ca0552, Adirondack, All Red and Congo; the red bar means 1 cm.

就花色苷含量变化而言，除 Congo 在出苗后 44 d、51 d 时总花色苷含量出现明显下降外，其他基因型在各个取样时间点花色苷含量波动不是十分明显，其中，颜色较深的 Adirondack 和 08Ca0552 的花色素在块茎膨大初期即升到较高水平，在块茎 10 g 或 15 g 时就已经达到最大含量，而在发育后期略微下降，这可能是由于薯块该时期块茎迅速膨大，而花色苷还未大量合成所致；而颜色较浅的 All Red，08Ca0338，花色苷含量在薯块刚开始膨大时较少，随后慢慢合成，在薯块最大时花色苷含量才最高。基因型间总花色苷含量比较发现，薯肉颜色较深的基因型 Adirondack 的花色素含量明显较高，成熟时花色苷含量由高到低依次为 Adirondack > Congo > 08Ca0338 > 08Ca0552 > All Red (图 3)。

2.2 块茎发育过程中花色苷组分的累积规律

对 Congo、08Ca0338 和 Adirondack 等 3 个基因型块茎花色苷组分与含量进行了分析，Congo 和 Adirondack 分离到了 4 种花色苷，二者都含有矢车菊色素、天竺葵色素和芍药色素，其差异在于 Congo 中含有飞燕草色素，Adirondack 含有矮牵牛色素；而在 08Ca0338 中只分离到了牵牛花色素和锦葵色素 (图 4)。

从花色苷组分出现的时间先后来看，Congo 和 Adirondack 比较一致，最先合成了天竺葵色素，接着在 37 d 时，出现了矢车菊色素，而后 Adirondack 中才出现矮牵牛色素和芍药花色素，而 Congo

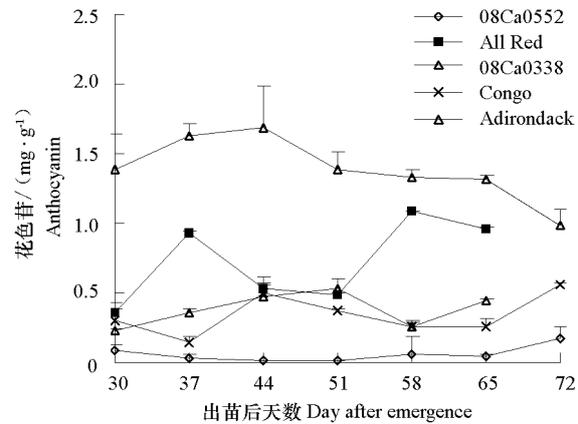


图 3 彩色马铃薯块茎在发育过程中花色苷含量变化
Fig. 3 Changes in anthocyanin concentrations during the tuber development of colored potatoes

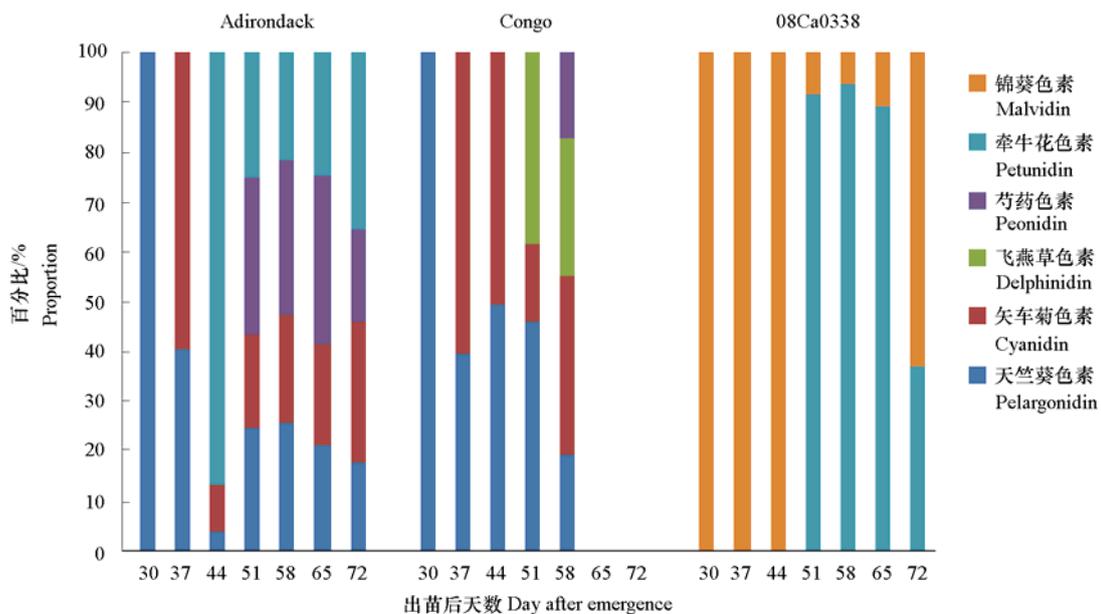


图 4 块茎发育过程中花色苷组分与含量变化
Fig. 4 Variation of anthocyanin components during the tuber development

后期则出现了飞燕草色素和矮牵牛色素；且这两个基因型在收获时各组分间的比例略有差异，Adirondack 中矮牵牛色素和矢车菊色素略高，占 30%左右，而 Congo 中矢车菊色素和飞燕草色素略高，也占 30%左右。08Ca0338 的色素种类比较单一，块茎发育前期只出现锦葵色素，出苗后 51 d 时才出现矮牵牛色素，直到块茎成熟时也没有出现其他色素，且它们收获时的比例大体相当。

2.3 贮藏温度对花色苷含量的影响

pH 示差法对贮藏各时期总花色苷含量测定结果表明，在贮藏期间，花色苷含量总体呈下降趋势（图 5）。

08Ca0801 对贮藏温度反应不是十分敏感，在常温和低温贮藏期间花色苷含量差异不大，但随贮藏时间延长花色苷含量明显减少，贮藏 60 d 后其含量只有贮藏前的 1/3 左右。而 08Ca0552 和 Congo 在贮藏 5 d 时，花色苷含量有明显升高，而后逐渐下降；但贮藏 60 d 时，08Ca0552 的花色苷含量在两个贮藏温度间差异不明显，贮藏 60 d 后其含量仍有贮藏前 70% 左右，而 Congo 常温下却下降明显，约为贮藏前的 40%。值得关注的是 08Ca0552，它在常温条件下，花色苷在 5 d 时含量急剧升高，达到贮藏前的 170% 以上，这种类型的材料在花色苷提取时具有重要的潜在价值。

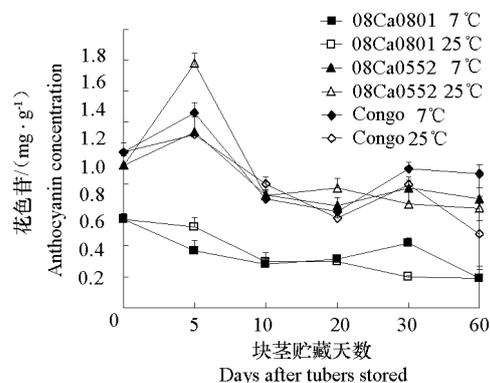


图 5 7 °C 和 25 °C 贮藏条件下花色苷变化规律
Fig. 5 Changes in anthocyanin concentrations in tubers during storage at 7 °C and 25 °C

2.4 彩色马铃薯块茎的抗氧化活性测定

通过 3 种不同方法对彩色马铃薯块茎抗氧化能力测定，结果表明不同彩色马铃薯基因型均有一定的抗氧化能力（表 1）。

红色薯肉基因型 All Red 在清除 DPPH·和 ABTS⁺能力方面，在所测定材料中都表现为最高。总体而言 ABTS 法测定值在 25.25 ~ 28.44 mmol · g⁻¹ 之间，表现为 All Red > 08Ca0338 > Congo > Adirondack 的趋势。而 DPPH 法测定值在 62.38% ~ 84.41% 之间，基因型间无明显差异。在 Fe³⁺还原能力方面，基因型间差异较大，Adirondack 较高，Congo 最低。

不同方法测定的结果间相关分析表明，FRAP 法所得结果与 ABTS 法所得结果具有显著负相关性，相关系数 R 为 -0.855 ($P < 0.05$)，而 DPPH 法测得的结果与 FRAP 法和 ABTS 法所得结果的相关关系不明显。

表 1 ABTS 法、DPPH 法和 FRAP 法测得的不同马铃薯基因型块茎的抗氧化活性
Table 1 The antioxidant activity of tubers in different genotypes measured by ABTS, DPPH and FRAP

基因型 Genotypes	ABTS/ (mmol · g ⁻¹)	DPPH/ %	FRAP/ (μmol · g ⁻¹)
All Red	28.44 ± 2.04 a	84.41 ± 6.76 a	3.25 ± 0.17 b
08Ca0338	27.47 ± 1.68 ab	65.68 ± 12.50 a	3.14 ± 0.06 b
Congo	25.37 ± 0.77 b	62.38 ± 28.67 a	2.77 ± 0.13 c
Adirondack	25.25 ± 1.37 b	74.78 ± 4.67 a	4.16 ± 0.23 a

注：表中数据为平均值 ± 标准偏差 ($n = 3$)， $P = 0.05$ 。

Note: Data presented as mean ± SE ($n = 3$)， $P = 0.05$ 。

3 讨论

3.1 花色苷的累积规律

花色苷的生物合成途径是被广泛和深入研究的植物次生代谢途径,对拟南芥(Bartel & Matsuda, 2003)、矮牵牛和玉米(Holton & Comish, 1995)、马铃薯(卢其能等, 2008)等模式植物的研究表明,花色苷的合成途径中最先合成的是天竺葵色素,然后是矢车菊色素和飞燕草色素,再由矢车菊色素甲基化衍生形成芍药花色素,而矮牵牛色素及锦葵色素则由飞燕草色素不同程度的甲基化而来(Kondo et al., 1992; Martin & Gerats, 1993; Springob et al., 2003)。

本研究结果表明,在马铃薯块茎发育过程中,虽然在所测定的基因型中,块茎膨大时都能检测到花色苷的累积(出苗 30 d 后的样品),但不同的基因型中花色苷组分与含量并不十分一致,其中 Adirondack, 08Ca0338, Congo 材料,其花色苷含量在块茎膨大时就较高,在块茎达到 10 g 或 15 g 时就最大,而 All Red, 08Ca0338, 花色苷含量在薯块刚开始膨大时较少,随着薯块的膨大花色苷慢慢合成,在薯块最大时花色苷含量达到最高。虽然不同发育时期总花色苷的含量差异不是太大,但花色苷各组分在各个发育时期却出现明显差异。Congo 花青素的合成顺序依次为天竺葵色素、矢车菊色素、飞燕草色素、芍药色素。Adirondack 最先合成天竺葵色素,然后是矢车菊色素和牵牛花色素,最后合成芍药色素。而 08Ca0338 在出苗后 30 d 就已经合成了锦葵色素,而出苗 51 d 后才合成牵牛花色素,这些变化都与花色苷合成途径基本一致。在 Congo 块茎发育过程中,在出苗 30 d 到 51 d 期间,最先合成的矢车菊色素和天竺葵色素都有不同程度的下降,推测其作为新合成的飞燕草色素和芍药色素的底物而被消耗。Adirondack 在出苗后 44 d 时,块茎中矮牵牛色素出现明显增高,达到 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$, 上一个时期比较,矢车菊色素和天竺葵色素都降低了近 50%,且在出苗 51 d 后至薯块成熟,矮牵牛色素的含量一直低于出苗后 44 d 的含量,究其原因,可能是 Adirondack 的薯块在出苗 51 d 后,块茎中出现了芍药色素,矮牵牛色素可能是作为新合成的芍药色素的合成底物而被消耗。

3.2 低温与常温贮藏条件对花色苷含量的影响

影响马铃薯贮藏期间花色苷降解的因素较多, Ozkan 等(2005)研究发现维生素 C 本身并不会使花色苷发生降解,而是维生素 C 的降解产物脱氢抗坏血酸、 H_2O_2 和糠醛使花色苷发生了降解。Lewis 等(1999)对 Desiree(粉红皮品种)和 Arran Victory(紫皮品种)贮藏期间周皮花色苷含量测定结果表明, $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 贮存下,周皮中花色苷含量增加, $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 或更高温度下贮存,周皮中花色苷浓度减少,推断低温贮藏期间导致花色苷合成增加的原因是糖浓度的增加。此外,贮藏期间色素合成相关基因的表达与酶活性变化也可能影响色素的含量, Kalt 等(1999)对蓝莓等水果贮藏在不同温度下的花色苷含量变化进行研究, $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上温度贮藏 8 d 后,花色苷含量均有不同程度的增加,其原因可能是合成速率大于降解速率。本研究中 3 个彩色马铃薯基因型在室温与低温贮藏时均表现出花色苷含量大体呈下降趋势,但 3 种基因型的下降速度不尽相同,不同贮藏条件下降解速率也不相同,常温贮藏过程中花色苷的下降速度略快于低温环境,推断可能 3 种材料抑制色素降解的相关物质种类和含量差异较大有关,如 Congo 在低温时还原糖的含量大幅升高(结果未列出),从而使得低温贮藏 60 d 后花色苷的含量几乎是相应时间点常温贮藏的 2 倍。此外,部分材料花色苷在贮藏后 5 d 时还有明显升高,如 08Ca0552 甚至升高到贮藏前的 1.7 倍,可能与贮藏阶段特异基因的表达与酶活性改变有关,对于具有类似特征的材料在色素提取时,应根据其特点,贮藏相应的时间后提取,以提高单位薯重花色苷提取率,从而提高经济效益。

3.3 几种体外抗氧化评价方法比较

本试验所用 3 种评价方法测得同一种马铃薯基因型的抗氧化能力不相同,如 All Red 清除 DPPH、ABTS⁺能力较强,明显高于 Adirondack,但其还原能力却明显低于 Adirondack;而 08Ca0338 清除 DPPH· 能力和 Congo 没有明显差异,但其具有较强的清除 ABTS⁺能力和还原能力。FRAP 法所得结果与 ABTS 法所得结果具有显著负相关性,相关系数 R 为 -0.855 ,但 DPPH 法测得的结果与 FRAP 法、ABTS 法所得结果不具有相关性。原因可能是因为各评价法分属不同的抗氧化机制。俞坚(2007)在研究桑叶多酚提取物的抗氧化能力时发现,芦丁具有较好的抗亚油酸的氧化能力,且明显强于山奈素,但其清除 DPPH· 的能力最差,远远低于山奈素;Ferrerres 等(2006)在研究甘蓝叶中多酚提取物的抗氧化活性时也有类似的结果。此外,不同方法测定结果差异也可能与各基因型薯块中所含的多酚类、维生素 C 和绿原酸等的种类与含量差异有关系,如 All Red 中绿原酸明显低于其他 3 个基因型,而类胡萝卜素却明显高于其他基因型;同样,维生素 C 含量也存在明显差异,08Ca0338 薯块中含量不到 Adirondack 和 Congo 的一半(李倩,2012)。因此,在抗氧化能力评价方面,应尽量选择多种方法,尤其是分属于不同抗氧化机制的评价方法,才能得到比较客观、全面的结果。

References

- Andersen A W, Tong C B S, Krueger D E. 2002. Comparison of periderm color and anthocyanins of four red potato varieties. *American Journal of Potato Research*, 79 (4): 249 - 253.
- Arapitsas P, Turner C. 2008. Pressurized solvent extraction and monolithic column-HPLC/DAD analysis of anthocyanins in red cabbage. *Talanta*, 74 (5): 1218 - 1223.
- Bartel B, Matsuda S P T. 2003. Seeing red. *Science*, 299: 351 - 353.
- Chen F, Sun Y Z, Zhao G H. 2007. Optimization of ultrasound assisted extraction of anthocyanins in red raspberries and identification of anthocyanins in extract using high-performance liquid chromatograph-mass spectrometry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14: 767 - 778.
- Corrales M, Toepfl S, Butz P, Knorr D, Tauscher B. 2008. Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: A comparison. *Innovative food Science*, 9: 85 - 91.
- Debicki-Pospiil J, Lovric T, Trinajstic N. 2006. Anthocyanin degradation in the presence of furfural and 5-hydroxymethylfurfural. *Journal of Food Science*, 48 (2): 411 - 416.
- Eduardo Puértolas, Oliver Cregenzán, Elisa Luengo, Ignacio Álvarez, Javier Raso. 2013. Pulsed-electric-field-assisted extraction of anthocyanins from purple-fleshed potato. *Food Chemistry*, 136: 1330 - 1336.
- Escribano-bailon M T, Santos-buelga C, Rivas-gonzalo J C. 2004. Anthocyanins in cereals. *Journal of Chromatography*, 1054: 129 - 141.
- Fernando R L, Cisneros-Zevallos L. 2007. Degradation kinetics and colour of anthocyanins in aqueous extracts of purple- and red-flesh potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Food Chemistry*, 100: 885 - 894.
- Ferrerres F, Sousa C, Vrchovska V, Valentao P, Pereira J A, Seabra R M, Andrade P B. 2006. Chemical composition and antioxidant activity of tronchuda cabbage internal leaves. *European Food Research and Technology*, 222: 1 - 2.
- Fossen T. 2003. Anthocyanins from a norwegian potato cultivar. *Food Chemistry*, 81: 433 - 437.
- Hayashi K, Hibasami H, Murakami T. 2006. Induction of apoptosis in cultured human stomach cancer cells by potato anthocyanins and its inhibitory effects on growth of stomach cancer in mice. *Food Science and Technology Reserch*, 12: 22 - 26.
- Holton T A, Cornish E C. 1995. Genetic and biochemistry of anthocyanin biosynthesis. *Plant Cell*, 7: 1071 - 1083.
- Jansen G, Flamme W. 2006. Coloured potatoes (*Solanum tuberosum* L.) anthocyanin content and tuber quality. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 53 (7): 1321 - 1331.
- Kalt W, Forney C F, Martin A, Prior R L. 1999. Antioxidant capacity, vitamin C, phenolics, and anthocyanins after fresh storage of small fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47: 4638 - 4644.
- Kim H W, Kim J B, Cho S M, Chung M N, Lee Y M, Chu S M, Che J H, Kim S N, Kim A Y, Cho Y S, Kim J H, Park H J, Lee D J. 2013.

- Anthocyanin changes in the Korean purple-fleshed sweet potato, Shinzami, as affected by steaming and baking. *Food Chemistry*, 130: 966 - 972.
- Kondo T K, Yoshida A, Nakagawa T. 1992. Structural basis of blue-color development in flower petals from commelina communis. *Nature*, 358: 515 - 518.
- Lachman J, Hamouz K. 2005. Red and purple coloured potatoes as a significant antioxidant source in human nutrition-a review. *Plant Soil Environ*, 51: 477 - 482.
- Lee J, Durst R W, Wrolstad R E. 2005. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: Collaborative Study. *Journal of AOAC International*, 88 (5): 1269 - 1278.
- Lewis C E, Walker J R L, Elancaster J E. 1999. Changes in anthocyanin, flavonoid and paeolic acid concentrations during development and storage of coloured potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 79: 311 - 316.
- Li Qian. 2012. The anthocyanin components of colored potato tubers and their variation during tuber development and storage [M. D. Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University Library. (in Chinese)
- 李 倩. 2012. 彩色马铃薯花色苷组分及其在块茎形成和贮藏过程中的变化[硕士论文]. 武汉: 华中农业大学.
- Li Qian, Liu Jun, Xie Cong-hua, Qi Ying-chun, Zhou Zhi, Song Bo-tao. 2012. Extraction and identification of anthocyanin components of colored potato tuber // Chen Yi-li, Qu Dong-yu. Potato industry and efficiently utilization of water resource. Harbin: Harbin Engineering University Press: 459 - 465. (in Chinese)
- 李 倩, 柳 俊, 谢从华, 齐迎春, 周 志, 宋波涛. 2012. 彩色马铃薯花色苷提取测定方法及组分分析// 陈伊里, 屈冬玉. 马铃薯产业与水资源高效利用. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社: 459 - 465.
- Lu Qi-neng, Yang Qing, Que Zhi-qun, Huang You-ming. 2008. cDNA cloning and expression analysis of CHS gene from wild potato. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 23 (5): 17 - 22. (in Chinese)
- 卢其能, 杨 清, 却志群, 黄友明. 2008. 马铃薯野生种 CHS 基因 cDNA 的克隆与表达分析. *华北农学报*, 23 (5): 17 - 22.
- Luque-Rodriguez J M, Luque de Castro M D, Pérez-Juan P. 2007. Dynamic superheated liquid extraction of anthocyanins and other phenolics from red grape skins of winemaking residues. *Bioresource Technology*, 98: 2705 - 2713.
- Martin C, Gerats T. 1993. The control of flower coloration // Jordan BR ed. *The molecular biology of flowering*. Renwood Books, UK, 1: 219 - 225.
- Ozkan M, Yemenciolgu A, Cemeeroglu B. 2005. Degradation of various fruit juice anthocyanins by hydrogen peroxide. *Food Research International*, 38: 1015 - 1021.
- Reddivari L, Vanamala J, Chintharlapalli S. 2007. Anthocyanin fraction from potato extracts is cytotoxic to prostate cancer cells through activation of caspase-dependent and caspase-independent pathways. *Carcinogenesis*, 28: 2227 - 3225.
- Rodriguez-Saona L E, Giusti M M, Wrolstad R E. 1998. Anthocyanin pigment composition of red-fleshed potatoes. *Journal of Food Science*, 63: 458 - 465.
- Springob K, Nakajima J, Yamazaki M. 2003. Recent advances in the biosynthesis and accumulation of anthocyanin. *Natural Product Reports*, 20: 288 - 303.
- Stelljes K B. 2001. Colorful potatoes offer nutrition variety. *Agricultural Reserch*, 49 (10): 626.
- Wrolstad R, Brown C R, Durst R. 2003. Breeding studies in potatoes containing high concentrations of anthocyanins. *Potato Research*, 80 (4): 241 - 249.
- Yu Jian. 2007. Studies on extraction, separation, identification and antioxidant ability of mulberry (*Morus alba* L.) leaf flavonoids [M. D. Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University. (in Chinese)
- 俞 坚. 2007. 桑叶黄酮类化合物提取、分离鉴定及其抗氧化活性的研究[硕士论文]. 杭州: 浙江工商大学.