

柑橘采后脱绿处理及果皮色素物质代谢机理的概述

刘路, 刘孝平, 孙恒嵩, 王爱华, 黄磊, 陈安均*

四川农业大学食品学院, 四川雅安625014

摘要: 柑橘属果实的果皮着色与果肉的成熟不一定同步, 其中部分柑橘当果肉成熟时, 果皮仍然呈现为绿色, 需要采后进行脱绿处理。脱绿过程中伴随着柑橘果皮色素物质的变化。本文将对柑橘采后脱绿处理以及色素物质代谢机理进行简单的概述。

关键词: 柑橘脱绿; 叶绿素; 类胡萝卜素; 色素代谢机理

果蔬及其产品呈现色彩缤纷的颜色主要是由于花青素、类胡萝卜素、叶绿素和花黄素的存在(张懋和廖红梅2011)。色泽、香气、风味、果形和质地是果蔬主要的感官品质, 其中色泽是果蔬采后新鲜程度、适口性及营养价值的判断指标, 它的深浅度、光泽度和均匀度直接影响果蔬的商品价值(袁梓沔等2016; Manera等2012)。柑橘属果实的果皮着色和果肉的成熟有些种类是同步进行的, 如美国佛罗里达州的橙类、‘华盛顿脐橙’等的果实; 但也有许多葡萄柚、宽皮橘柑橘类的果实, 其果肉成熟与果皮颜色变化并不一致, ‘温州蜜柑’则是非常复杂的一种, 既存在果皮先熟于果肉, 又存在果肉先熟于果皮的情况(徐正冈等2001)。为满足消费者心理需求, 通常会将果肉先熟于果皮的柑橘做转色处理, 转色包括黄化(Srilaong等2011)、脱绿(Ma等2015)和褐变(Barman等2014)等现象。其中脱绿处理伴随着柑橘果皮色素物质的变化, 通常是叶绿素的下降以及类胡萝卜素的上升。

1 柑橘采后的脱绿处理

柑橘转色已有100多年的历史, 人们用高温来改善柑橘在采收过程中的机械损伤, 在该过程中发现了绿色的柑橘慢慢脱绿(Sievers和True 1912)。乙烯是植物五大激素之一, 能促进果实的成熟衰老, 在植物生长和发育过程中起着重要的作用(梁颖2011)。在低浓度乙烯作用下, 采后全绿或部分绿色的柑橘果皮转为均一黄色的过程即乙烯脱绿。脱绿是柑橘采后商品化处理中的可选环节。柑橘脱绿是果皮中叶绿素降解和类胡萝卜素显现的过程, 可直接增强采后柑橘果实的外观色泽, 提

高商品价值, 正确的脱绿对果实糖、酸和风味等内质因子不会造成影响(孟祥春等2014)。由此可见, 乙烯对柑橘的脱绿不同于乙烯催熟香蕉、猕猴桃或其他未成熟的水果。但是脱绿过程比较缓慢且转色不均匀, 经常会出现花斑状的情况。这直接影响了柑橘果实的外观品质, 降低其商品价值。不少学者试着改变脱绿条件以期达到较好的转色效果。

1.1 乙烯对柑橘脱绿的影响

1.1.1 不同乙烯浓度处理对柑橘脱绿的影响

目前, 商业上许多柑橘果实都用乙烯来脱绿, 特别是一些果肉成熟而果皮还未脱绿的早熟品种。1971年, 有学者研究5、50和120 mg·L⁻¹的乙烯对佛罗里达柑橘衰老腐败的影响, 结果表明乙烯浓度过高, 果蒂周围很容易衰老腐败, 从而导致大量霉菌滋生, 50 mg·L⁻¹乙烯处理的柑橘在1周后腐烂(McCornack 1971)。乙烯的使用浓度一直是研究热点, 研究发现乙烯的阈值水平为5~10 mg·L⁻¹, 高于10 mg·L⁻¹的乙烯处理不会加快脱绿速度, 反而会增加由衰老引起的损失(Porat 2008)。例如, 在10、20、30或40 mg·L⁻¹的乙烯条件下, ‘Shamouti’橙子果实颜色的变化没有发生明显的差异; 此外, 在100 mg·L⁻¹乙烯浓度下脱绿, 果实在最初24 h期间颜色变化明显, 随后颜色变化缓慢(Cohen 1978)。世界上大多推荐用于柑橘类水果脱绿的乙烯浓度约为5 mg·L⁻¹。然而, 为了消除乙烯造成的

收稿 2019-05-24 修定 2020-05-08

资助 国家现代农业产业体系四川水果创新团队。

* 通讯作者(anjunc003@163.com)。

果实腐烂、外皮衰老和果蒂脱落等不利影响, 目前越来越多的人在更低的乙烯浓度($1\sim 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下对果实进行脱绿。在 $1\sim 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低乙烯浓度下处理柑橘, 脱绿的速度将降低甚至出现未脱绿的现象, 该部分观察到的乙烯无效性可归因于高水平的内源或外源施用赤霉酸的抵消作用(Porat 2008)。但是乙烯持续作用需要脱绿室来反应, 脱绿室成本太高, 因此目前也有一些研究采用 $1\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的40%有效浓度的乙烯利处浸泡柑橘果实, 例如温州蜜柑在取出后9 d左右达到转黄的效果(邓丽莉等2017)。这种处理方式在香蕉叶片(冯仁军等2010)和番茄(李伟明等2018)中也得到了广泛应用。

1.1.2 不同乙烯处理时间对柑橘脱绿的影响

柑橘采后脱绿时间与乙烯处理时间有关, 乙烯处理时间越长, 柑橘脱绿时间越短。柠檬采后在无乙烯 13°C 的条件下存放3~4周, 颜色可由绿色变为黄色; 经乙烯处理24、48和72 h后, 时间分别缩短至3、2和1.5周(Mayuoni和Porat 2011)。有研究发现, ‘Fallglo’柑经乙烯处理24 h后, 转至无乙烯的环境中, 果实继续转色并且在第8天完全转色(Petracek和Montalvo 1997)。也有学者对柑橘用乙烯处理1~2 d, 随后置于 15°C 无乙烯条件下脱绿, 数天后可达到完全脱绿且可降低腐烂率(Mayuoni和Porat 2011)。

1.2 二氧化碳气体对柑橘脱绿的影响

氧气和二氧化碳是植物的初级和次级代谢过程中具有重要的生物活性分子, 氧气浓度过低会影响乙烯的作用(Beaudry 1999)。在脱绿室中, 乙烯为气体, 柑橘果实正常呼吸作用时, 会消耗氧气产生二氧化碳, 二氧化碳会增加有机酸的含量, 影响钙的供应(Wild 1991), 因此在脱绿过程中应该通过通风换气等方式来使二氧化碳浓度低于0.1% (Porat等2008)。Martinez-Javega等(2008)为‘克莱门汀’蜜橘果实推荐的乙烯褪绿参数为: 乙烯浓度为 $2\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 相对湿度大于90%, 温度为 $20\sim 22^{\circ}\text{C}$, CO_2 体积分数小于0.2%, O_2 体积分数大于20%。

1.3 不同湿度条件处理对柑橘脱绿的影响

高湿度条件可以减少柑橘的失重现象, 通常湿度控制在90%~95%之间, 也有采用打蜡的方式

来减少其重量损失(Pereira等2016)。*‘Shamouti’*橙子在70%和90%的湿度条件下脱绿, 脱绿效果并没有差异; 而失重率分别为1.2%和0.4%, 差异随着时间的延长而降低, 在 14°C 下储存3周后达到3.0%和2.5% (Cohen 1978)。

1.4 不同温度条件处理对柑橘脱绿的影响

温度对不同果蔬的类胡萝卜素代谢的调控方式不同。 4°C 、6 h的低温冷激处理促进克莱门汀蜜橘果实类胡萝卜素的积累和叶绿素的降解(Barry等2006)。高温减少番茄的番茄红素合成(Pek等2011)。但高温能促进Cara Cara脐橙积累类胡萝卜素和转色(Tao等2012), 经乙烯处理的宽皮柑橘在低温贮藏过程中不仅没有转色, 而且果皮中的类胡萝卜素含量反而大大降低。有研究者将酸橙(*Citrus latifolia*)分别置于 10 、 20 和 30°C 且乙烯浓度小于 $0.001\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下, 发现 20°C 条件下脱绿时间最少(Li等2017)。葡萄柚Rio Red在 21°C 条件下脱绿, 果汁的可溶性固形物含量以及酸度不发生变化(Conesa等2014)。乙烯脱绿的温度和柑橘的产地气候也有关系, 一般产地温度较高, 乙烯脱绿所需要的温度较高; 产地温度低, 则乙烯脱绿所需要的温度较低。在 $22\sim 25^{\circ}\text{C}$ 处理下大部分柑橘可以不改变内部的可溶性固形物含量及酸度等指标的情况下脱绿(陶俊等2002)。在佛罗里达州, 建议在 29°C 的较高温度下对柑橘类水果进行脱绿; 因为在温暖潮湿的地区种植的柑橘会受到严重的茎端腐烂影响, 这种腐烂情况因接触乙烯而增强, 所以佛罗里达州的首要考虑因素是尽可能缩短脱绿期(Porat 2008)。

1.5 其他因素对柑橘脱绿的影响

大量研究表明, 外源乙烯能促进柑橘类胡萝卜素的积累和叶绿素的降解, 进而使果实脱绿。植物激素在柑橘色素代谢中也起着关键作用, 赤霉素(gibberellins, GA_3)和玉米素(zeatin, ZT)能增强叶绿素的生物代谢能力和抑制 β -隐黄质的生物合成与积累, 从而阻止果实色泽发育(陶俊等2002)。叶绿素a在光合作用中起到了关键作用, 而叶绿素b具有吸收蓝紫光的功能。Deng等(2017)人研究了蓝光照射对乙烯转黄柑橘的影响, 发现蓝光照射可以使柑橘着色更深。柑橘脱绿受乙烯的作用,

果蒂通常会出现脱落的情况,有研究发现2,4-D (Kobiler等2001)和赤霉素(Porat等2001)对果蒂有保护作用。

随着生物技术的发展, RNA干扰以及基因沉默等技术已经不限于模式植物,使得柑橘类果实的研究由宏观进入微观研究,目前也有一些利用生物技术来干扰柑橘类果实的色素代谢。类胡萝卜素合成和积累以及叶绿素的降解受相关基因影响巨大,目前,在转录调控中已经得到了一些证实。从奉节脐橙中筛选出的转录因子CsMYB77和CsMYB21可以通过影响番茄红素的合成延迟果实的成熟(徐阳2018)。属于MYB相关蛋白GARP亚家族CARPCC1亚组的转录因子的异常基因表达水平与2个‘克莱门汀’蜜橘突变体39B3和39B7的果实中延迟叶绿素降解有关(Rodrigo等2013)。

2 采后柑橘中主要色素物质变化

颜色是果蔬采后重要的感官指标,它是消费者判断果蔬品质、成熟度、新鲜度、商品可接受度及营养价值的重要参数。果蔬的主要色素物质有花青素、类胡萝卜素和叶绿素等,这些色素物质在不同的环境中使果蔬呈现出不同的颜色。柑橘果皮中主要是以叶绿素和类胡萝卜素为主,花青素在柑橘中存在较少,主要存在于血橙以及葡萄柚(Chaudhary等2017)的果肉中。果蔬采后常发生脱绿、褐变、黄化和白化等转色现象。柑橘脱绿是转色现象中的一种,柑橘在自然成熟过程中,不同生长期由于色素积累的多样性而呈现出不同的颜色。采后贮藏过程中果皮颜色会逐渐由原来的绿色转变为黄色或橙黄色。这是叶绿素降解以及类胡萝卜素合成的结果。柑橘果实脱绿主要表现为叶绿素a和叶绿素b的降低,以及叶黄素、 β -隐黄质、玉米黄质、紫黄质、 α -胡萝卜素和 β -类胡萝卜素含量增加(Xie等2019)。大多数涉及叶绿素和类胡萝卜素代谢的结构基因已在柑橘中进行了表征,研究结果表明这些色素的含量和组成主要是遗传决定的,并且在转录水平上受到高度调节(Rodrigo等2013)。

2.1 采后柑橘果皮叶绿素降解过程

植物叶绿素生物合成是由多个基因编码的多

种酶参与的反应,过程十分复杂。叶绿素分子主要由整合一个镁离子的卟啉环和脂肪烃侧链的植基两部分组成。高等植物体内的叶绿素包括叶绿素a和叶绿素b两种,叶绿素a呈蓝绿色,叶绿素b呈黄绿色(袁梓沔等2016)。它们的化学结构高度相似,只有吡咯环II上的附加基团存在差异,前者是甲基(-CH₃),而后者是甲醛基(-CHO) (陈俊毅等2014)。叶绿素的代谢过程包括三个阶段(Tanaka等2006): (1)谷氨酸合成叶绿素a; (2)叶绿素a和叶绿素b的相互转化,也称氯叶植物循环; (3)叶绿素的降解。叶绿素的代谢途径(图1)是由谷氨酸经过一系列反应合成原卟啉,原卟啉经过镁离子螯合酶(Mg-chelatase H subunit, CHLH)形成镁原卟啉,再合成叶绿素a,叶绿素a在叶绿素酶(Chlase, CLH)的作用下形成脱植基叶绿素a,经过脱镁螯合酶(Mg-dechelatase, MCS)形成脱镁叶绿酸,由脱镁叶绿酸a加氧酶(pheophorbide a monooxygenase, Pao)作用形成红色叶绿素代谢物,再经RCC还原酶(red chlorophyll catabolite reductase, RCCR)形成初级荧光叶绿素降解物(Tanaka和Tananka 2006; 彭刚2013)。

‘红阳’猕猴桃(*Actinidia chinensis*)外皮的叶绿素降解,主要是因为捕光叶绿素a/b结合复合物(light-harvesting chlorophyll a/b binding, LHCB1)和叶绿素合酶(chlorophyll synthase, CLS1)基因表达减少,脱镁叶绿素水解酶(pheophytin pheophorbide hydrolase, PPH2和PPH3)基因表达增加,该变化表明了叶绿素生物合成下调和其降解上调(Zhang等2018)。在自然脱绿和乙烯诱导脱绿过程中, *CitCAB1*和*CitCAS2*的转录水平与柑橘果皮叶绿素含量变化存在高度相关性。乙烯诱导脱绿过程中,叶绿素含量的减少除了受*CitCABS*持续降低表达的影响外,迅速提高的*CitNYC*和*CitChlase*转录水平加速了果皮叶绿素含量的减少(Yuan等2017)。乙烯可以加速温州蜜柑脱绿,蓝光照射可以使它脱绿后颜色更好,蓝光照射和普通乙烯处理的温州蜜柑中叶绿素分解代谢相关基因*CitChlase*、*CitPao*和*CitRCCR*表达增加,但是蓝光处理后的*CitChlase*基因表达显著高于乙烯处理(袁梓沔2017)。光照结合乙烯脱绿处理下,柑橘果实的*CitNYC*、

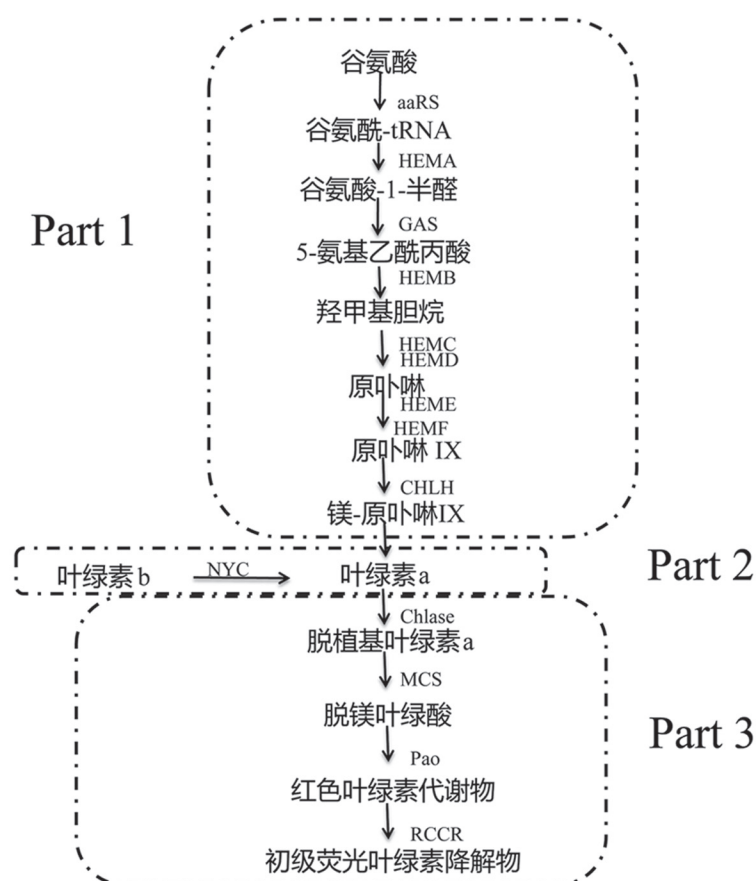


图1 叶绿素代谢途径

Fig.1 Chlorophyll metabolism pathway

aaRS: 谷氨酸-tRNA合成酶; HEMA: 谷氨酰-tRNA还原酶; GAS: 谷氨酸酯-1-半醛2,1氨基变位酶; HEMB: 胆色素原合酶; HEMC: 胆色素原脱氨酶; HEMD: 尿卟啉原III合酶; HEME: 尿卟啉原III脱羧酶; HEMF: 粪卟啉原III氧化酶; HEMG: 原卟啉原氧化酶; CHLH: 镁离子整合酶; NYC: 叶绿素b还原酶; Chlase: 叶绿素酶; MCS: 脱镁整合酶; Pao: 脱镁叶绿酸a加氧酶; RCCR: RCC还原酶。本图参考Tanaka和Tanaka (2006)、袁梓泮(2017)和王丹(2016)文献修改。

CitChlase、*CitPao*和*CitRCCR*基因表达量有一定程度的增加(王丹2016)。

2.2 采后柑橘果皮类胡萝卜素合成过程

柑橘果皮中颜色的变化不仅与叶绿素的降解有关,还与类胡萝卜素的合成息息相关。类胡萝卜素是地球上第二丰富的天然色素,存在形式超过750种(Nisar等2015)。类胡萝卜素是由异戊二烯骨架构成的 C_{40} 或 C_{30} 萜类化合物,是一类重要的天然色素的总称(高慧君等2015)。类胡萝卜素按其分子组成为含氧类胡萝卜素(叶黄素类)和不含氧类胡萝卜素(胡萝卜素类),胡萝卜素类主要有 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、 ζ -胡萝卜素、番茄红

素、八氢番茄红素和六氢番茄红素等,叶黄素类主要有叶黄质、 β -隐黄质、玉米黄质、紫黄质、新黄质、辣椒红素和辣椒黄素等。类胡萝卜素是高等植物、藻类和蓝细菌光合膜的组成成份(Huang等2017)。由于其分子中普遍存在共轭双键结构,因此在可见光下呈红色、橙色或黄色。在高等植物中,类胡萝卜素在光合作用中作为天线色素并将捕获的光能传递给叶绿素,同时具有光保护和清除自由基的作用(袁磊等2015)。

异戊烯基焦磷酸(isopentenyl pyrophosphate, IPP)是类异戊二烯途径中第一个较为直接的前体物质(高慧君等2015),它是由葡萄糖分子转化而

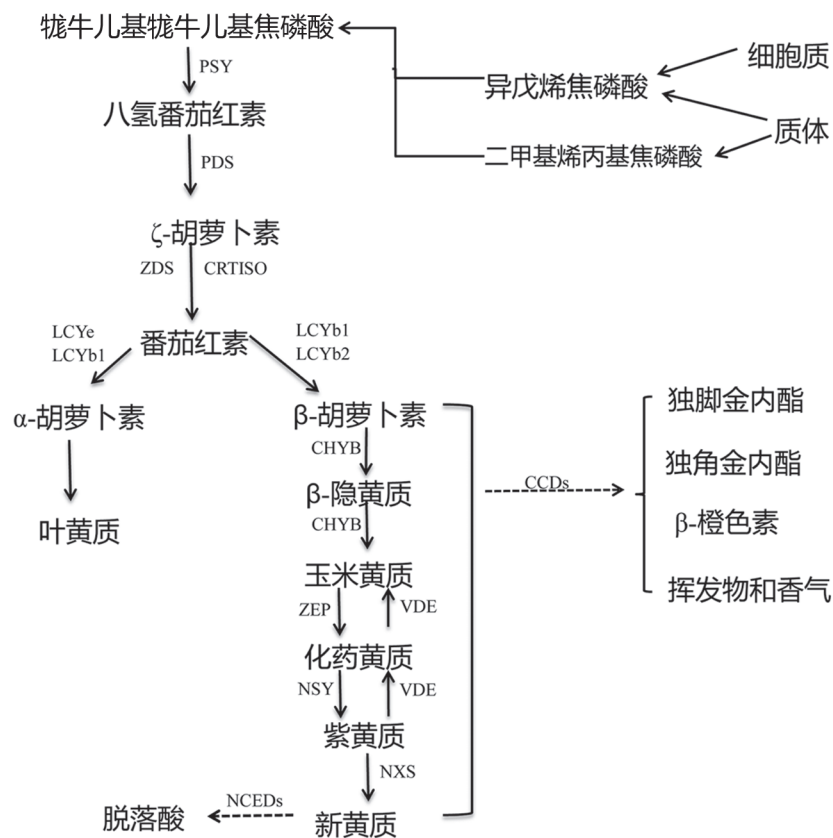


图2 类胡萝卜素的合成途径

Fig.2 Carotenoid synthesis pathway

PSY: 八氢番茄红素合成酶; PDS: 3-八氢番茄红素脱饱和酶; ZDS: 胡萝卜素脱饱和酶; CRTISO: 类胡萝卜素异构酶; LCYe: 番茄红素ε环化酶; LCYb: 番茄红素β环化酶; CHYB: 类胡萝卜素β羟化酶; CCD: 类胡萝卜素裂解加双氧酶; ZEP: 玉米黄质环氧酶; VDE: 紫黄质脱环氧化酶; NSY: 新黄质合成酶; NCED: 9-cis-环氧类胡萝卜素加双氧酶。本图改编自Nisar等(2015)一文。

来。高等植物IPP合成具有细胞质途径和质体途径,前者涉及中间产物甲羟戊酸(mevalonic acid, MVA)的形成,后者则涉及3-磷酸甘油醛和丙酮酸。甲羟戊酸途径是以乙酰辅酶A为原料合成异戊二烯焦磷酸和二甲基烯丙基焦磷酸的一条代谢途径,该途径的产物可以看作是活化的异戊二烯单位,是类固醇、类萜等生物分子的合成前体。另一种途径合成IPP和二甲基烯丙基二磷酸三铵盐(dimethylallyl diphosphate, DMAPP) (Eisenreich等2001; Hunter 2007),即非甲羟戊酸途径,它发生在质体内,是以丙酮酸和3-磷酸甘油醛作原料,以2-C-甲基-D-赤藓糖醇-4-磷酸(MEP)和1-脱氧木酮糖-5-磷酸为中间体,IPP和DMAPP用于通过一般类异戊二烯生物合成途径形成用于类胡萝卜素和其

他类异戊二烯生物合成的中心中间体牻牛儿基牻牛儿基焦磷酸(geranylgeranylpyrophosphate triammonium, GGPP)。通过两分子GGPP的缩合合成八氢番茄红素(Lu和Li 2008)。经过八氢番茄红素脱氢酶,两步脱氢形成ζ-胡萝卜素(Li和Van Eck 2007),在经过两步脱氢,合成番茄红素(Isaacson 2002)。番茄红素是一个分支点,它的下游有两条通路,第一条通路最后合成的是叶黄质,另外一条通路最后合成了新黄质和脱落酸(Nisar等2015)。通过番茄红素ε环化酶(lycopene epsilon cyclase, LCYe)和番茄红素β环化酶(LYCb1)产生α-胡萝卜素或仅通过番茄红素β环化酶(LCYb1和LCYb2)产生β-胡萝卜素。因此LCYE在测定β-胡萝卜素和α-胡萝卜素的比值中起关键作用(Harjes等2008)。α-胡萝卜素进一步

合成叶黄质, 叶黄质(叶黄素)是植物叶组织中发现的最丰富的类胡萝卜素。 β -胡萝卜素经过类胡萝卜素 β 羟化酶(β -carotene hydroxylase, CHYB)形成 β -隐黄质, 进一步反应CHYB得到玉米黄质, 由玉米黄质环氧酶(zeaxanthin epoxidase, ZEP)对玉米黄质的进一步氧化作用产生紫黄质, 紫黄质经过新黄质合成酶(neoxanthin synthase, NSY)得到新黄质, 紫黄质和新黄质都可以得到脱落酸, 新黄质的形成代表了经典类胡萝卜素生物合成的最后一步。其中紫黄质可以经过紫黄质脱环氧化酶逆转为玉米黄质, 从而产生植物的叶黄素循环。

柑橘果皮的类胡萝卜素合成以及叶绿素的降解造成了柑橘果皮颜色的变化, 类胡萝卜素含量不同在柑橘成熟时表现出不同的颜色。外观颜色从柚的浅黄到柑橘的橙黄, 果肉颜色从柚的白色到红如番茄的葡萄柚(田明等2015), 这些不同品种的柑橘果实呈现红、橙、黄颜色差异的情况不是因为其果皮积累的类胡萝卜素种类不同, 而是由于其果皮积累红、橙色类胡萝卜素的能力及其组成比例不同引起。其中红色的‘满头红’柑橘以积累红色的 β -柠乌素为主, 橙色的‘尾张温州蜜柑’以积累橙色的 β -隐黄质为主, 红肉蜜柚外果皮主要的类胡萝卜素为叶黄素、玉米黄质、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素, 红绵蜜柚和三红蜜柚外果皮主要含有叶黄素、玉米黄质、 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素和番茄红素, 蜜柚其它的红色组织主要含有的类胡萝卜素为番茄红素和 β -胡萝卜素(李伟明2013), 而‘胡柚’呈现黄色主要是由于红色 β -柠乌素和橙色的隐黄质较少。除了 β -柠乌素能使柑橘呈红色外, 番茄红素同样也是呈红色的主要色素, 而且当番茄红素含量不一样时, 柑橘所呈现的颜色也不一样(陶俊2002)。

3 结语

柑橘采后转色技术已经有不少研究, 但是柑橘的种类有很多, 产地也不同, 转色的温度也随之不同, 所需乙烯浓度也稍有差异, 其中的规律还需要更多更深入的研究。柑橘采后的脱绿色素物质已经研究至分子水平, 但是目前研究成果还很少, 机理研究主要集中在模式植物中。叶绿素和类胡萝卜素的代谢及合成在植物中已经相对清楚, 但

是这些代谢途径中的酶以及基因调控在采后的柑橘果实中是否完全相同也需要进一步研究。

参考文献(References)

- Barman K, Siddiqui MW, Patel VB, et al (2014). Nitric oxide reduces pericarp browning and preserves bioactive antioxidants in litchi. *Sci Hortic*, 171: 71–77
- Barry GH, Van Wyk AA (2006). Low-temperature cold shock may induce rind colour development of "Nules Clementine" mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruit. *Postharvest Biol Tec*, 40: 82–88
- Beaudry RM (1999). Effect of O₂ and CO₂ partial pressure on selected phenomena affecting fruit and vegetable quality. *Postharvest Biol Tec*, 15: 293–303
- Chaudhary PR, Bang H, Jayaprakasha GK, et al (2017). Effect of ethylene degreening on flavonoid pathway gene expression and phytochemicals in Rio Red grapefruit (*Citrus paradisi* Macf). *Phytochem Lett*, 22: 270–279
- Chaudhary PR, Jayaprakasha GK, Patil BS (2015). Ethylene degreening modulates health promoting phytochemicals in Rio Red grapefruit. *Food Chem*, 188: 77–83
- Chen JY, Zhu XY, Kuai B (2014). Recent progresses in the elucidation of chlorophyll catabolism and its regulation during green organ senescence. *J Plant Physiol*, (9): 1315–1321 (in Chinese with English abstract) [陈俊毅, 朱晓宇, 蒯本科(2014). 绿色器官衰老进程中叶绿素降解代谢及其调控的研究进展. *植物生理学报*, (9): 1315–1321]
- Cohen E (1978). The effect of temperature and relative humidity during degreening on the colouring of Shamouti orange fruit. *J Hortic Sci*, 53: 143–146
- Conesa A, Brotons JM, Manera FJ, et al (2014). The de-greening of lemon and grapefruit in ethylene atmosphere: a cost analysis. *Sci Hortic Amsterdam*, 179: 140–145
- Deng LL, Yuan ZY, Xie J, et al (2017). Sensitivity to ethephon degreening treatment is altered by blue led light irradiation in mandarin fruit. *J Agric Food Chem*, 65: 6158–6168
- Deng LL, Yuan ZY, Yin BF, et al (2017). Effect of LED light treatment on coloration of ethephon-degreeneed mandarin fruit. *Food Mach*, 33: 127–133 (in Chinese with English abstract) [邓丽莉, 袁梓沅, 尹保凤等(2017). LED光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实着色的影响. *食品与机械*, 33: 127–133]
- Eisenreich W, Rohdich F, Bacher A (2001). Deoxyxylulose phosphate pathway to terpenoids. *Trends Plant Sci*, 2: 78–84
- Feng RJ, Lu LF, Zhang LL, et al (2010). Differential roles of ethephon in banana leaf chlorosis at different temperatures. *Chin Agric Sci Bull*, (21): 385–387 (in Chinese)

- with English abstract) [冯仁军, 卢利方, 张丽丽等(2010). 乙烯利在不同温度下对香蕉叶片褪绿的作用不同. 中国农学通报, (21): 385–387]
- Gao MH, Ming JQ, Zhang YJ, et al (2015). Regulation of carotenoids biosynthesis in horticultural crops. *Acta Horti Sin*, (9): 1633–1648 (in Chinese with English abstract) [高慧君, 明家琪, 张雅娟等(2015). 园艺植物中类胡萝卜素合成与调控的研究进展. 园艺学报, (9): 1633–1648]
- Harjes CE, Rocheford TR, Bai L, et al (2008). Natural genetic variation in lycopene epsilon cyclase tapped for maize biofortification. *Science*, 31: 330–333
- Huang JJ, Lin S, Xu W, et al (2017). Occurrence and biosynthesis of carotenoids in phytoplankton. *Biotechnol Adv*, 35: 597–618
- Hunter WN (2007). The non-mevalonate pathway of isoprenoid precursor biosynthesis. *J Biol Chem*, 282: 21573–21577
- Isaacson T (2002). Cloning of *tangerine* from tomato reveals a carotenoid isomerase essential for the production of beta-carotene and xanthophylls in plants. *Plant Cell*, 14: 333–342
- Kobiler I, Shalom Y, Roth I, et al (2001). Effect of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on the incidence of side and stem end rots in mango fruits. *Postharvest Biol Tec*, (23): 23–32
- Li L, Van Eck J (2007). Metabolic engineering of carotenoid accumulation by creating a metabolic sink. *Transgenic Res*, 16: 581–585
- Li WM, Chen JJ, Duan YJ, et al (2018). Effect of the regulation of different temperature and ethylene treatments on polysaccharide metabolism during african pride winter fruits ripening and softening. *Chin J Trop Crops*, (3): 480–488 (in Chinese with English abstract) [李伟明, 陈晶晶, 段雅婕等(2018). 温度和乙烯处理对番荔枝软熟过程中多糖代谢的影响. 热带作物学报, (3): 480–488]
- Li WM (2013). The study of separation and accumulation of carotenoid on pomelo fruit in the process of growth and development (dissertation). Fuzhou: Fujian Agricul Forestry University (in Chinese with English abstract) [李伟明(2013). 柚果实生长发育过程中类胡萝卜素的分离及其积累研究(学位论文). 福州: 福建农林大学]
- Li Y, Wills RBH, Golding JB (2017). Storage at elevated ambient temperature and reduced ethylene delays degreening of Persian limes. *Fruits*, 72: 288–291
- Liang Y (2011). Effects of intermittent warming and exogenous ethylene on the postharvest quality and expression of ethylene related genes in citrus fruit (dissertation). Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [梁颖(2011). 变温贮藏和外源乙烯处理对柑橘果实采后品质及乙烯代谢相关基因表达的影响(学位论文). 武汉: 华中农业大学]
- Lu S, Li L (2008). Carotenoid metabolism: biosynthesis, regulation, and beyond. *J Integr Plant Biol*, 50: 778–785
- Ma G, Zhang L, Kat O, et al (2015). Effect of the combination of ethylene and red LED light irradiation on carotenoid accumulation and carotenogenic gene expression in the flavedo of citrus fruit. *Postharvest Biol Tec*, 99: 99–104
- Manera J, Brotons JM, Conesa A, et al (2012). Relationship between air temperature and degreening of lemon (*Citrus lemon* L. Burm. f.) peel color during maturation. *Aust J Crop Sci*, 6: 1051–1058
- Martinez-javega JM, Monterde A, Navarro P, et al (2008). Response of new clementines to degreening treatment. *Proc Int Soc Citricul*, 11: 1342–1346
- Mayuoni L, Porat R (2011). Postharvest treatments for degreening of ‘Villa franca’ lemons. *Hort Tec*, 21: 624–627
- McCornack AA (1971). Effect of ethylene degreening on decay of florida citrus fruit. *Florida State Hort Soc*, 12 (3): 270–272
- Meng XC, Bi FY, Ding X, et al (2014). Introduction of standardized ethylene de-greening technology for citrus after harvest. *South China Fruits*, 43: 32–36 (in Chinese with English abstract) [孟祥春, 毕方钺, 丁心等(2014). 柑桔采后规范化乙烯脱绿技术介绍. 中国南方果树, 43: 32–36]
- Nisar N, Li L, Lu S, et al (2015). Carotenoid metabolism in plants. *Mol Plant*, 8: 68–82
- Pek Z, Szuvandzsie VP, Nemenyi A (2011). The effect of natural light on changes in antioxidant content and color parameters of vine-ripened tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits. *Hort Sci*, 46: 583–585
- Peng G (2013). Chlorophyll and carotenoid metabolism based fruit color-break in citrus (dissertation). Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English abstract) [彭刚(2013). 柑橘果实转色的叶绿素和类胡萝卜素代谢基础(学位论文). 杭州: 浙江大学]
- Petracek PD, Montalvo L (1997). The degreening of ‘Fallglo’ tangerine. *J Amer Soc Hort Sci*, 122: 547–552
- Pereira GDS, Machadof LDC, Costa JMCD (2016). Quality of ‘Valencia Delta’ orange after degreening and coating with wax. *Rev Bras Eng Agr Amb*, 20: 936–940
- Porat R, Feng X, Huberman M, et al (2001). Gibberellic acid slows postharvest degreening of ‘Oroblanco’ citrus fruits. *Hort Sci*, 36: 937–940
- Porat R (2008). Degreening of citrus fruit. *Tree For Sci Biotechnol*, 2: 71–76
- Rodrigo MJ, Alquézar B, Alós E, et al (2013). Biochemical bases and molecular regulation of pigmentation in the peel of *Citrus* fruit. *Sci Horti-Amsterdam*, 163: 46–62
- Sievers AF, True RH (1912). Preliminary study of the forced curing of lemons as practiced in California. *Bulletin*

- USDA Bureau Plant Ind, 232: 1–38
- Srilaong V, Aiamlaor S, Soontornwat A, et al (2011). UV-B irradiation retards chlorophyll degradation in lime (*Citrus latifolia* Tan.) fruit. *Post Biol Tec*, 59: 110–112
- Tanaka A, Tanaka R (2006). Chlorophyll metabolism. *Curr Opin Plant Biol*, 9: 248–255
- Tao J, Zhang SL, Chen KS, et al (2002). Effect of GA₃ treatment on changes of pigments in peel of *Citrus* fruit. *Acta Horti Sin*, 29: 566–568 (in Chinese with English abstract) [陶俊, 张上隆, 陈昆松等(2002). GA₃处理对柑橘果皮色素变化的影响. *园艺学报*, 29: 566–568]
- Tao J (2002). Physiological studies on carotenoid formation and regulation in *Citrus* fruit (dissertation). Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English abstract) [陶俊(2002). 柑橘果实类胡萝卜素形成及调控的生理机制研究(学位论文). 杭州: 浙江大学]
- Tao N, Wang C, Xu J, et al (2012). Carotenoid accumulation in postharvest “Cara Cara” navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck) fruits stored at different temperatures was transcriptionally regulated in a tissue-dependent manner. *Plant Cell Rep*, 31: 1667–1676
- Tian M, Xu XY, Fan X, et al (2015). Progress of main categories and biological activity of carotene in *Citrus*. *J Huazhong Agric Univ*, (05): 138–144 (in Chinese with English abstract) [田明, 徐晓云, 范鑫等(2015). 柑橘中主要类胡萝卜素及其生物活性研究进展. *华中农业大学学报*, (05): 138–144]
- Wang D (2016). Research on the rules of the peel color changes during ‘Cutter Valencia’ fruit ripening (dissertation). Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [王丹(2016). 夏橙果实成熟过程中果皮色泽变化的规律研究(学位论文). 武汉: 华中农业大学]
- Wild BL (1991). Postharvest factors governing the development of petiole rind pitting on ‘meyer’ lemons. *Hort Sci*, 26: 287
- Xie J, Yao S, Ming J, et al (2019). Variations in chlorophyll and carotenoid contents and expression of genes involved in pigment metabolism response to oleocellosis in citrus fruits. *Food Chem*, 272: 49–57
- Xu Y (2018). Functional analysis of citrus transcription factors CsMYB77 and CsMYB21 in regulating fruit ripening. (dissertation). Wuhan: Huazhong Agriculture University (in Chinese with English abstract) [徐阳(2018). 柑橘转录因子CsMYB77与CsMYB21调控果实成熟的功能分析(学位论文). 武汉: 华中农业大学]
- Xu ZG (2011). Investigation of non-destructive *Citrus* maturity determining method based on image information (dissertation). Hangzhou: Zhejiang University of China (in Chinese with English abstract) [徐正冈(2011). 基于图像信息的柑桔成熟度无损检测方法的研究(学位论文). 杭州: 浙江大学]
- Yuan L, Liu XG, Tang Y (2015). The comparison of free radical scavenging capacity of carotenoids. *Packag Food Machin*, (2): 7–11 (in Chinese with English abstract) [袁磊, 刘晓庚, 唐瑜(2015). 不同类胡萝卜素清除自由基能力的比较. *包装与食品机械*, (2): 7–11]
- Yuan ZY, Deng LL, Yin BF, et al (2017). Effects of blue LED light irradiation on pigment metabolism of ethephon-degreenned mandarin fruit. *Post Biol Tec*, 134: 45–54
- Yuan ZY, Yin BF, Deng LL, et al (2016). Advances in regulation of pigment metabolism in postharvest fruits and vegetables. *Food Sci*, (17): 236–244 (in Chinese with English abstract) [袁梓沅, 尹保凤, 邓丽莉等(2016). 果蔬采后色素物质代谢调控研究进展. *食品科学*, (17): 236–244]
- Yuan ZY (2017). Mechanism involved in the coloration improvement of ethephon-degreenned mandarin fruit by LED light irradiation (dissertation). Chongqing: Southwest University (in Chinese with English abstract) [袁梓沅(2017). 光照改善乙烯褪绿蜜橘果实着色效果的机理研究(学位论文). 重庆: 西南大学]
- Zhang JY, Pan DL, Jia ZH, et al (2018). Chlorophyll, carotenoid and vitamin C metabolism regulation in *Actinidia chinensis* ‘Hongyang’ outer pericarp during fruit development. *PLOS One*, 13: 1–17
- Zhang M, Liao HM (2011). Degradation and regulation mechanisms of variable pigments during processing and storage of fruits and vegetables: status and trends. *J Chin Instit Food Sci Technol*, (9): 258–267 (in Chinese with English abstract) [张慙, 廖红梅(2011). 果蔬食品加工贮藏过程中易变色素的降解及调控机理研究与展望. *中国食品学报*, (9): 258–267]

An overview of post-harvest degreening treatment and metabolism of pigment substances in *Citrus* peel

LIU Lu, LIU Xiaoping, SUN Hengsong, WANG Aihua, HUANG Lei, CHEN Anjun*

College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China

Abstract: The coloration of the citrus fruits is not necessarily synchronized with the ripening of the flesh. Some of the citrus fruits are still green when the flesh is ripe. The process of degreening accompanied by the change of pigment content of citrus peel. This paper briefly summarized the post-harvest detachment treatment of citrus and the mechanism of pigment substance metabolism.

Key words: *Citrus* degreening; chlorophyll; carotenoids; pigment metabolism mechanism

Received 2019-05-24 Accepted 2020-05-08

This work was supported by the National Modern Agricultural Industry Technology System Sichuan Fruit Innovation Team.

*Corresponding author (anjunc003@163.com).