

## 研究报告 Original Papers

## 硬肉桃果实成熟前后可溶性糖含量和蔗糖转化酶活性的变化及其与果实硬度的关系

张冉冉, 段艳欣, 李培环, 董晓颖\*

青岛农业大学园艺学院, 山东青岛266109

**摘要:** 以硬肉桃新品种‘双久红’和常规品种‘川中岛白桃’果实为试材, 研究了果实成熟前后20 d内两品种桃果实中可溶性糖含量、蔗糖含量及蔗糖代谢相关酶活性的变化情况, 并对其与硬度的相关性做了分析。结果表明, 成熟前后20 d内, 两品种桃果实的可溶性糖和蔗糖含量均呈上升趋势, 而蔗糖中性转化酶(NI)及细胞壁转化酶(CWI)的活性则不断下降。相关性分析结果表明, 果实硬度与可溶性糖和蔗糖含量呈极显著负相关, 而蔗糖中性转化酶和细胞壁转化酶的活性则呈极显著正相关。

**关键词:** 硬肉桃; 果实硬度; 可溶性糖; 转化酶

## Changes of Soluble Sugar Contents and Sucrose Invertase Activity and Their Relation to Fruit Hardness of Peach Fruits before and after Ripening

ZHANG Ran-Ran, DUAN Yan-Xin, LI Pei-Huan, DONG Xiao-Ying\*

College of Horticulture, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

**Abstract:** The fruits of crisp peach (*Prunus persica*) ‘Shuangjiuhong’ and ‘Kawanakajima Hakuto’ were used to study the changes in the soluble sugar and sucrose contents and sucrose invertase activity and their relation to fruit hardness during the period from 20 days before ripening to 20 days after ripening. The results showed that soluble sugar and sucrose content increased while the neutral invertase (NI) and the cell walls of acid invertase (CWI) activities continuously decreased. Correlation analysis showed that there was markedly positive correlation among the fruit firmness, neutral invertase and the cell walls of acid invertase activities and markedly negative correlation among the fruit firmness, soluble sugar and sucrose contents.

**Key words:** crisp peach (*Prunus persica*); fruit firmness; soluble sugar; invertase

桃属于典型的呼吸跃变型果实, 因其果实成熟后果肉细腻、汁多皮薄, 深受消费者喜爱。但其果实变软快, 耐贮运性差, 严重缩短了桃果实的整体供应期。近年来, 随着消费者对桃果实硬度有了新的要求, 选育果实硬肉、变软慢、耐贮运的桃优质新品种成为了一项重要的育种目标。

研究发现, 果实的硬度与细胞壁降解酶活性(胡留申等2007)、淀粉酶活性(胡留申等2013)、钙ATP酶活性(刘炳辉等2009)等密切相关。对梨(Moriguchi等1991)、桃(范爽等2006)、葡萄(Xie等2009)等园艺作物的研究发现, 蔗糖代谢相关酶与果实糖积累之间关系密切。糖含量和比例的改变不仅是鉴定果实品质和风味物质的重要指标, 还会影响细胞的膨压, 通过影响果实细胞的张力而参与果实的软化进程(Itai和Tanahashi 2008)。

可溶性糖、蔗糖及其转化酶的相关研究已经有报道(闫梅玲等2009), 但是很少涉及其与果实硬度之间的关系。试验以成熟后果实硬度大、变软速度慢、耐贮运的新品种‘双久红’桃(董晓颖等2006)为材料, 以采收期与其一致的硬肉桃品种‘川中岛白桃’为对照, 分析比较了桃果实成熟前后20 d内的可溶性糖含量、蔗糖含量及其蔗糖转化酶活性的变化情况, 并对其与桃果实硬度的关系做了相关性分析, 旨在为耐贮运桃品种最佳采收时间的确定和硬肉桃新品种的选育提供参考依据。

收稿 2015-08-31 修定 2015-12-07

资助 山东省青岛市科技攻关项目(14-03-02-0013)。

\* 通讯作者(E-mail: dxylph@163.com; Tel: 0532-86080193)。

## 材料与方法

试验于2014年7月~2015年6月在青岛农业大学园艺学院进行。材料桃(*Prunus persica* L.) ‘双久红’和‘川中岛白桃’果实均取自山东省临朐县龙岗镇双埠村桃树试验园。果实成熟(成熟期以两品种各自果实的发育天数计算: 川中岛120 d, 双久红130 d)前20 d开始取样, 成熟后20 d结束。每隔5 d从树冠相同部位取生长发育一致的果实, 用冰壶带回实验室。果实洗净、去皮、切片, 液氮冷冻处理后放入 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中待测。

每次取样时, 在现场随机选取5个果实, 果实胴部去皮, 使用HHP-2001型果实硬计测定果实去皮处硬度, 每果重复3次。参照张志良和瞿伟菁(2003)主编的《植物生理学实验指导》, 提取可溶性糖。蒽酮比色法测定可溶性糖含量, 间苯二酚比色法测定蔗糖的含量。参Miron和Schaffer(1991)的方法, 提取酶液, 用于中性转化酶(neutral invertase, NI)的测定。细胞壁酸性转化酶(cell wall of acid invertase, CWI)的测定参照Islam等(1996)的方法进行。对以上有关试验测定结果用Excel和Dps数据处理软件进行相关性和显著性分析。

## 实验结果

### 1 两品种桃果实成熟前后果肉硬度的变化

从图1可见, 随着成熟度的加大, 两品种果实的硬度均呈现下降的趋势。成熟前, 两品种果实的硬度差异不显著; 果实成熟后, ‘双久红’桃果实硬度下降较慢, 而‘川中岛白桃’果实的硬度下降较快, 两者差异显著( $P<0.05$ )。成熟后20 d时, ‘双久红’桃的果

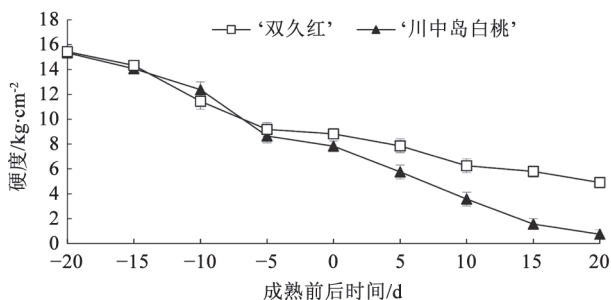


图1 两品种桃果实成熟前后的硬度变化  
Fig.1 Changes of fruit firmness in two peach cultivars before and after ripening

肉硬度为 $4.91\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 而‘川中岛白桃’的果肉硬度只有 $0.75\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 两者差异极显著( $P<0.01$ )。

### 2 两品种桃果实成熟前后可溶性糖含量的变化

由图2可知, 两品种桃的可溶性糖含量在成熟前后20 d内, 均呈上升趋势。总体来说, ‘双久红’桃果实的可溶性糖含量始终高于‘川中岛白桃’的, 但成熟前10~20 d, 两者之间差异不显著; 随着果实成熟度加大, ‘双久红’果实的可溶性糖含量显著高于‘川中岛白桃’的( $P<0.05$ )。果实成熟时, 两者的差异达到最显著。‘双久红’桃果实的可溶性糖含量达到 $93.30\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (FW); 而‘川中岛白桃’的可溶性糖含量达到 $68.99\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (FW), 是‘双久红’桃的0.74倍。这表明, 果实成熟前后较高的可溶性糖含量有利于果实硬度的保持。

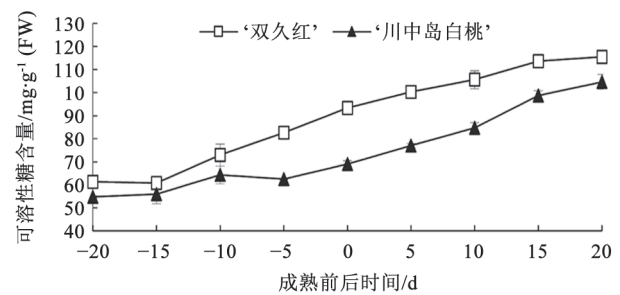


图2 两品种桃果实成熟前后可溶性糖含量的变化  
Fig.2 Changes of soluble sugar content in two peach cultivars before and after ripening

### 3 两品种桃果实成熟前后蔗糖含量的变化

由图3可以看出, 两品种桃果实的蔗糖含量在成熟前后20 d内均呈上升趋势, 且‘双久红’果实的蔗糖含量始终高于‘川中岛白桃’的, 两者之间差异显著( $P<0.05$ )。果实成熟时, ‘双久红’桃蔗糖含量

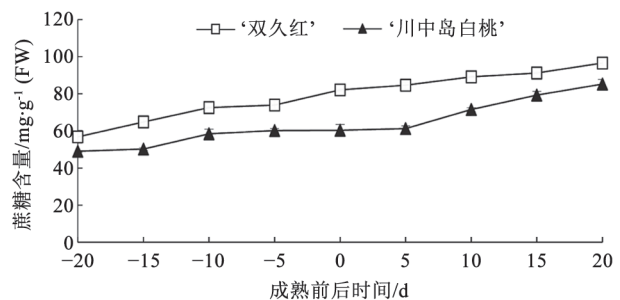


图3 两品种桃果实成熟前后蔗糖含量的变化  
Fig.3 Changes of sucrose content in two peach cultivars before and after ripening

达到 $82.09 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (FW); 而‘川中岛白桃’蔗糖含量只有 $60.29 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (FW), 是‘双久红’桃的0.73倍。结合图2和3可以看出, 成熟后20 d, ‘双久红’桃果实的蔗糖含量占可溶性糖的83.7%, ‘川中岛白桃’果实的蔗糖含量占可溶性糖的81.5%, ‘双久红’果实的高于‘川中岛白桃’的, 这与果实中可溶性糖含量对果实硬度的影响结果相一致。

#### 4 两品种桃果实成熟前后蔗糖中性转化酶活性的变化

由图4可以看出, 随着果实成熟, 两品种桃果实中的蔗糖中性转化酶的活性均呈下降趋势, 但果实成熟前后20 d内, ‘双久红’桃的蔗糖中性转化酶活性始终高于‘川中岛白桃’的, 两者呈现显著差异( $P<0.05$ ); 且‘川中岛白桃’果实的蔗糖中性转化酶活性下降幅度较大, 是‘双久红’桃的1.52倍。这表明, 果实成熟前后较高的蔗糖中性转化酶活性有利于果实硬度的保持。

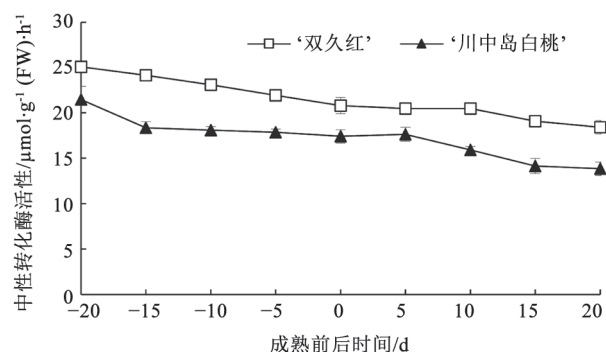


图4 两品种桃成熟前后中性转化酶活性的变化  
Fig.4 Changes of NI activity in two peach cultivars before and after ripening

#### 5 两品种桃果实成熟前后细胞壁酸性转化酶活性变化

由图5可以看出, 两品种桃果实成熟前后的细胞壁酸性转化酶的活性均呈下降趋势。整体来说, ‘川中岛白桃’果实的细胞壁酸性转化酶的活性低于‘双久红’的, 且成熟5 d后, 两品种桃果实细胞壁酸性转化酶的活性差异显著( $P<0.05$ )。‘川中岛白桃’果实的细胞壁酸性转化酶的活性下降 $2.19 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  (FW) $\cdot\text{h}^{-1}$ , 而‘双久红’果实的细胞壁酸性转化酶的活性则下降了 $1.28 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  (FW) $\cdot\text{h}^{-1}$ , 其下降幅度明显小于‘川中岛白桃’果实的。说明果实

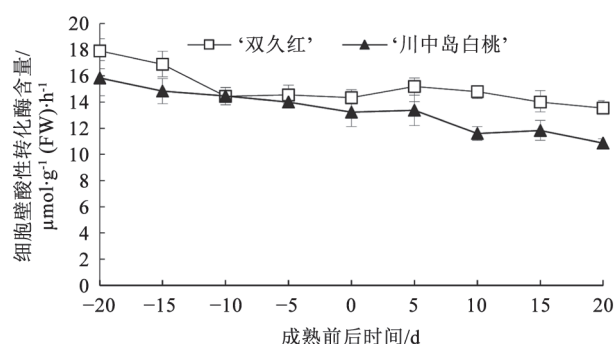


图5 两品种桃果实成熟前后细胞壁酸性转化酶活性的变化  
Fig.5 Changes of cell wall of acid invertase activity in two peach cultivars before and after ripening

成熟后较高的细胞壁酸性转化酶活性, 有利于果实硬度的保持。

#### 6 两品种桃果实中糖代谢的变化与硬度的相关性分析

随着果实的成熟, 果实硬度不断下降, 可溶性糖、蔗糖的含量不断增加, 细胞中性转化酶、细胞壁酸性转化酶活性逐渐降低。由表1可以看出, 两品种果实的可溶性糖和蔗糖含量、细胞中性转化酶、细胞壁酸性转化酶活性与果实的硬度之间均存在极显著相关性( $P<0.01$ )。可溶性糖、蔗糖的含量与果实硬度呈极显著负相关, 而细胞中性转化酶、细胞壁酸性转化酶的活性与果实硬度呈极显著正相关。

表1 两品种桃果实中糖代谢的变化与硬度的相关系数

Table 1 Relative correlation between changes of sugar metabolism and the fruit firmness in two peach cultivars

糖代谢指标	糖代谢变化与果实硬度的相关系数	
	‘川中岛白桃’	‘双久红’
可溶性糖	-0.95**	-0.98**
蔗糖	-0.95**	-0.98**
中性转化酶	0.92**	0.98**
细胞壁酸性转化酶	0.96**	0.91**

\*\*表示达到极显著水平( $P<0.01$ )。

## 讨 论

果实硬度是指果肉抗压力的强弱。桃作为典型的呼吸跃变型果实, 成熟期间最显著的外在特征是果实硬度的变化(吴敏等2003)。本研究结果



表明,随着果实成熟度的加深,两品种桃的果实硬度逐渐下降。成熟前20 d,两品种桃果肉硬度没有显著差异。成熟后20 d,‘川中岛白桃’的果肉硬度下降较快,‘双久红’桃的果肉硬度下降较慢,两者存在显著差异( $P<0.01$ )。

桃果实内的可溶性糖主要是蔗糖、葡萄糖和果糖,也含有一定量的山梨醇(郭雪峰等2004)。桃幼果时蔗糖含量很少,主要以积累己糖为主,果实成熟时蔗糖迅速增加,成为主要的可溶性糖,占总可溶性糖含量的70%以上(牛景等2006)。齐秀东等(2015a)在‘京白梨’上的研究认为蔗糖代谢参与了果实后熟软化过程。本试验结果显示,果实成熟20 d时,两品种桃的蔗糖含量均占可溶性糖含量的80%以上,且蔗糖和可溶性糖的含量与果肉硬度均呈现极显著负相关性。有研究认为桃果肉硬度变化与果实可溶性糖的含量不存在显著相关性(马之胜等2008),与本试验研究结果不一致。但在‘金冠’苹果上面的研究结果认为蔗糖积累与采后果实软化相关(齐秀东等2015b),与本试验结果相一致。果实中可溶性糖种类和含量变化决定了果实品质的好坏,蔗糖的积累与果实膨大及成熟密切相关(王永章等2001)。糖作为果实主要内含物通过改变细胞的膨压导致果实的软化。

转化酶是蔗糖代谢的关键酶,参与蔗糖的分解,在植物体内具有重要的生理作用。转化酶活性与植物体内蔗糖的浓度有关(闫梅玲等2009)。在‘清见橘橙’上的研究结果证实细胞壁酸性转化酶的活性与糖分的积累有很大关系(曾海琼等2015)。Bachelier等(1997)认为处在细胞壁中的转化酶能调节蔗糖从韧皮部卸出,并且控制蔗糖吸收速度,而在液泡中的转化酶可以调节蔗糖和己糖的贮存。酸性转化酶由分布在液泡中的可溶性酶和细胞壁酸性转化酶共同组成(刘慧英和朱祝军2002)。细胞壁酸性转化酶存在于细胞间隙并结合在细胞壁上,主要参韧皮部质外体的卸载,水解蔗糖以保持库源之间蔗糖的浓度(刘颖2010)。中性转化酶位于细胞质内,分解蔗糖,以维持细胞间和液泡内外高的蔗糖浓度梯度(吕英民和张大鹏2000)。在‘京白梨’上的研究认为蔗糖酸性转化酶活性与果实软化显著相关,参与了‘京白梨’果实的软化过程(齐秀东等2015a)。本研究结果表明,随

着两品种桃果实的成熟度加大,果实内的中性转化酶、细胞壁酸性转化酶活性逐渐降低,而蔗糖逐渐积累。这与在翠冠梨上的研究结果(陈露露等2001)相似。随着果实的成熟,两品种桃果实中蔗糖含量的增加,蔗糖中性转化酶和细胞壁酸性转化酶的活性均不断下降,且与果实的硬度都为极显著正相关。

## 参考文献

- 陈露露,王涛,滕元文,黄雪燕,卢彩玉,刘冬峰,郑小艳(2011). 大棚翠冠梨果实糖积累及蔗糖代谢相关酶活性的研究. 果树学报, 28 (3): 400-405
- 董晓颖,李培环,刘成连,王永章,原永兵,王兆成(2006). 桃长采收期新品种双久红的选育. 中国果树, (2): 3-5
- 范爽,高东升,李忠勇(2006). 设施栽培中‘春捷’桃糖积累与相关酶活性的变化. 园艺学报, 33 (6): 1307-1309
- 郭雪峰,李绍华,刘国杰,付占方,李松涛(2004). 桃果实和叶片中糖分的季节变化及其与碳代谢酶活性的关系研究. 果树学报, 21 (3): 196-200
- 胡留申,董晓颖,李培环,王永章,刘成连,原永兵(2007). 桃果实成熟前后细胞壁成分和降解酶活性的变化及其与果实硬度的关系. 植物生理学通讯, 43 (5): 837-841.
- 胡留申,纪仁芬,李培环,顾志新,施瑞炳,熊帅(2013). 硬肉桃果实成熟前后呼吸和淀粉酶活性变化及其与硬度的关系. 江苏农业科学, 41 (2): 152-153.
- 阙娟(2011). 不同溶质型桃果实成熟软化机理研究[学位论文]. 扬州: 扬州大学
- 刘炳辉,董晓颖,段艳欣,贾海波,邵东玲,李培环(2009). 硬肉桃果实成熟前后钙含量和钙ATP酶活性的变化及其与果实硬度的关系. 植物生理学通讯, 45 (10): 963-966
- 刘慧英,朱祝军(2002). 转化酶在高等植物蔗糖代谢中的作用研究进展. 植物学通报, 19 (6): 666-674
- 刘颖(2010). 甜瓜果实发育过程中糖积累及蔗糖代谢相关酶的变化[学位论文]. 郑州: 河南农业大学
- 吕英民,张大鹏(2000). 果实发育过程中糖的积累. 植物生理学通讯, 3 (26): 258-265
- 马之胜,王越辉,贾云云,宣立锋(2008). 桃果实果胶,可溶性糖,可滴定酸含量和果实大小与果实硬度关系的研究. 江西农业学报, 20 (10): 45-46
- 牛景,赵剑波,吴本宏,李绍华,刘国杰,姜全(2006). 不同来源桃种质果实糖酸组分含量特点的研究. 园艺学报, 33 (1): 6-11
- 齐秀东,魏建梅,李永红(2015a). 苹果果实质地软化过程中碳水化合物代谢及其关键酶基因表达的变化. 园艺学报, 42 (3): 409-417
- 齐秀东,魏建梅,赵美微,彭红丽,张海娥(2015b). ‘京白梨’果实后熟软化与糖、淀粉代谢及其基因表达的关系. 中国农业科学, 48 (13): 2591-2599
- 王永章,蒋家慧,李培环,徐茂龙(2001). 肉质果实碳水化合物代谢及调控研究进展. 莱阳农学院学报, 18 (4): 288-296
- 吴敏,陈昆松,贾惠娟,徐昌杰,张上隆(2003). 桃果实采后软化过程中内源IAA, ABA和乙烯的变化. 果树学报, 20 (3): 157-160
- 闫梅玲,代红军,单守明,王振平,范永,周明(2009). 蔗糖代谢相

- 关酶对果实糖积累影响的研究进展. 安徽农业科学, 37 (29): 14021~14023, 14027
- 曾海琼, 廖玲, 熊博, 李清南, 叶霜, 高婧斐, 曹淑燕, 汪志辉(2015). 套袋对清见橘橙果实蔗糖代谢的影响. 食品科技, 36 (14): 276~279
- 张志良, 瞿伟菁(2003). 植物生理学实验指导. 高等教育出版社, 127~132
- Bachelier C, Graham J, Manoir J (1997). Integration of an invertase gene to control sucrose metabolism in strawberry cultivars. Acta Hort, 439: 161~163
- Miron D, Schaffer A (1991). Sucrose phosphate synthase, sucrose synthase and invertase activities in developing fruit of *Lycopersicon esculentum* Mill, and the sucrose accumulation in *Lycopersicon hirsutum* Humband Bonp. Plant Physiol, 95: 623~627
- Moriguchi T, Ishizawa Y, Sanada T, Teramoto S, Yamaki S (1991). Role of sucrose synthase and other related enzymes in sucrose accumulation in peach fruit. Engei Gakkai Zasshi, 60 (3): 531~538
- Itai A, Tanahashi T (2008). Inhibition of sucrose loss during cold storage in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) by 1-MCP. Postharvest Biol Technol, 48 (3): 355~363
- Islam M S, Matsui T, Yoshid Y (1996). Carbohydrate content and the activity of sucrose synthase, sucrose phosphate synthase and acid invertase in different tomato cultivar during fruit development. Sic Hort, 65: 125~136
- Xie ZS, Li B, Forney CF, Xu WP, Wang SP (2009). Changes in sugar content and relative enzyme activity in grape berry in response to root restriction. Sci Hort, 123 (1): 39~45