

## 香蕉果实中抗性淀粉代谢与可溶性糖含量变化的相关性

苗红霞<sup>1</sup>, 金志强<sup>1,2</sup>, 刘伟鑫<sup>1,3</sup>, 刘菊华<sup>1</sup>, 贾彩红<sup>1</sup>, 张建斌<sup>1</sup>, 徐碧玉<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>中国热带农业科学院热带生物技术研究所/农业部热带作物生物技术重点开放实验室, 海口571101; <sup>2</sup>中国热带农业科学院海口实验站/海南省香蕉遗传育种改良重点实验室, 海口570102; <sup>3</sup>海南大学农学院, 海口570228

**摘要:** 为了揭示香蕉果实抗性淀粉代谢与可溶性糖含量的变化规律及相关性, 本研究以‘巴西’香蕉果肉为试材, 对香蕉果实采前采后抗性淀粉及可溶性糖含量变化进行分析。结果表明, 随着香蕉果实发育, 总淀粉、抗性淀粉和蔗糖含量呈上升趋势, 果糖和葡萄糖含量呈下降趋势。贮藏过程中, 总淀粉和抗性淀粉含量迅速下降, 蔗糖、果糖和葡萄糖呈先增后减的单峰型变化。相关性分析发现, 香蕉果实抗性淀粉形成与总淀粉、蔗糖含量变化呈极显著正相关, 与果糖和葡萄糖含量呈极显著负相关; 贮藏过程中, 抗性淀粉降解与总淀粉含量变化呈极显著正相关, 与蔗糖、果糖和葡萄糖含量变化相关性不显著。香蕉果实抗性淀粉的形成可能主要涉及到总淀粉和蔗糖含量的上升, 抗性淀粉的降解与总淀粉含量的下降密切相关。

**关键词:** 香蕉; 果实; 抗性淀粉; 总淀粉; 可溶性糖

## Correlation between Resistant Starch Metabolism and Soluble Sugar Content of Banana Fruit

MIAO Hong-Xia<sup>1</sup>, JIN Zhi-Qiang<sup>1,2</sup>, LIU Wei-Xin<sup>1,3</sup>, LIU Ju-Hua<sup>1</sup>, JIA Cai-Hong<sup>1</sup>, ZHANG Jian-Bin<sup>1</sup>, XU Bi-Yu<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Tropical Crop Bioscience and Biotechnology, Ministry of Agriculture, Haikou 571101, China; <sup>2</sup>Haikou Experimental Station, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Hainan Provincial Key Laboratory for Genetics and Breeding of Banana, Haikou 570102, China; <sup>3</sup>Department of Agriculture, Hainan University, Haikou 570228, China

**Abstract:** In order to investigate the variation and correlation between resistant starch metabolism and soluble sugar content of banana fruit, banana (*Musa acuminata*) pulp was used to detect the change of resistant starch and soluble sugar contents. The results showed that total starch, resistant starch and sucrose contents gradually increased while fructose and glucose contents were obviously decreased during the development of banana fruit. A single peak was observed for sucrose, fructose, and glucose contents with the decrease of total starch and resistant starch of banana fruit during storage. Correlation analysis showed that the formation of resistant starch had a significant positive correlation with total starch and sucrose contents while it had a significant negative correlation with the changes of fructose and glucose contents. The degradation of resistant starch had a significant positive correlation with the decrease of total starch content. No correlation was found between soluble sugar and resistant starch content during storage. These results suggested that the formation of resistant starch might mainly involved in the increase of total starch and sucrose contents while its degradation was closely related to the decrease of total starch content.

**Key words:** banana (*Musa acuminata*); fruit; resistant starch; total starch; soluble sugar

抗性淀粉(resistant starch, RS)是一种不能被人体消化和吸收, 功能类似膳食纤维的淀粉, 对控制血糖、减轻体重、降低脂肪和预防肠道疾病具有重要作用(Englyns等1982), 是人们日常生活中必须的低热量、高膳食纤维含量的功能性保健食品(熊春红等2007; 高群玉和李素玲2011)。目前, 在水稻(Gunaratne等2013)、小麦(Hallström等2011)、玉米(Zhao和Zhu 2013)和甘薯(Lian等2011)等农作物中都有抗性淀粉的相关报道, 是近年来国内外

淀粉科学中最为活跃的研究领域之一。香蕉是重要的热带亚热带水果, 青香蕉果实中含有49.24%抗性淀粉(张铁涛等2011), 是含天然抗性淀粉最高

收稿 2013-04-15 修定 2013-06-13

资助 中国热带农业科学院热带生物技术研究所2012新进博士启动费项目、现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-32)和“十二五”农村领域国家科技计划课题“香蕉分子育种与种质创新”(2011AA10020605)。

\* 通讯作者(E-mail: biyuxu@126.com; Tel: 0898-66960172)。

的作物之一(Langkilde等2002);然而青香蕉是不能直接食用的,需经过自然后熟或乙烯催熟处理才能食用,而后熟处理显著加速了淀粉向可溶性糖的转化(段学武等2002;滕建文等2007;赵剑波等2008)。如何在青香蕉时即保持较高的抗性淀粉含量又可以直接食用,或者在香蕉后熟过程中抑制抗性淀粉向可溶性糖的转化,将为获得适于糖尿病患者或肥胖人群专用的高抗性淀粉香蕉果实提供一条有效途径。近年来,国内外对香蕉果实抗性淀粉理化特性(Izidoro-Toledo等2011)、提取工艺(Tribess等2009)及保健功能(Nugent 2005)等方面进行研究,取得了一些成果。然而在香蕉果实发育及采后成熟过程中抗性淀粉积累与降解究竟与总淀粉、可溶性糖类(果糖、葡萄糖和蔗糖)含量变化存在怎么的相关性,目前还未见相关文献报道,它们之间的代谢机理也不清楚。

因此,本文拟在对香蕉采前采后果实总淀粉、抗性淀粉、果糖、葡萄糖和蔗糖含量变化的基础上,研究香蕉果实抗性淀粉代谢与总淀粉、果糖、葡萄糖和蔗糖含量变化的相关性,以期调控香蕉果实抗性淀粉含量奠定基础。

## 材料与amp;方法

### 1 供试材料

‘巴西’香蕉(*Musa acuminata* L. AAA group cv. Brazilian)果实采自中国热带农业科学院热带生物技术研究所澄迈香蕉试验基地,取样时间为2012年6月20日~8月20日。

### 2 试验设计

#### 2.1 采前果实处理

分别取断蕾后0、10、20、30、40、50和60 d(采收)果实,当天运回实验室,去轴落梳,选大小均匀、无病虫害及机械损伤的单果指,果皮和果肉分离,液氮速冻后于-80 °C保存备用。

#### 2.2 采后果实处理

取断蕾后60 d果实,采收时果实饱满度为七成,当天运回实验室。选大小均匀、无病虫害及机械损伤的单果指,去掉顶部干花,用0.1%次氯酸钠表面消毒10 min,晾干过夜后将果实分为3组,分别为自然后熟(对照)、外源乙烯处理和1-MCP处理,每种处理取30支果指。将果实放入0.03 mm厚聚乙烯薄膜袋中,外源乙烯处理的密闭注射100

$\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙烯(佛山市科的气体化工有限公司;浓度99.9%);1-MCP处理的按1  $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 的量称取1-MCP粉末(Ethylbloc™;含0.43%的有效成分)加水,3种处理在22 °C下密闭18 h后打开。自然后熟于采后4、6、8、10、12、14和16 d取样,乙烯处理于采后0、2、4、6、8、10和12 d取样,1-MCP处理于采后0、6、12、18、24、30和36 d取样。

以上3种处理均设3次重复,每个样随即取3支果指中部果肉20~50 g进行抗性淀粉含量及其它相关指标的测定。

### 3 测定方法

Goni法测定抗性淀粉含量。香蕉果肉浸入0.5%亚硫酸氢钠溶液中护色10 min,于40 °C干燥20~24 h(20 h后每隔1 h测定1次质量,直到质量没有变化时取出样品),磨粉。其后步骤参照Goñi等(1996)方法。

香蕉果肉护色与磨粉步骤同上节。葡萄糖含量测定参照范媛媛等(2011)方法。蔗糖和果糖提取与测定参照其测试盒(南京建成生物工程研究所)说明书。总淀粉含量测定参照徐昌杰等(1998)方法。

### 4 数据处理

所用数据均通过Sigma Plot 10.0软件进行分析。

## 实验结果

### 1 香蕉果实发育过程中总淀粉、抗性淀粉、蔗糖、果糖和葡萄糖含量的变化

由图1可知,随着香蕉果实的发育,总淀粉、抗性淀粉和蔗糖含量呈直线上升趋势,断蕾后50 d,总淀粉、抗性淀粉和蔗糖含量均达到最大值,分别为699.32、402.96和35.61  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。果糖和葡萄糖含量呈逐渐下降趋势,断蕾后60 d果糖和葡萄糖含量分别为1.46和2.38  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

### 2 香蕉采后果实成熟度、总淀粉和抗性淀粉含量的变化

由图2-A可知,随着香蕉果实成熟度增加,果皮逐渐褪绿变黄;成熟度V时只有果柄处略带绿色,其它部位基本变黄;成熟度VI时,果柄处及其它部位完全变黄;成熟度VII时,果皮出现明显的褐色斑点。贮藏过程中,总淀粉和抗性淀粉含量呈逐渐下降趋势,14 d时其含量分别为44.32和40.28  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (图2-B)。乙烯和1-MCP处理的总淀粉和抗性淀粉含量变化趋势与自然后熟相似(图2-C、D)。

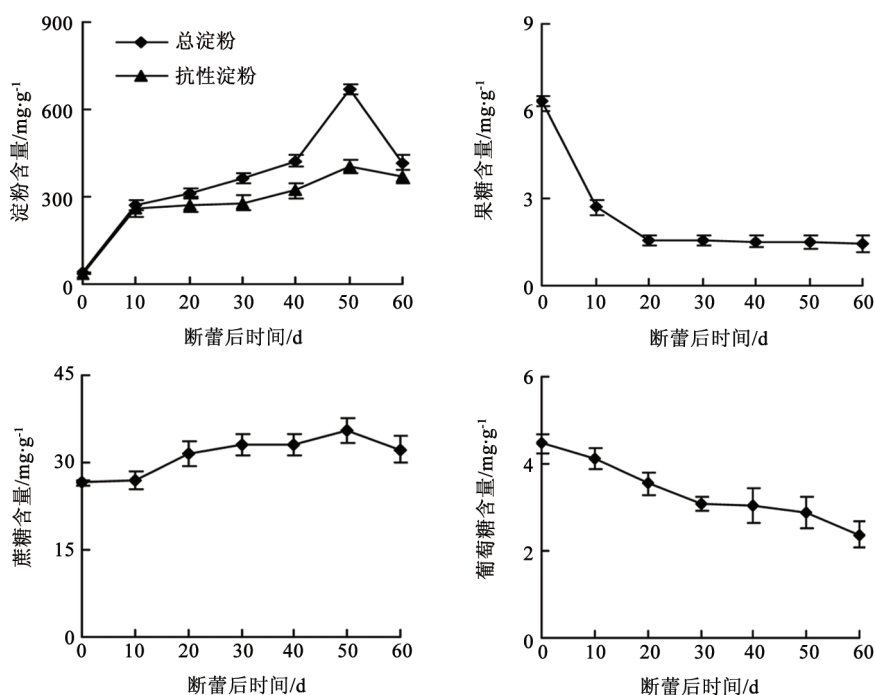


图1 香蕉采前果实总淀粉、抗性淀粉和可溶性糖含量变化

Fig.1 Changes of total starch, resistant starch and soluble sugar contents in banana pulp before harvest

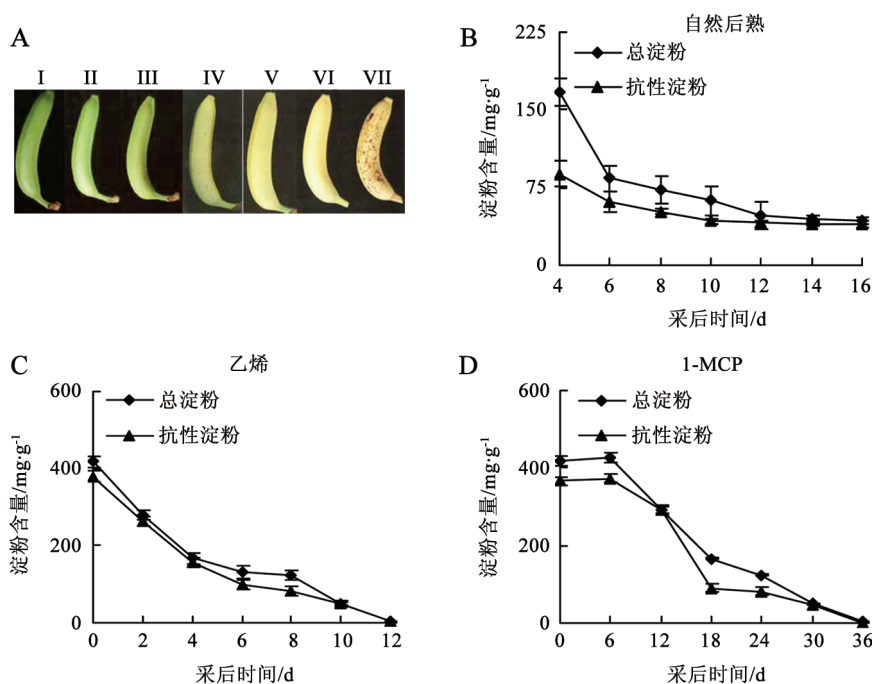


图2 不同处理下香蕉采后果实总淀粉和抗性淀粉含量的变化

Fig.2 Changes of total starch and resistant starch contents of postharvest banana pulp with different treatments

A: 不同成熟度的香蕉果实; B: 自然后熟; C: 乙烯处理; D: 1-MCP处理。

### 3 香蕉采后果实蔗糖、果糖和葡萄糖含量的变化

由图3-A可知, 贮藏过程中, 蔗糖、果糖和葡

萄糖含量呈先升后降的单峰型变化, 采后14 d时蔗糖、果糖和葡萄糖含量均达到最高峰, 分别为

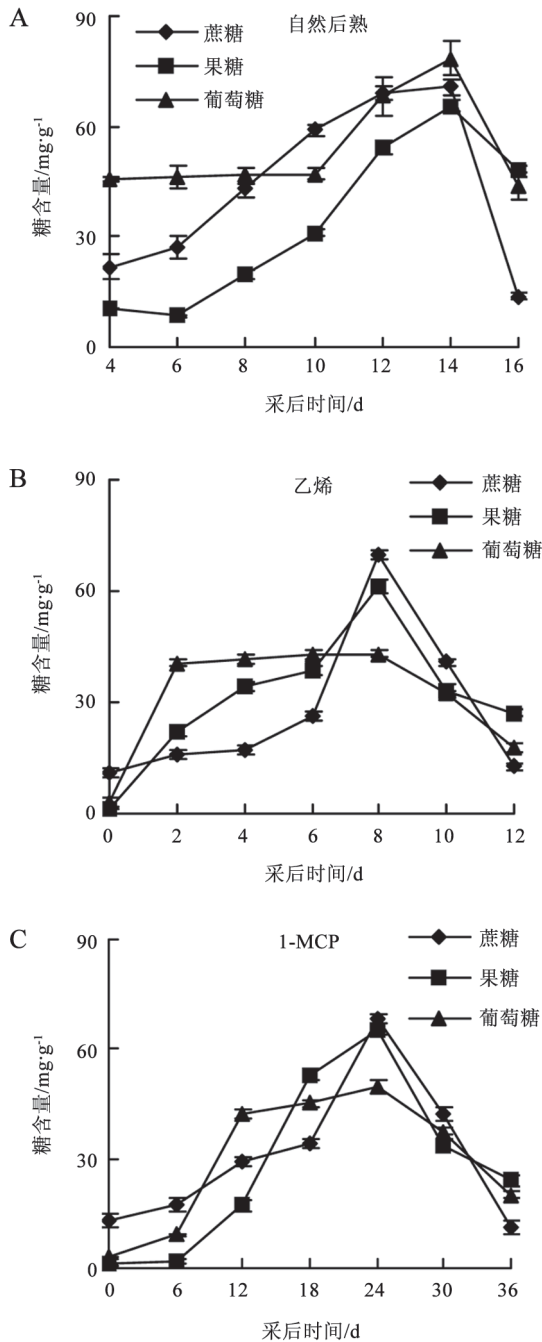


图3 不同处理下香蕉采后果实蔗糖、果糖和葡萄糖含量的变化

Fig.3 Changes of sucrose, fructose and glucose contents of postharvest banana pulp with different treatments

A: 自然后熟; B: 乙烯处理; C: 1-MCP处理。

70.62、65.52和78.53 mg·g<sup>-1</sup>。乙烯和1-MCP处理的蔗糖、果糖和葡萄糖含量变化趋势与自然后熟相似(图3-B、C)。但乙烯处理导致蔗糖、果糖和葡萄糖含量最高峰由第14天提前至第8天(图3-B),

1-MCP处理导致蔗糖、果糖和葡萄糖含量最高峰由第14天延迟至第24天(图3-C)。

将香蕉采后果实成熟度(图2-A)与抗性淀粉、可溶性糖含量指标结合起来分析发现,当果实达到成熟度V时(自然后熟14 d, 乙烯处理后8 d, 1-MCP处理后24 d),抗性淀粉含量保持在40.0 mg·g<sup>-1</sup>左右(图2),蔗糖、果糖和葡萄糖含量也达到最大值(图3)。因此,在香蕉果实达到成熟度V(图2-A)时食用,可能即可以获得较好的食味,又更加营养。

#### 4 香蕉果实总淀粉、蔗糖、果糖、葡萄糖含量与抗性淀粉含量变化相关性及其方差分析

香蕉采前果实抗性淀粉与总淀粉、蔗糖含量变化呈极显著正相关( $r=0.8673$ ,  $P=0.0045<0.01$ ;  $r=0.8961$ ,  $P=0.0009<0.01$ ) (图4-A、B),与果糖和葡萄糖含量变化呈极显著负相关( $r=-0.8602$ ,  $P=0.0009<0.01$ ;  $r=-0.8568$ ,  $P=0.0009<0.01$ ) (图4-C、D)。

香蕉采后果实抗性淀粉与总淀粉含量变化呈极显著正相关( $r=0.8023$ ,  $P=2.32\times 10^{-15}<0.01$ ) (图5-A),与蔗糖、果糖、葡萄糖含量变化相关性不显著(图5-B、C和D)。

## 讨论

可溶性糖(主要包括蔗糖、果糖和葡萄糖)是淀粉合成的底物,其含量的高低与淀粉积累密切相关(王书丽等2005; Batta等2011; 陈露露等2011)。小麦旗叶可溶性糖含量变化与淀粉的积累量呈负相关,灌浆期籽粒可溶性糖的急剧下降与淀粉含量的迅速上升趋势相吻合(王书丽等2005)。吴岚芳和黄绵佳(2008)报道香蕉果实断蕾后10~60 d淀粉含量呈直线上升,蔗糖含量表现出先升后降趋势。乔永旭等(2000)报道甜瓜果实成熟期之前,蔗糖几乎很少积累,进入成熟期,果实中蔗糖迅速积累,单糖略有下降。然而在香蕉果实发育中,可溶性糖、淀粉和抗性淀粉含量存在怎样的变化规律,它们之间存在怎样的相关性,目前还未见报道。本文结果表明,随着香蕉果实发育,总淀粉、抗性淀粉和蔗糖含量呈上升趋势(图1),且抗性淀粉形成与总淀粉、蔗糖含量上升呈极显著正相关(图4-A、B)。因此,在香蕉果实发育过程中,可通过提高淀粉、蔗糖含量来促进抗性淀粉的形成。

自然后熟前期阶段淀粉剧烈水解、可溶性糖含量增加,为果实呼吸跃变和成熟提供了能源基

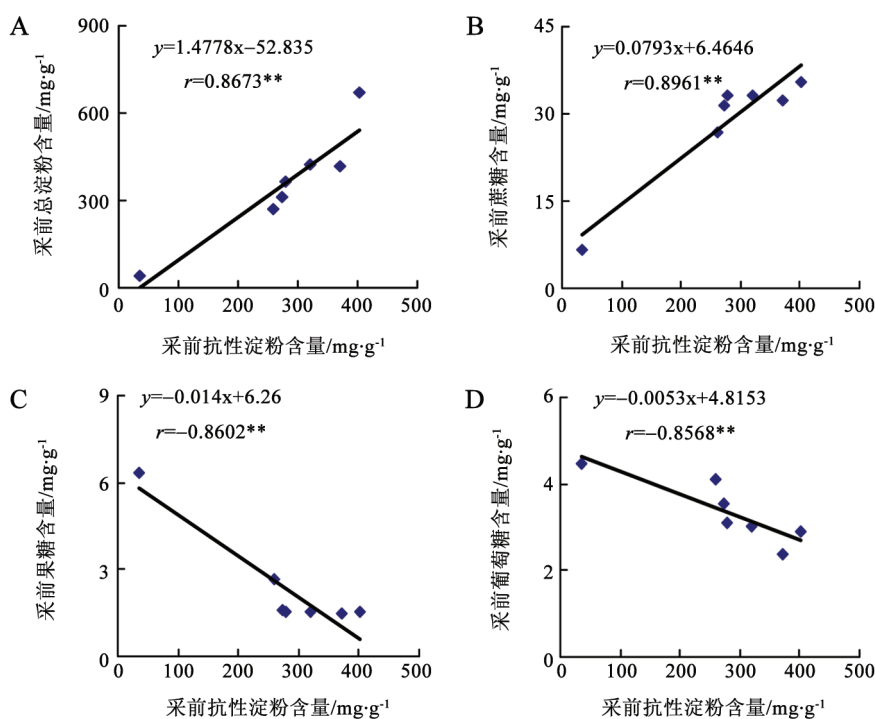


图4 采前香蕉果实总淀粉、蔗糖、果糖、葡萄糖含量与抗性淀粉含量的相关性

Fig.4 Correlation of total starch, sucrose, fructose, glucose contents and resistant starch in banana fruit before harvest

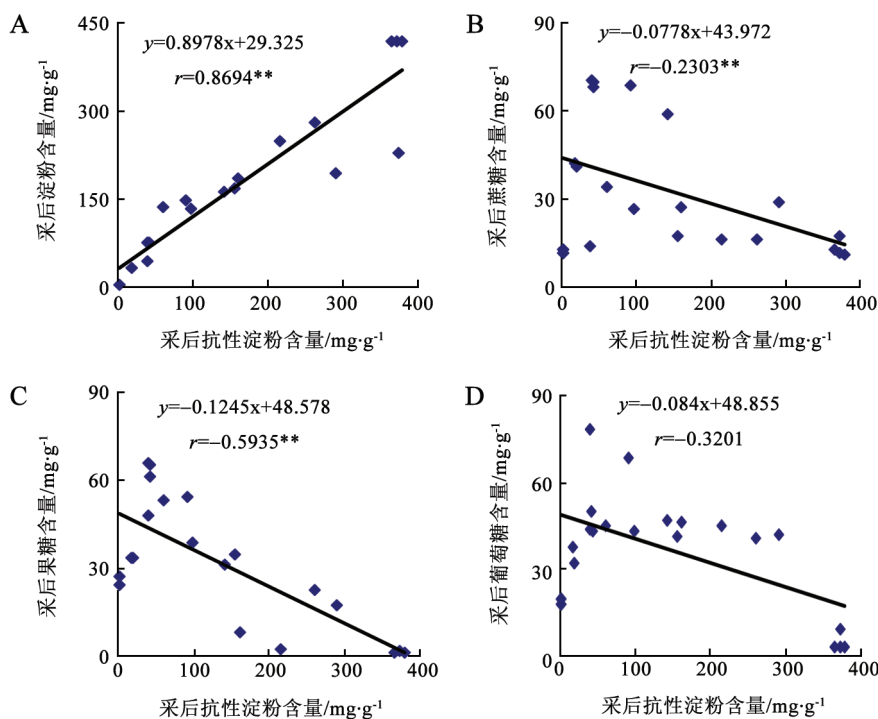


图5 采后香蕉果实总淀粉、蔗糖、果糖、葡萄糖含量与抗性淀粉含量的相关性

Fig.5 Correlation of total starch, sucrose, fructose, glucose contents and resistant starch in banana fruit after harvest

础; 自然后熟后期阶段糖作为呼吸基质被消耗, 含糖量迅速下降(林河通等2003)。乙烯处理显著加

速了苹果(王永章和张大鹏2000)、猕猴桃(张玉等2004)、香蕉(段学武等2002)、水稻(Zhu等2011)等

淀粉降解。1-MCP处理可以明显抑制苹果(孙希生等2003)、香蕉(苏小军等2003)、梨(王文辉等2004)等果实淀粉分解和转化。本研究发现,自然后熟、乙烯和1-MCP处理后,香蕉果实总淀粉、抗性淀粉含量均呈逐渐下降趋势(图2-B、C和D),蔗糖、果糖、葡萄糖呈先升后降的单峰型变化,且乙烯及1-MCP处理分别促进、延迟了总淀粉、抗性淀粉向可溶性糖的转化(图3-A、B和C)。相关性分析发现,香蕉贮藏过程中,抗性淀粉与总淀粉含量变化呈极显著正相关(图5-A)。因此,在香蕉果实后熟过程中,可以通过抑制总淀粉向可溶性糖的转化和水解来保持抗性淀粉含量。

以上结果表明,香蕉果实发育过程中,抗性淀粉与总淀粉、蔗糖含量变化密切相关;后熟过程中,抗性淀粉与总淀粉含量呈极显著正相关。因此,后续研究中可通过加速总淀粉、蔗糖的转运来提高抗性淀粉的含量,而后熟过程中可通过抑制总淀粉向可溶性糖的转化来保持抗性淀粉的含量,从而获得既具有较好的食味,又更加营养的香蕉果实。

### 参考文献

- 陈露露,王涛,黄雪燕,卢彩玉,刘冬峰,郑小艳,滕元文(2011). 大栅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
- 段学武,庞学群,张昭其,季作梁(2002). 冷激处理对香蕉后熟软化及相关酶活性的影响. 园艺学报, 29 (3): 214~217
- 范媛媛,毛联凯,夏雨,江东南,杨公明(2011). 香蕉天然抗性淀粉测定方法的比较. 食品科技, 36 (5): 256~259
- 高群玉,李素玲(2011). 绿豆抗性淀粉的制备及特性. 华南理工大学学报(自然科学版), 39 (4): 88~93
- 林河通,席芳,陈绍军(2003). 黄花梨果实采后软化生理基础. 中国农业科学, 36 (3): 349~352
- 乔永旭,刘栓桃,赵智中,邢国明,何启伟(2004). 甜瓜果实发育过程中糖积累与蔗糖代谢相关酶的关系. 果树学报, 21 (5): 447~450
- 苏小军,蒋跃明,李月标(2003). 1-MCP对香蕉果实货架期的影响. 亚热带植物科学, 32: 1~3
- 孙希生,王文辉,王志华,李志强,张志云(2003). 1-MCP对苹果采后生理的影响. 果树学报, 20 (1): 12~17
- 王书丽,郭天财,王晨阳,查菲娜,宋晓(2005). 两种筋力型小麦叶、粒可溶性糖含量及与籽粒淀粉积累的关系. 河南农业科学, 4: 12~15
- 王文辉,孙希生,李志强,王志华,张志云(2004). 1-MCP对梨采后某些生理生化指标的影响. 植物生理学通讯, 40 (2): 175~177
- 王永章,张大鹏(2000). 乙烯对成熟期红星苹果果实碳水化合物代谢的调控. 园艺学报, 27 (6): 391~395
- 吴岚芳,黄绵佳(2008). 香蕉果实发育过程中糖代谢的研究. 安徽农业科学, 36 (12): 4862~4863
- 熊春红,谢明勇,陈钢(2007). 抗性淀粉研究综述. 天然产物研究与开发, 19: 708~717
- 徐昌杰,陈文峻,陈昆松,张上隆(1998). 淀粉含量测定的一种简便方法—碘显色法. 生物技术, 8 (2): 41~43
- 张铁涛,徐云升,武天明(2011). 青香蕉抗性淀粉含量测定及特性研究. 食品工业, 3: 88~90
- 张玉,陈昆松,张上隆,王建华(2004). 猕猴桃果实采后成熟过程中糖代谢及其调节. 植物生理与分子生物学学报, 30: 317~324
- 赵剑波,姜全,郭继英,陈清华,李绍华(2008). 桃不同种质资源成熟果实葡萄糖、果糖含量比例研究. 中国农业大学学报, 13 (2): 30~34
- Batta SK, Thind KS, Singh P, Uppal SK (2011). Variability in activities of sucrose metabolizing enzymes in relation to sucrose accumulation among parents and their progenies of sugarcane. Sugar Tech, 13 (2): 114~122
- Englyst H, Wiggins HS, Cummings JH (1982). Determination of the non-starch polysaccharides in plant foods by gas-liquid chromatography of constituent sugars as alditol acetates. Analyst, 107: 307~318
- Goñi I, Garcia-Diz L, Mañas E, Saura-Calixto F (1996). Analysis of resistant starch: a method for food and food products. Food Chem, 56 (4): 445~449
- Gunaratne A, Kao W, Ratnayaka J, Collado L, Corke H (2013). Effect of parboiling on the formation of resistant starch, digestibility and functional properties of rice flour different varieties growth in Sri Lanka. J Sci Food Agric, Doi: 10.1002/jsfa.6091
- Hallström E, Sestili F, Lafiandra D, Björck I, Östman E (2011). A novel wheat variety with elevated content of amylose increase resistant starch formation and may beneficially influence glycaemia in healthy subjects. J Food Nutri Res, 55: 7074~7082
- Izidoro-Toledo TC, Guimaraes DA, Belo VA, Gerlach RF, Tanus-Santos JE (2011). Effects of statins on matrix metalloproteinases and their endogenous inhibitors in human endothelial cells. Naunyn-Schmied Arch Pharmacol, 383 (6): 547~554
- Langkilde AM, Champ M, Andersson H (2002). Effects of high-resistant-starch banana flour (RS<sub>2</sub>) on in vitro fermentation and the small-bowel excretion of energy, nutrients, and sterols: an ileostomy study. Am J Clin Nutr, 75: 104~111
- Lian XJ, Zhao SY, Liu QS, Xu Z (2011). A photographic approach to the possible mechanism of retrogradation of sweet potato starch. Int J Biol Macromol, 48: 125~128
- Nugent AP (2005). Health properties of resistant starch. Nutrit Bulletin, 30 (1): 27~54
- Tribess TB, Hernandez-Urbe JP, Mendez-Montealvo MGC, Menezes EW, Bello-Perez LA, Tadini CC (2009). Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa cavendishii*) produced at different drying conditions. LWT-Food Sci Technol, 42 (5): 1022~1025
- Zhao XH, Zhu CL (2013). Synergic effect of exogenous microorganism combination on propionic and butyric acid formation during in vitro colonic fermentation of maize resistant starch. Starch, Doi: 10.1002/star.201200202
- Zhu GH, Ye NH, Yang JC, Peng XX, Zhang JH (2011). Regulation of expression of starch synthesis genes by ethylene and ABA in relation to the development of rich inferior and superior spikelets. J Exp Bot, 62: 3907~3916