

番荔枝果实后熟过程多糖代谢与果实软化和采后裂果的关系

李伟明^{1,2}, 陈晶晶^{1,2,*}, 段雅婕^{1,2}, 胡会刚^{1,2}, 庞振才^{1,2}, 胡玉林^{1,2}

¹中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 农业部热带果树生物学重点实验室, 广东湛江524091

²中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 国家热带果树种质资源圃, 广东湛江524091

摘要: 为探讨AP番荔枝正造果后熟过程中多糖代谢与果实软化和采后开裂的关系, 本研究以AP番荔枝正造果为试材, 用乙烯利、1-MCP、高锰酸钾处理采后果实, 测定淀粉、可溶性糖、蔗糖等糖类含量以及果皮和果肉中果胶含量和细胞壁代谢相关酶[多聚半乳糖醛酸酶(PG)、纤维素酶(Cx)、果胶甲基酯酶(PME)]活性, 分析果实多糖代谢的变化。结果表明: 乙烯利处理抑制了原果胶的合成, 促进了原果胶向可溶性果胶的转化, 提高了果皮中PG、Cx和PME活性, 造成果皮开裂; 同时乙烯利促进果肉中淀粉转化为可溶性糖, 并加速果肉中原果胶的降解, 提高果肉中PG和Cx活性, 加快果肉的软化和开裂。而1-MCP和高锰酸钾一定程度上延缓果实软化和开裂, 其中1-MCP的作用略大于高锰酸钾。番荔枝后熟过程中果皮中原果胶同时存在合成和降解。相关性分析结果表明, 与果皮开裂相关性最高的是原果胶含量, 其次是果皮中的PG、Cx和PME活性; 而与果肉软化和开裂相关的主要是淀粉、原果胶含量, 果肉中的PG、Cx活性。其中PG和Cx既参与果实软化, 又参与果实开裂; 而PME参与果皮开裂。

关键词: 番荔枝; 裂果; 软化; 淀粉; 果胶

‘非洲骄傲’番荔枝(*Annona atemoya* ‘African Pride’, 简称AP番荔枝)是阿蒂莫耶番荔枝(*Annona cherimola* Mill.×*A. squamosa* L.) (杂交番荔枝)重要的商业栽培品种, 可人为调节产期、果实品质佳、风味芳香、食用及药用价值高而深受欢迎。杂交番荔枝属于呼吸跃变型果实(李雯和陈维信2004), 采后的正造果(采收期在9~10月)在室温条件下贮藏极易软化、裂果, 果实开裂后既影响外观, 又因易受病菌侵染而出现浆烂果, 严重地缩短了果实的贮藏寿命和货架期, 制约了其流通贸易。

影响裂果的因素有很多, 例如果实对水分的吸收, 果实本身的特性(果实大小和硬度、果皮的组织结构和韧性、果皮和果肉的渗透势)等, 尽管不同品种、成熟期裂果发生的时期及程度不尽相同, 但大多数果实的裂果常发生于采前果实迅速膨大期(Khadivi-Khub 2015), 而番荔枝裂果多发生在采后, 此时果实膨大已经完成。采后的番荔枝果实是离体状态, 不存在果实通过根系或果实表面吸水产生异常膨压的可能, 而通过自身水分再分配产生异常膨压的可能性较大, 其中果实中多糖类物质的降解对果实膨压的改变起着重要作用, 从多糖代谢的角度探讨其与果实软化和开裂的关系还未见深入报道。另外番荔枝存在软化和开裂不同步的问题, 如果软化伴随开裂, 果实有一定的

食用价值; 但如果果实先开裂, 会受病菌侵染而出现浆烂果, 则无法食用。

本研究通过用乙烯利、1-甲基环丙烯(1-MCP)和高锰酸钾(KMnO₄)处理番荔枝果实, 分析淀粉、果胶、可溶性糖含量及主要细胞壁水解酶活性变化差异, 探讨多糖代谢与果实软化和开裂的关系, 以期对果实品质改良和贮藏保鲜技术的改进提供参考依据, 为延长番荔枝采后保鲜期和延缓裂果的发生提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种AP番荔枝(*Annona atemoya* Hort.), 成年植株种植在中国热带农业科学院南亚热带作物研究所优稀种质资源圃。果实均在10月份采收, 采收成熟度约为八成熟, 此时番荔枝果皮呈黄绿色, 鳞目间鳞沟展开。采后立即运回实验室, 挑选大小和色泽相近、无机械伤、无病虫害的果实用于实验。处理时先用“施保克”1 000倍液浸果约2 min进行杀菌, 取出晾干后再进行各项处理。

收稿 2018-04-10 修定 2018-11-02

资助 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(1630062016003)和农业农村部农业野生植物资源保护项目(1251416305010)。

* 通讯作者(chenjingjing0704@163.com)。

1.2 处理

乙烯利(Eth)处理: 对AP番荔枝果实喷施 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的乙烯利, 然后放在泡沫盒中密封24 h, 然后开盖通风30 min。1-MCP处理: 将AP番荔枝果实放入泡沫盒中, 根据泡沫盒容积, 准确称取一定量的1-MCP粉剂, 使浓度达到 $1.8 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 放入一洁净小烧杯内, 然后置于泡沫盒内果实之间, 注入适量的水后迅速密封, 24 h后开盖通风30 min。KMnO₄处理: 将AP番荔枝果实放入饱和的高锰酸钾溶液浸泡2 min, 然后放在泡沫盒中密封24 h, 再开盖通风30 min。对照处理(CK): 不用任何试剂处理, 放在同样的泡沫盒内密封相同的时间, 再开盖通风30 min。处理后的番荔枝果实均于25°C室温贮藏。刚采收时的果实设为0 d, 选取3个果实进行取样, 然后每个处理放置20个果实, 每天选取3个果实作为取样对象, 在处理1、2、3、4和5 d后取样, 取样部位为果皮和果肉, 并迅速用液氮处理后保存于-80°C备用。同时观察果实表皮状态、开裂程度并进行拍照。

1.3 测定项目

1.3.1 硬度和裂果率测定

果肉硬度用GY-4型数显硬度计(杭州托普仪器有限公司), 将番荔枝果实中部1 cm²果皮削去, 硬度计垂直于被测果肉表面, 当压头压到刻度线10 mm处停止, 指针读数即为果实硬度, 硬度用 $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 表示。每个处理取3个样品, 每个样品测定3次。

裂果率(%)=裂果个数/总果数 $\times 100$ (裂缝长度大于5 mm)

1.3.2 糖类的测定

可溶性固形物用数字糖度计TD-92测定。可溶性总糖、蔗糖和淀粉含量测定参照汤章城(1999)的方法。可溶性总糖和蔗糖含量采用蒽酮法, 淀粉含量采用碘-碘化钾法。

1.3.3 果胶物质含量的测定

原果胶和可溶性果胶的提取和测定按照曹建康等(2007)的方法, 采用咔唑测定, 以半乳糖醛酸的质量表示果胶含量。

1.3.4 细胞壁降解酶活性的测定

多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、纤维素酶(cellulase, Cx)的酶液制备参照邓佳(2013)的方法, 对果肉和果皮分别取样1.0 g提取酶液, 测定均采用DNS (3,5-二硝基水杨酸)比色法。

果胶甲基酯酶(pectin methylesterase, PME)的提取和活性测定参照Hagerman和Austin (1986)方法并修改。分别称取1 g果肉和果皮, 加入8.8%预冷的NaCl 5 mL, 冰浴研磨成匀浆转入离心管, 于4°C、 $10\,000 \times g$ 离心10 min, 收集上清液, 用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH调pH 7.5后即为粗酶提取液, 低温保存备用。试管中加入4 mL 0.5%果胶溶液、0.3 mL 0.01%溴麝香草酚蓝, 加入300 μL 酶液, 反应2 min后测定620 nm处的吸光度值, 记录 $\Delta A_{620} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 变化以表示酶的活性, 重复3次。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2003和SPSS 19统计软件进行作图和数据分析, 相关性采用SPSS中的双变量相关及Pearson相关系数分析, 实验数据用平均值 $\pm$ 标准差(SD)。

2 实验结果

2.1 不同处理下番荔枝果实采后裂果率及硬度变化

果实硬度是判断果实质地, 反映果实贮藏性和衡量贮藏效果的主要指标。AP番荔枝在刚采摘时, 果实非常坚硬, 室温放置1 d后果实外观基本没有变化。第2天, 乙烯利处理的果实有变软迹象(图1-B), 而CK、1-MCP和KMnO₄处理果实依然坚硬, 各处理下果实均没有出现开裂(图1)。第3天, 各处理果实有不同程度开裂。正常开裂首先发生在果柄处, 果轴和果肉分离, 然后从分离处向果实底部辐射开裂。而乙烯利处理则出现果皮开裂的现象, 这在其他处理中是不存在的。此时乙烯利处理的果实已经全部开裂, 包括果皮和果柄处, 硬度值继续下降(图1-A)。CK、1-MCP和KMnO₄果实开裂方式一致, 部分果实的果柄与果肉出现分离, 果实开始变软, 但果实表面软硬不均匀, 不同处理的裂果率顺序为CK>KMnO₄>1-MCP。处理第5天, 乙烯利处理的果实已经呈现过熟的状态, 果皮和果柄处开裂加重, 果皮呈现黑色或褐色(图2)。CK的果实开裂继续加大, 果实变软。1-MCP和KMnO₄处理果实也继续开裂, 开裂程度小于CK; 硬度值继续下降, 两者差异不大, 但1-MCP处理的整体开裂程度小于KMnO₄处理。除了1-MCP, 其他处理的果实第5天均已100%开裂, 1-MCP处理也在第6天全部开裂, 说明1-MCP一定程度上可以延缓开裂, 而KMnO₄处理虽然延缓了开裂, 但比1-MCP处理

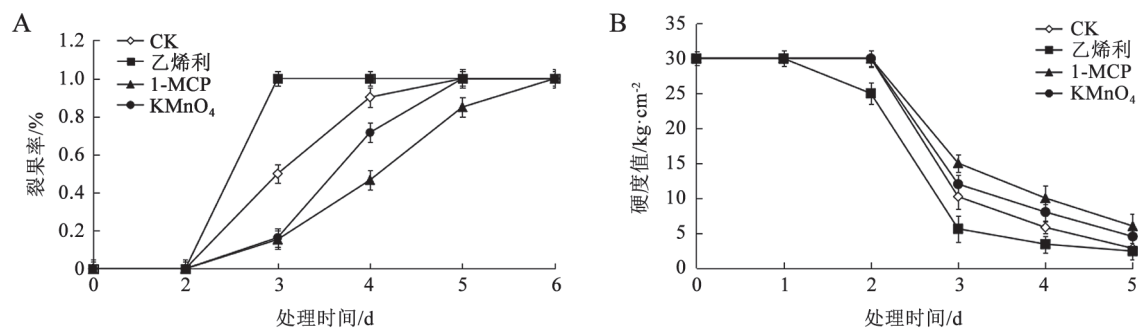


图1 不同处理下番荔枝果实裂果率和硬度值变化

Fig.1 Changes in cracking rate and firmness of atemoya fruit with different treatments



图2 不同处理下番荔枝在贮藏第5天的外观变化

Fig.2 Appearance changes of atemoya fruit on the fifth day of storage with different treatments

效果差。从硬度值变化和果实开裂程度上分析, 乙烯利处理后除了果柄处开裂, 果皮也会开裂, 说明其加速了开裂, 一定程度上改变了果实开裂的方式; 1-MCP则延缓裂果, KMnO₄效果次之。

2.2 不同处理下番荔枝贮藏期间糖类含量变化

番荔枝是淀粉贮存型的果实, 果实的后熟伴随着淀粉的降解。如图3-A所示, 各处理下, 淀粉含量都不断下降, 其中相比对照而言, 乙烯利处理第2天时, 淀粉含量下降明显, 此后降解速度不断加快。CK和KMnO₄处理的淀粉含量下降比较平缓, 直至第4天出现大幅下降。1-MCP处理的淀粉

降解速度一直较为平缓。到第5天, 不同处理的淀粉含量顺序为1-MCP>KMnO₄>CK>乙烯利。由此可见乙烯能加速淀粉降解, 而1-MCP可延缓淀粉降解, KMnO₄处理和CK淀粉含量变化无明显差异。

刚采摘时AP番荔枝可溶性固形物含量在8%~9%之间, 随着贮藏时间的增加, 可溶性固形物含量呈不断上升的趋势(图3-B)。乙烯对AP番荔枝的催熟作用明显, 可溶性固形物含量基本呈现直线式增加。第5天时, CK和乙烯利处理的番荔枝果实可溶性固形物含量均达到22%左右, 而1-MCP和KMnO₄处理的番荔枝果实可溶性固形物含量为19%。

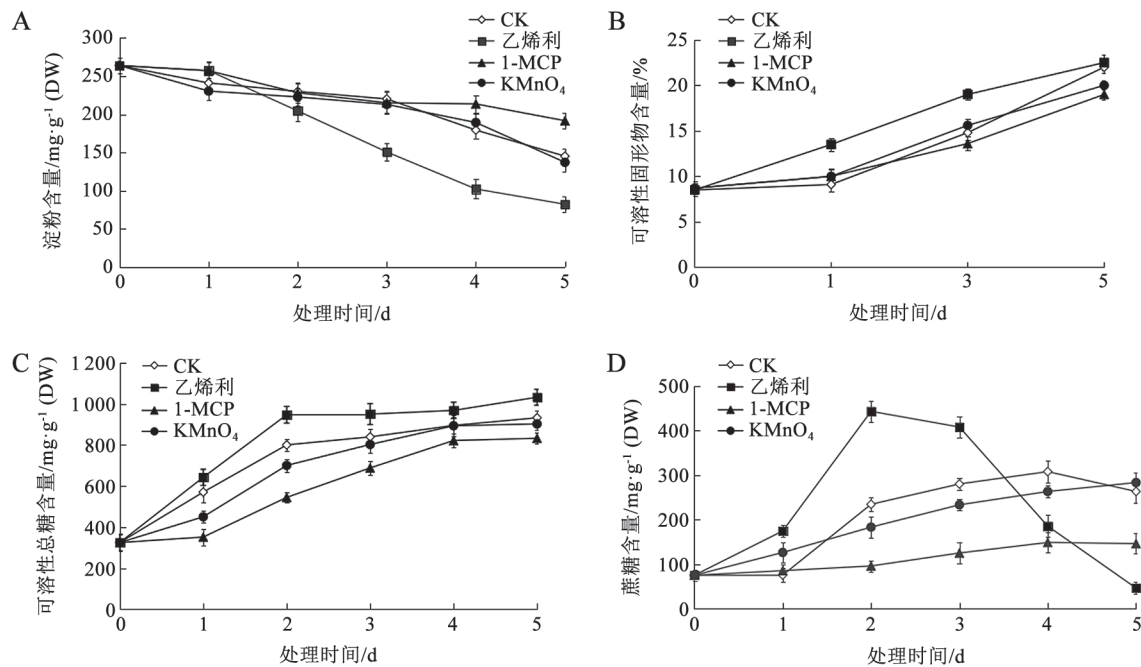


图3 不同处理下番荔枝果实淀粉(A)、可溶性固形物(B)、可溶性总糖(C)和蔗糖(D)含量变化
Fig.3 Changes in starch (A), soluble solids (B), total soluble sugars (C) and sucrose (D) contents of atemoya fruit with different treatments

如图3-C所示, 随时间增加, 可溶性总糖含量呈现不断上升的趋势。前2 d是可溶性糖含量快速增加的时期。乙烯利处理的番荔枝果实可溶性总糖含量一直高于其他处理, 而1-MCP处理的可溶性总糖含量一直低于其他处理。KMnO₄处理的可溶性总糖含量在3 d前低于CK, 之后与CK无明显差异。

番荔枝果实采后后熟期间, 蔗糖的变化趋势如图3-D所示, 除了乙烯利, 各处理均呈现不断上升的趋势。乙烯利处理的蔗糖含量在第2天达到最大, 之后快速下降。相比其他处理, 1-MCP处理的最低。而KMnO₄处理的较1-MCP处理高, 比CK低。

2.3 不同处理下番荔枝贮藏期间果胶含量变化

果胶是果实细胞壁中胶层的主要组分。果胶质在果实成熟之前呈不溶状态, 即原果胶, 随着果实成熟, 原果胶降解为可溶性果胶。

在果皮中, 原果胶含量呈现先上升后下降的趋势(图4-A)。乙烯利处理的番荔枝果实只在第1天时含量有所上升, 之后含量一直处于下降趋势; CK和KMnO₄处理的缓慢上升, 第3天达到最大值, 之后开始下降; 而1-MCP处理的原果胶含量一直上升, 第4天才开始下降。以上结果说明果实后熟

过程中果皮中的原果胶会继续合成, 不同试剂处理会影响合成进程。果肉中的原果胶变化趋势与果皮中的不一致(图4-B), 果肉的原果胶含量均呈现不断下降的趋势, 到第5天, 乙烯利处理的原果胶含量最低, 1-MCP处理的原果胶含量最高, KMnO₄和CK处理的原果胶含量相差不大。

可溶性果胶含量在果皮和果肉中的变化趋势一致(图4), 均呈现不断上升的趋势, 其中乙烯利处理的可溶性果胶含量增加较快; 其次是CK和KMnO₄; 而1-MCP处理的可溶性果胶含量增加最慢, 含量最低, 以上结果说明乙烯利处理加速了原果胶降解为可溶性果胶, 而1-MCP延缓了此进程。整体而言, 果皮中的可溶性果胶含量高于果肉中的可溶性糖含量。

2.4 不同处理下番荔枝贮藏期间细胞壁降解酶活性变化

PG是主要的细胞壁水解酶之一, 其主要功能是水解果实细胞壁中果胶酸的 α -(1 $\rightarrow$ 4)-D-半乳糖苷键, 生成低聚的半乳糖醛酸或半乳糖醛酸, 使细胞壁结构解体, 导致果实软化。在果皮中, 除了CK, 乙烯利、1-MCP和KMnO₄处理的PG活性均呈

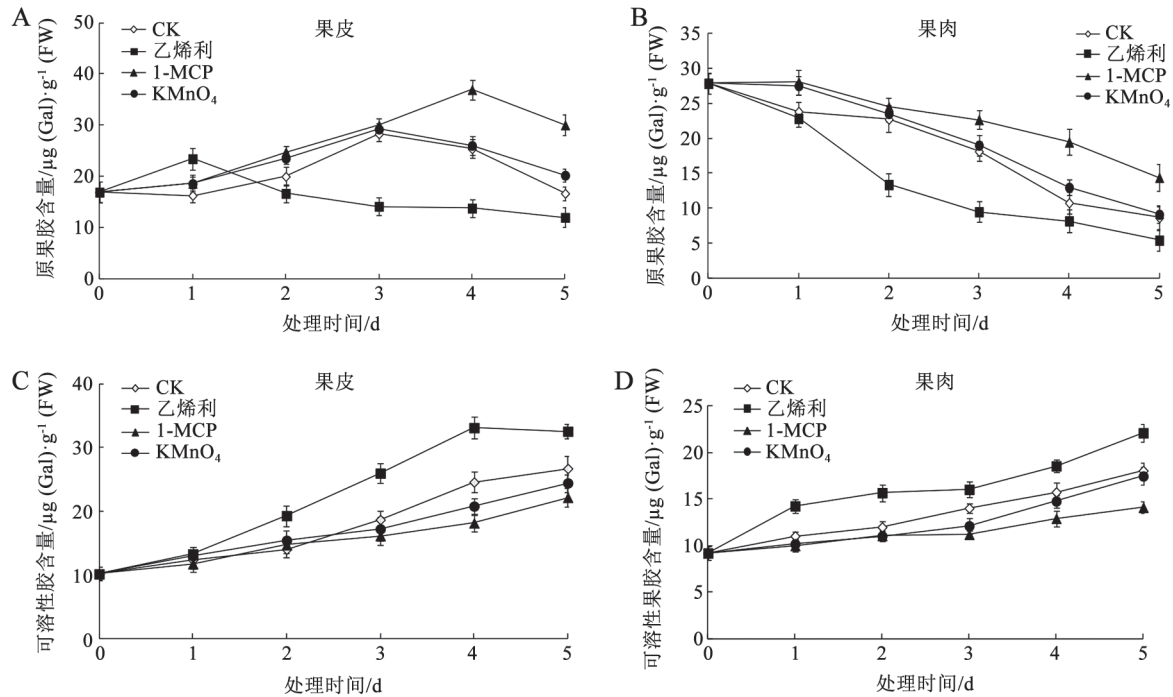


图4 不同处理下番荔枝果实原果胶和可溶性果胶含量变化

Fig.4 Changes in protopectin and soluble pectin contents in the peel and flesh of atemoya fruit with different treatments

A、B: 果皮和果肉中原果胶含量; C、D: 果皮和果肉中可溶性果胶含量。

现先上升后下降的趋势。整体而言, 乙烯利处理后果皮的PG活性均高于其他处理, 1-MCP处理的PG活性最低。各处理下果肉中的PG活性明显高于果皮(图5-B), PG活性呈现不断上升的趋势, 其中乙烯利处理活性最高, 其次是KMnO₄, 最后是1-MCP。

在细胞壁中, 半乳糖醛酸残基通常为高度甲基化的, 必须先经过果胶甲酯酶(PME)的去甲基化作用后才能成为PG的作用底物。如图5所示, 果皮中, 乙烯利处理的PME活性在第1天有一个急剧上升的阶段, 然后急速下降。1-MCP和KMnO₄处理的PME活性变化幅度较小。CK处理的PME活性呈现先上升后下降的趋势。果肉中的PME活性整体低于果皮中的, 第5天, PME活性顺序为1-MCP > CK > KMnO₄ > 乙烯利。

Cx是一族能够降解羧甲基纤维素的酶。如图5所示, 在果皮中, Cx活性均呈现不断上升的趋势, 各处理顺序为乙烯利 > CK > 1-MCP > KMnO₄。果肉中的Cx活性高于果皮, 也呈现不断上升的趋势, 在第5天, Cx活性开始降低, 不同处理的Cx活性高低和果皮中顺序一样。

2.5 番荔枝果实糖类、果胶及细胞壁代谢相关酶活性与硬度的相关性分析

从表1可以看出, 各处理果实硬度与淀粉含量变化均呈显著或极显著的正相关; 除了CK外果实硬度与可溶性总糖含量变化也呈现显著或极显著的正相关, 而所有处理下, 果实硬度与蔗糖含量变化无显著相关。乙烯利处理均显著提高了果实硬度与可溶性总糖和淀粉间的相关水平, 说明果实的软化与淀粉转化为可溶糖密切相关。1-MCP和KMnO₄处理提高了果实硬度与可溶性总糖的相关性。

从表2可以看出, 各处理下果实硬度与果肉原果胶含量均呈显著或极显著的正相关, 同时果肉可溶性果胶除了乙烯处理外, 其他均与硬度值呈显著或极显著负相关。其中CK中果肉的原果胶和可溶性果胶含量均与硬度值呈极显著相关, 表明果实软化与果肉中原果胶、可溶性果胶含量关系密切, 其中原果胶的降解与果实硬度相关性更强。除了乙烯, 其他处理下, 果肉中PG与硬度值均显著负相关, 表明PG与果肉软化关系密切, 但这种相关性会随处理条件的改变而受影响。PME与硬

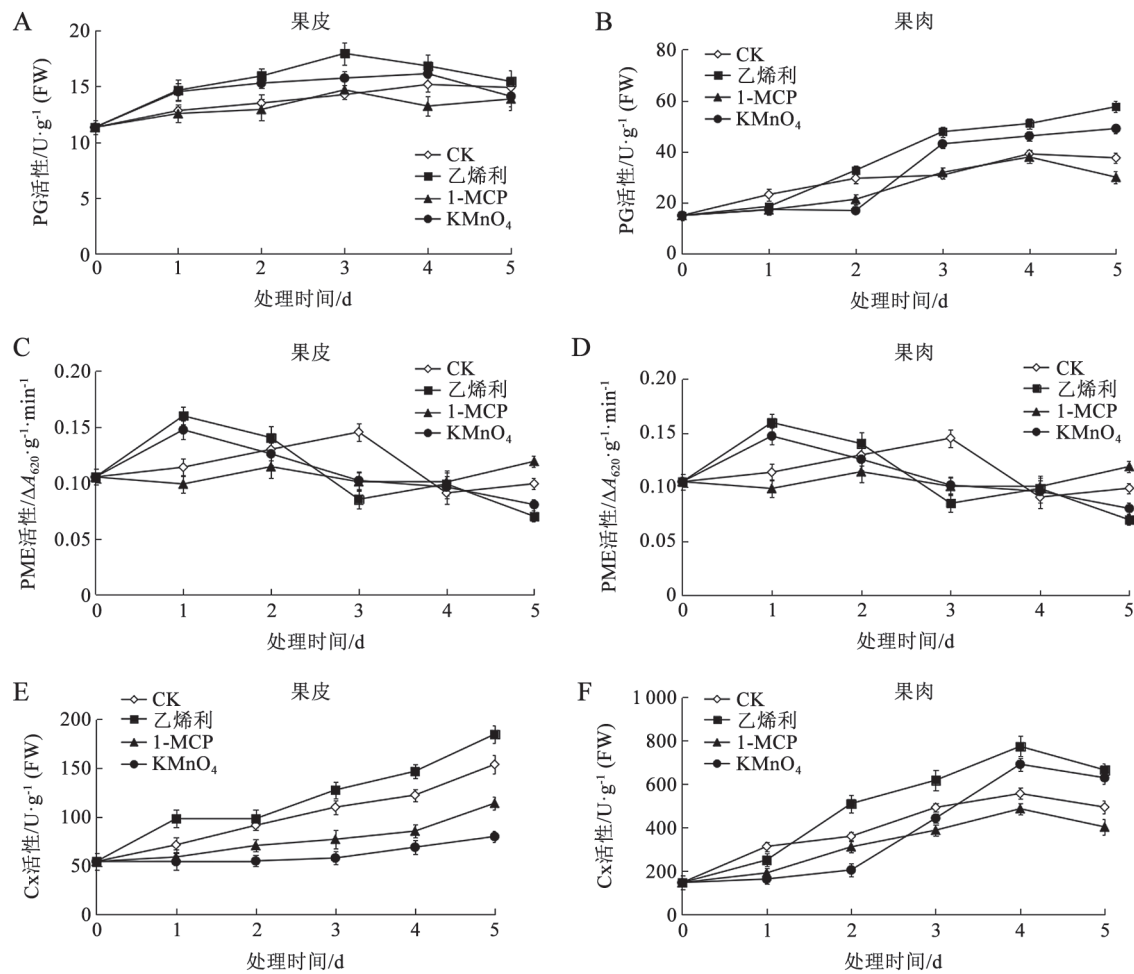


图5 不同处理下番荔枝果实PG、Cx、PME活性变化

Fig.5 Changes in PG, Cx and PME activities in the peel and flesh of atemoya fruit with different treatments
A、C、E: 果皮中PG、PME和Cx活性; B、D、F: 果肉中PG、PME和Cx活性。

表1 番荔枝果实淀粉、可溶性总糖和蔗糖含量
变化与果实硬度的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between starch, total soluble sugars and sucrose contents and fruit firmness of atemoya fruit

指标	处理	淀粉含量	可溶性总糖含量	蔗糖含量
硬度	对照	0.884*	0.730	-0.793
	乙烯利	0.967**	0.915**	0.140
	1-MCP	0.888*	0.833*	0.083
	KMnO ₄	0.848*	0.886*	0.437

*: 表示显著相关($P<0.05$), **: 表示极显著相关($P<0.01$), $n=3$ 。下表同此。

度值的相关性除了KMnO₄处理, 其他处理均不显著相关, 说明PME与果肉的软化关系不密切。在各处理下, 果肉中Cx均与硬度值呈显著性负相关, 说明纤维素酶在果实软化过程中起重要作用。

综上分析表明, 果实硬度与淀粉含量, 原果胶含量, Cx活性有直接显著相关性, 而与可溶性糖含量、可溶性果胶含量和PG活性关系密切, 但可能易受外界条件影响。

3 讨论

3.1 淀粉与果实软化、开裂的关系

淀粉是番荔枝果实的主要贮藏物质(李雯和陈维信2004), 在苹果(齐秀东和魏建梅2015)、桃(Wang等2013)、香蕉(苗红霞等2013)、猕猴桃(陈金印等2003)等水果上发现, 果实软化和淀粉降解密切, 果实细胞内糖和淀粉成分与含量的改变及其动态平衡的打破会间接影响果实的软化进程(Wang等2013)。Mo等(2008)研究表明, 番荔枝果实随着后熟作用的完成而使果实硬度急剧降低,

表2 番荔枝果肉中果胶含量及细胞壁代谢相关酶活性与果实硬度的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between pectin contents, cell wall enzymes activity and fruit firmness of atemoya fruit

指标	处理	原果胶含量	可溶性果胶含量	PG活性	PME活性	Cx活性
硬度	对照	0.941**	-0.932**	-0.835*	0.257	-0.860*
	乙烯利	0.906*	-0.811	0.765	0.799	-0.888*
	1-MCP	0.929**	-0.828*	-0.888*	-0.203	-0.859*
	KMnO ₄	0.954**	-0.908*	-0.996**	0.816*	-0.969**

一方面可能的原因是淀粉大量转化为可溶性糖类。本研究表明常温未处理下番荔枝的后熟伴随着淀粉的不断降解, 乙烯能促进淀粉降解, 而1-MCP和KMnO₄能一定程度抑制淀粉转化的速度, 这与乙烯促进果实软化, 1-MCP和KMnO₄推迟果实的软化进程是一致的, 另外各处理下硬度值均与淀粉含量变化显著正相关, 说明淀粉的降解与番荔枝的软化密切相关。

淀粉的降解受外部条件的影响, 如乙烯加速淀粉降解(苗红霞等2016; 齐秀东和魏建梅2015), 1-MCP处理延缓淀粉降解(Itai和Tanahaghi 2008; 齐秀东和魏建梅2015), 低温延缓淀粉降解(Jomn-gam等2017)等; 在番荔枝上我们同样也发现上述结果, 而与之对应的乙烯加速番荔枝果实开裂, 1-MCP延缓果实开裂。在本研究中, 各处理下可溶性总糖含量的上升趋势, 淀粉含量的降解趋势与裂果率的变化及开裂程度是一致的, 暗示淀粉向可溶性糖类的转化而造成渗透势的改变是造成番荔枝果实开裂的重要原因。

3.2 果胶与果实软化、开裂的关系

果皮是果实开裂的直接部位, 果皮抗裂性形成与果皮强度和延伸性有关, 这与果皮组成物质的成分有着密切联系。研究发现细胞壁多糖, 尤其是纤维素和原果胶合成的增加, 可提高果皮的抗裂性(杨为海等2011)。细胞壁多糖降解所引起的胞壁分离、细胞壁总体结构的改变是果实软化的主要原因, 而细胞壁水解酶又是细胞壁多糖降解的主要因素。前人对苹果和桃等果实的研究表明, 果实硬度的保持与果实中果胶的含量和成分是极为相关的, 在果实后熟过程中, 原果胶逐渐降解为可溶性果胶, 细胞结构随之受损, 果肉硬度迅速下降(胡留申等2007)。本研究表明番荔枝后熟过程中果皮和果肉中可溶性果胶含量变化趋势相同, 均呈现不断上升的趋势, 和大多数研究一致。

果皮和果肉中原果胶的变化趋势不同, 果皮中呈现先上升后下降的趋势, 而果肉中呈现一直下降的趋势。此时果皮中的可溶性果胶含量呈现上升趋势, 说明在后熟阶段果皮原果胶合成和分解同时存在, 这与在其他水果中的研究不完全一致。乙烯处理加速了果皮中原果胶向可溶性果胶的转化, 并且一定程度上抑制了原果胶的合成, 这与乙烯促进果皮发生开裂的现象相联系, 暗示原果胶的降解与果皮开裂密切相关。果肉中各处理下原果胶含量与硬度值均呈显著相关, 一定程度上解释了乙烯促进果肉软化, 1-MCP延缓果实软化的原因。

3.3 细胞壁代谢酶与果实软化、开裂的关系

PG、PME和Cx对细胞壁多糖的降解有时序性和阶段性, 不同软化时期起主要作用的酶也有所不同(程杰山等2008)。研究表明, 果胶、纤维素降解相关的酶, 如果胶甲酯酶、纤维素酶和多聚半乳糖醛酸酶等在甜橙(李春燕等2006)、红江橙(陈杰忠等1999)、荔枝(李建国等2003)等水果中与裂果关系密切, 例如柑桔抗裂品种果皮的细胞壁水解酶比易裂品种果皮的酶活性高(陈杰忠等1999); 裂果率高的‘糯米糍’荔枝果皮中的果胶酶、纤维素酶和果胶甲酯酶的活性一般都高于‘淮枝’(李建国等2003)。而果胶和纤维素降解基因PG、PME、CEL6、MAN7也被发现在某些果实中与开裂相关(Khadivi-Khub 2015; Li等2013; 陈晶晶等2015; He等2018)。本研究发现3种酶的活性在果肉和果皮中表现不尽相同, 相同点是, 整体而言3种酶的酶活性从变化趋势上均有上升的阶段, 说明后熟期间, 3种酶都与果实软化或开裂有一定关系。不同点是果皮中的PG和Cx活性整体要比果肉中的低, 而PME活性果皮要比果肉中的稍高, 说明这三种酶在果皮和果肉中所起的作用不同。我们前期的研究结果表明易裂的AP番荔枝果皮中PME基因表达量明显高于不裂的PO番荔枝, 且PME明显受到

乙烯的诱导,表明PME基因可能与裂果相关(陈晶晶等2015)。PME酶活性测定发现,果皮PME酶活性也显著受乙烯诱导,而1-MCP处理下,PME酶活性一直处于较低的活性水平,结合乙烯处理下果皮先出现开裂,随之出现果蒂开裂,说明乙烯作用于果皮的时间早于果肉,而PME显著受乙烯诱导,表明PME可能参与了果皮开裂。从变化趋势、酶活性及与硬度值的相关性等方面分析,PG和Cx无论在果皮和果肉中均参与了果实软化或开裂,但无法区分它们在果实开裂和软化这两个既有联系又有区别的过程中具体的作用。

综上所述,本研究推测乙烯促进果皮开裂,可能原因是乙烯提高了果皮中PG、Cx和PME活性,加速了果皮中原果胶的降解,从而使细胞壁变得疏松,细胞之间的结合力减弱,细胞与细胞发生分离从而导致果皮开裂,而1-MCP和KMnO₄在一定程度上起了相反的作用,特别是1-MCP。乙烯促进果肉软化从而导致开裂的原因,可能是促进了淀粉、原果胶的降解,PG、Cx活性的提高,共同导致了果实支撑结构的破坏,导致果实变软。果肉中淀粉向可溶性糖转化引起的膨压改变,以及果皮细胞壁原果胶降解导致的细胞结构松弛及破坏可致使果皮开裂;而1-MCP和高锰酸钾一定程度延缓果实开裂和软化。本研究初步揭示了不同处理下AP番荔枝正造果后熟过程中多糖代谢与果实软化、开裂的关系,为深入解析番荔枝裂果机理奠定基础。

参考文献(References)

- Cao JK, Jiang WB, Zhao YM (2007). The Experiment Guide of Fruits and Vegetables Postharvest Physiology and Biochemistry. Beijing: Chinese Light Industry Press, 84–87 (in Chinese) [曹建康, 姜微波, 赵玉梅(2007). 果蔬采后生理生化实验指导. 北京: 中国轻工业出版社, 84–87]
- Chen JJ, Duang YJ, Mo YW, et al (2015). Gene expression analysis related to cell wall metabolism in pericarp between custard apple cultivars susceptible and resistant to fruit cracking. J Fruit Sci, 32 (5): 769–776 (in Chinese with abstract) [陈晶晶, 段雅婕, 莫亿伟等(2015). 裂果性不同的番荔枝品种果皮中细胞壁代谢相关基因的表达分析. 果树学报, 32 (5): 769–776]
- Chen JY, Zeng R, Li P (2003). The study on physio-biochemical change of kiwifruit fruit *Actinidia deliciosa* of during cold storage. Food Sci, 24 (2): 138–141 (in Chinese with English abstract) [陈金印, 曾荣, 李平(2003). 猕猴桃果实冷藏过程中生理生化变化. 食品科学, 24 (2): 138–141]
- Chen JZ, Wu L, Peng LZ (1999). Effects of pectins and pectinesterase activity on creasingfruit formation in orange (*Citrus sinensis* Osbeck). South China Fruits, 28 (3): 8 (in Chinese with English abstract) [陈杰忠, 伍玲, 彭良志(1999). 柑桔果皮果胶甲酯酶活性与裂果关系的研究. 中国南方果树, 28 (3): 8]
- Cheng JS, Seng HL, Sun XB, et al (2008). Research process in enzymes related to ripening and softening of fruit. Northern Hortic, (1): 49–52 (in Chinese with English abstract) [程杰山, 沈火林, 孙秀波等(2008). 果实成熟软化过程中主要相关酶作用的研究进展. 北方园艺, (1): 49–52]
- Deng J (2013). Effect on storage quality of grapefruit (*Citrus paradise* Macf.) fruit with pre and post harvest treatments (dissertation). Beijing: Beijing Forestry University (in Chinese with English abstract) [邓佳(2013). 采前采后处理对葡萄柚果实贮藏品质影响(学位论文). 北京: 北京林业大学]
- Hagerman AE, Austin PJ (1986). Continuous spectrophotometric assay for plant pectin methylesterase. J Agr Food Chem, (34): 440–444
- He HJ, Bai M, Tong PP, et al (2018). CELLULASE 6 and MANNANASE 7 affect cell differentiation and silique dehiscence. Plant Physiol, 176 (3): 2186–2201
- Hu LS, Dong XY, Li PH, et al (2007). Changes in cell wall components and degrading enzyme activity and their relation to hardness in fruits of peach (*Prunus persica* L.) before and after ripening. Plant Physiol Commun, 43 (5): 837–841 (in Chinese with English abstract) [胡留申, 董晓颖, 李培环等(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]
- Itai A, Tanahaghi T (2008). Inhibition of sucrose loss during cold storage in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) by 1-MCP. Postharvest Biol Tec, 48 (3): 355–363
- Jomngam P, Chen KY, Chumpookam J, et al (2017). Effect of ripening and storage temperatures on quality of atemoya (*Annona cherimola* Mill. × *A. squamosa* L.) fruit. Acta Hort, 1166: 161–166
- Khadivi-Khub (2015). Physiological and genetic factors influencing fruit cracking. Acta Physiol Plant, 37: 1718
- Li CY, Zhang GL, Zeng XL, et al (2006). The relationship between the activity of enzyme in cell wall and sweet orange [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] fruit texture. J Sichuan Agric Univ, 24 (1): 73–76 (in Chinese with English abstract) [李春燕, 张光伦, 曾秀丽等(2006). 细胞壁酶活性与甜橙果实质地的相关性研究. 四川农业大学学报, 24 (1): 73–76]
- Li JG, Huang XM, Hung HB (2003). Comparison of the activities of enzymes related to cell wall metabolism in pericarp between litchi cultivars susceptible and resistant to

- fruit cracking. *J Plant Physiol Mol Biol*, 29 (2): 141–146 (in Chinese with English abstract) [李建国, 黄旭明, 黄辉白(2003). 裂果易发性不同的荔枝品种果皮中细胞壁代谢酶活性的比较. *植物生理与分子生物学报*, 29 (2): 141–146]
- Li M, Zhang YM, Zhang ZY, et al (2013). Hypersensitive ethylene signaling and *ZMdPGI* expression lead to fruit softening and dehiscence. *PLoS One*, 8 (3): e58745
- Li W, Chen WX (2004). Advances in the studies on postharvest physiology and fresh-keeping methods of *Annona* fruit. *J Trop Subtrop Bot*, 12 (3): 280–284 (in Chinese with English abstract) [李雯, 陈维信(2004). 番荔枝果实采后生理与保鲜技术研究进展. *热带亚热带植物学报*, 12 (3): 280–284]
- Miao HX, Jin ZQ, Liu WX, et al (2013). Changes in pulp firmness and starch metabolism of postharvest banana fruit. *Chin Agric Sci Bull*, 29 (28): 124–128 (in Chinese with English abstract) [苗红霞, 金志强, 刘伟鑫等(2013). 香蕉采后果肉硬度与淀粉代谢变化. *中国农学通报*, 29 (28): 124–128]
- Miao HX, Sun PG, Zhang KX (2016). Starch degradation and ethylene release content of *Musa acuminata* L. AAA Cavendish ‘Formosana’ fruits stored at different temperatures. *Chin Agric Sci Bull*, 32 (7): 85–90 (in Chinese with English abstract) [苗红霞, 孙佩光, 张凯星等(2016). 不同贮藏温度下‘宝岛蕉’果实淀粉降解与乙烯释放量关系初探. *中国农学通报*, 32 (7): 85–90]
- Mo YW, Gong D, Liang GB, Li WC (2008). Enhanced preservation effects of sugar apple fruits by salicylic acid treatment post-harvest storage. *J Sci Food Agr*, 88: 2693–2699
- Qi XD, Wei JM (2015). Effect of cold storage and ethylene regulation on sugar metabolism and its key gene expression in post-harvest apple fruit. *Modern Food Sci Technol*, 31 (7): 137–145 (in Chinese with English abstract) [齐秀东, 魏建梅(2015). 冷藏和乙烯处理对采后苹果果实糖代谢及关键基因表达的调控. *现代食品科技*, 31 (7): 137–145]
- Tang ZC (1999). *The Experiment Guide of Modern Plant Physiology*. Beijing: Science Press, 330–348 (in Chinese) [汤章城(1999). *现代植物实验指南*. 北京: 科学出版社, 330–348]
- Wang K, Shao XF, Gong YF, et al (2013). The metabolism of soluble carbohydrates related to chilling injury in peach fruit exposed to cold stress. *Postharvest Biol Tec*, 86: 53–61
- Yang WH, Zeng H, Zou MH, et al (2011). An overview of the roles of cell wall modification in fruit pericarp cracking. *Chin J Trop Crops*, 32 (10): 1995–1999 (in Chinese with English abstract) [杨为海, 曾辉, 邹明宏等(2011). 果发生与果皮细胞壁修饰的关系研究进展. *热带作物学报*, 32 (10): 1995–1999]

Effects of anti-ethylene treatments on polysaccharide metabolism, fruit softening and their relationship with postharvest cracking of atemoya fruit

LI Wei-Ming^{1,2}, CHEN Jing-Jing^{1,2,*}, DUAN Ya-Jie^{1,2}, HU Hui-Gang^{1,2}, PANG Zhen-Cai^{1,2}, HU Yu-Lin^{1,2}

¹Key Laboratory of Tropical Fruit Biology, Ministry of Agriculture, Institute of South Subtropical Crop Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Science, Zhanjiang, Guangdong 524091, China

²National Field Genebank for Tropical Fruit, Institute of South Subtropical Crop Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Science, Zhanjiang, Guangdong 524091, China

Abstract: This research explored the relationship among polysaccharide metabolism and fruit softening and postharvest cracking of AP atemoya fruits (*Annona atemoya*). AP fruits on-season were chosen as materials and the postharvest fruits were treated with ethephon, 1-MCP and KMnO₄. The contents of starch, soluble sugar, sucrose in the pulp, pectin in the pericarp and pulp were determined, meanwhile cell wall metabolism related enzymes (PG, CX, PME) activities were analyzed. The results indicated in the pericarp ethylene treatment inhibited the synthesis of protopectin, accelerated the transformation of protopectin to soluble pectin, improved PG, CX and PME activities, and caused the pericarp cracking. In the pulp, ethylene promoted starch transforming into the soluble sugars, accelerated protopectin degradation, improved PG and CX activities, and accelerated fruit softening and cracking. While 1-MCP and KMnO₄ delayed fruit cracking and softening to some extent, they played the opposite role with ethylene, the effect of 1-MCP was slightly greater than KMnO₄. The synthesis and degradation of protopectin in the pericarp coexisted during storage. The most relevant to pericarp cracking were the protopectin contents and the PG, Cx, PME activities in the pericarp and the mainly related to pulp softening and cracking were the degradation of starch and protopectin, PG and Cx activities in the pulp. PG and Cx participated not only fruit softening, but also fruit cracking, while PME may be closely related with cracking in the pericarp.

Key words: *Annona atemoya* (atemoya); fruit cracking; softening; starch; pectin

Received 2018-04-10 Accepted 2018-11-02

This work was supported by the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund for Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences (1630062016003) and Agricultural Wild Plant Resources Protection Project of Ministry of Agricultural and Rural Affairs (1251416305010).

*Corresponding author (chenjingjing0704@163.com).