

不同采收成熟度杧果对乙烯和贮藏温度的生理响应

汤红¹, 马冀恒¹, 邢益发², 邵远志³, 李雯^{1,*}

¹海南大学园艺学院, 海口570228

²海南景乾果业有限公司, 海南陵水572400

³海南大学生命科学与药学院, 海口570228

摘要: 以绿熟(花后100 d)和红熟(花后120 d)两种成熟度的‘贵妃’杧果为试材, 研究乙烯处理(0.4和0.8 g·L⁻¹乙烯利)和贮藏温度(25和12℃)对果实的生理影响。结果表明: 两种温度下, 红熟杧果采后品质快速变化, 表现在更高的色度a*、TSS含量、MDA含量和细胞膜透性, 更低的硬度值、维生素C含量和可滴定酸(TA)含量。低温贮藏通过抑制果实呼吸速率和乙烯的释放, 抑制MDA积累和细胞膜透性增加, 延长果实的贮藏期。两种贮藏温度下, 不同浓度乙烯利处理均能显著提高绿熟杧果的营养品质(TSS、维生素C), 降低果实TA含量, 促进乙烯释放, 提高呼吸速率, 加速果实软化, 且浓度越高促进作用越显著。但是0.4 g·L⁻¹乙烯利处理能够显著促进果实转色, 而0.8 g·L⁻¹乙烯利处理抑制果皮转色, 这值得进一步研究。该研究在实践上可为改善杧果催熟品质提供参考, 理论上为进一步研究外施乙烯与果皮转色的关系提供思路。

关键词: 乙烯利催熟; 采收成熟度; 贮藏温度; 杧果品质

杧果富含酚类化合物、膳食纤维和维生素等多种营养物质, 素有“热带果王”之称(Anusuya等2016)。海南省是我国最大的杧果种植基地, 截至2017年, 海南杧果种植面积已超过4万公顷。‘贵妃’杧果是海南主栽品种之一, 该品种长势健壮, 年年结果。果实成熟后色泽艳丽诱人, 汁多味甜, 可食率极高。“树上熟”杧果即红熟‘贵妃’杧果, 因其外观艳丽、风味浓郁、香甜多汁而备受种植者和消费者的喜爱, 被认为是海南的特色水果, 并被致力打造为知名地域品牌(黄良团2017)。但是, “树上熟”杧果由于采收时成熟度高、软化后熟速度极快, 在贮藏运输过程中极易发生腐烂、软化, 采后损失严重。比较研究“树上熟”杧果和乙烯利催熟杧果在果实风味及贮藏品质上的差异, 研究不同采收成熟度的杧果果实对乙烯浓度及贮藏温度的生理反应, 可以为生产上确定合理的采收成熟度, 采用科学的催熟技术以改善风味品质、延长贮运期提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2019年3月于海南省陵水县万丰杧果基地采收‘贵妃’杧果(*Mangifera indica* L. ‘Hong Guifei’)果实, 成熟度为绿熟(花后100 d)和红熟(花后120 d)两

种成熟度, 果实采收后立即运回海南大学采后科学实验室。

1.2 采后处理

挑选出无机械损伤、无病虫害、大小一致的果实, 剪留0.5 cm果柄, 用0.05%次氯酸钠清洗、晾干备用。实验设置4个处理, 处理I: 对照, 绿熟杧果; 处理II: 红熟杧果; 处理III: 绿熟杧果用0.4 g·L⁻¹乙烯利催熟; 处理IV: 绿熟杧果用0.8 g·L⁻¹乙烯利催熟。

催熟处理: 分别用0.4和0.8 g·L⁻¹乙烯利水溶液浸泡果实5 min后, 25℃密闭催熟24 h。

每个处理均分为2份, 分别贮藏于25℃和12℃恒温恒湿培养箱, 相对湿度为90%, 每份果实约100个。贮藏期间, 25℃贮藏果实每隔2 d取样测定一次, 12℃贮藏果实前3天(0、1、2 d)每天取样测定, 之后每隔2 d取样测定一次; 实验均以3个果实为1次重复, 每个处理重复3次。

1.2 试验内容与方法

1.2.1 乙烯释放速率

果实的乙烯释放速率参照Reig等(2016)测定,

收稿 2019-09-03 修定 2020-01-21

资助 国家自然科学基金(31660586)和海南大学园艺学科建设项目。

* 通讯作者(liwen9-210@163.com)。

将果实放入乐扣1.9 L密封罐中, 室温密闭静置2 h后抽取混合气体1 mL上机测试, 单位为 $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

测试色谱条件: Thermo Scientific Trace 1300型气相色谱仪, 安捷伦气密性进样针, 色谱柱为TG-5MS (毛细管柱) $30.0\text{ m}\times 0.32\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$; 进样口 250°C , 柱温 60°C , 氢离子火焰检测器(FID)温度 300°C ; 载气 N_2 流量 $10\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 燃气 H_2 流量 $40\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 空气流量 $400\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 一次测定2.5 min, 进样体积1 mL。

1.2.2 呼吸速率

果实密封条件同1.2.1, 使用Mocon (美国) Dn-sensor CheckPoint3型便携顶空分析仪测定, 进样体积5 mL, 采样时间9 s, O_2/CO_2 分辨率0.1%。呼吸速率参照Penta等(2019)的方法计算, 单位为 $\text{mL}(\text{CO}_2)\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

1.2.3 果实硬度

使用FHM-1型(日产, 日本)果实硬度计测定, 测头直径5 mm, 长10 mm, 测定果实中部阴面、阳面各两个点, 其平均值表示该果实的硬度, 单位为N。

1.2.4 果实色泽

使用KONICA MINOLTA公司的CM-700型色度计测定果实中部阴面、阳面各2个点, 记录 a^* 值并计算其平均值。

1.2.5 细胞膜透性

参照高豪杰等(2013)的方法, 削取0.1 cm厚的果皮, 称取2.0 g, 放进具塞试管中, 用蒸馏水洗3遍, 加20 mL蒸馏水于室温下放置1 h后用DDS-11A型电导率仪测定浸泡液电导值 h_0 , 加热煮沸后再次测定电导值 h , 以相对电导率(h_0/h)代表果皮细胞膜透性。

1.2.6 丙二醛(malondialdehyde, MDA)

采用TBA比色法测定(曹建康2011)。

1.2.7 果实内在品质的测定

果实可溶性固形物(total soluble solid, TSS)用ATAGO PAL-1型(日产, 日本)手持折光仪测定; 果实可滴定酸(titratable acidity, TA)以及抗坏血酸(维生素C, vitamin C)参照曹建康等(2011)的方法测定, 以苹果酸计算; 计算每个重复的TSS/TA(固酸比)。

1.3 数据处理与统计分析

使用WPS 2019 V1.0进行数据整理, 使用SPSS

Statistics V20.0进行数据统计分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 实验结果

2.1 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果呼吸速率的影响

25°C 贮藏时果实的呼吸速率均先上升后下降(图1-A)。绿熟芒果都产生了呼吸跃变高峰, 其跃变时间及峰值分别为: 处理I, 8 d、 $105.40\text{ mL}(\text{CO}_2)\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; 处理III, 4 d、 $137.17\text{ mL}(\text{CO}_2)\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; 处理IV, 6 d、 $138.04\text{ mL}(\text{CO}_2)\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。处理III和IV的峰值远高于处理I, 并且跃变时间也比处理I早, 说明乙烯处理增强了果实自身的呼吸强度。红熟芒果(II)没有产生呼吸跃变, 2 d后呼吸速率一直下降。

分析 12°C 贮藏时4个处理间果实的呼吸速率变化可知(图1-B), 芒果在低温下呼吸速率迅速下降, 贮藏1 d时各处理的呼吸速率分别为 40.93 、 54.40 、 39.09 和 $49.33\text{ mL}(\text{CO}_2)\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。1 d后, 随贮藏时间的增加各处理的呼吸速率均呈现先上升后下降的趋势, 处理III和IV 8 d时呼吸速率快速上升, 在10 d出现高峰, 峰值分别为 77.68 和 $88.37\text{ mL}(\text{CO}_2)\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 两者差异显著($P<0.05$)。在10 d前, 处理I的呼吸速率最低, 且于14 d时出现呼吸跃变高峰[$73.22\text{ mL}(\text{CO}_2)\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$]; 处理II的呼吸速率变化缓慢, 在10 d前显著高于处理I。

可见低温抑制了果实的呼吸速率, 延缓了呼吸跃变的时间。同时, 不论是在低温还是高温条件下, 催熟处理都能够显著提高果实的呼吸速率, 使果实呼吸跃变时间提前。

2.2 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果乙烯释放速率的影响

乙烯释放速率是衡量果实成熟衰老的重要指标。 25°C 条件下(图2-A), 催熟处理的两组芒果(III、IV)在2 d时出现乙烯释放高峰, 高峰值分别为 80.78 和 $93.41\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 绿熟芒果(I) 6 d时出现乙烯释放高峰($51.34\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), 处理间差异显著($P<0.05$, 下同)。红熟芒果(II)在贮藏期间未出现乙烯释放高峰, 且乙烯释放速率逐渐下降。

如图2-B所示, 12°C 贮藏条件下, 红熟芒果(II)的乙烯释放速率变化平稳, 未出现明显的乙烯高

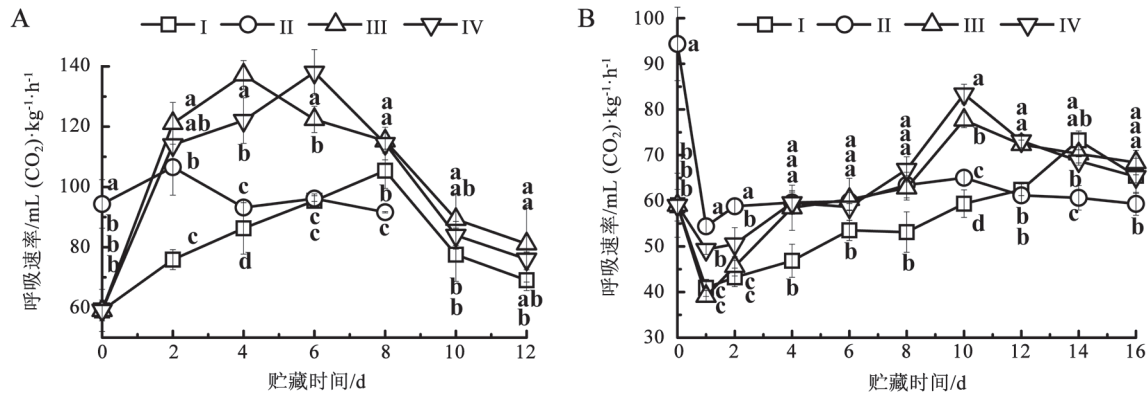


图1 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果果实呼吸速率的影响

Fig.1 Effects of ethylene and storage temperature on respiratory rate of mango fruits at different harvest maturity

A: 贮藏温度为25°C; B: 贮藏温度为12°C, 图2、4、6同此; 不同小写字母表示同一时间内不同处理间有显著差异($P < 0.05$), 差异不显著则不标注, 下同。

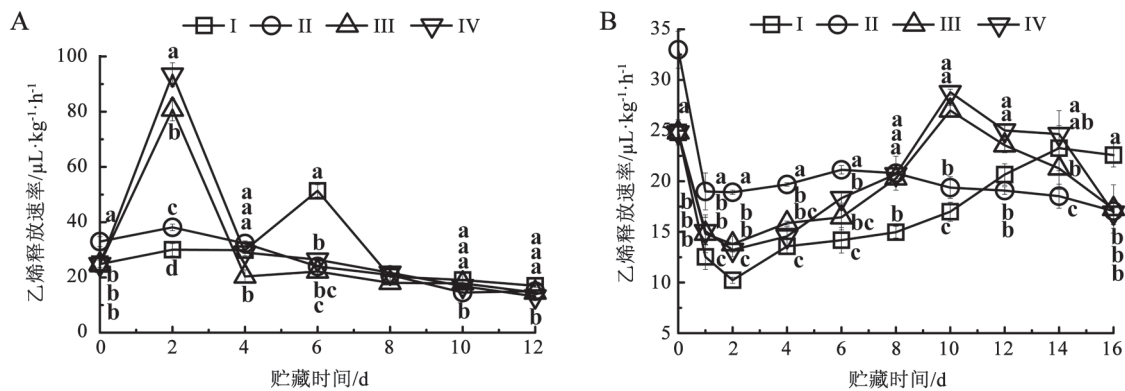


图2 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果果实乙烯释放量的影响

Fig.2 Effects of ethylene and storage temperature on ethylene release rate of mango fruits at different harvest maturity

峰。处理I、III、IV的乙烯释放速率均呈现单峰型变化, 且处理III、IV均在10 d出现乙烯高峰, 两者差异不显著, 处理I则在14 d出现乙烯高峰, 峰值为 $23.26 \mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 远远低于处理III和处理IV。

因此, 在低温和常温条件下乙烯利处理都促进了芒果乙烯的释放, 且乙烯利浓度越高, 乙烯释放速率越大; 低温贮藏则显著抑制果实乙烯的合成与释放, 延缓了果实的成熟与衰老。

2.3 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果色泽发育的影响

色度 a^* 由负到正表示色泽从绿到红的变化。25°C下(图3-A和B), 处理II的 a^* 上升最快, 其次是处理III, 处理I、IV两组的 a^* 显著低于处理II、

III。处理I、II、III和IV果皮开始转色的时间分别是12 d、2 d、8 d、12 d(图3-B), 说明 $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的乙烯利处理显著加快了芒果果实的转色, 而 $0.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙烯利处理对果皮转色无促进作用。在12°C下(图3-C和D), 8 d前红熟芒果(II)的果皮 a^* 上升最快, 且于8 d完全转色, 其次是处理III ($0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的乙烯利) 于16 d完全转色, 处理I和处理IV的果皮 a^* 最低, 且两者无差异显著性。

结果表明, 不论在低温还是常温条件下, 红熟芒果果皮转色速度最快; $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙烯利处理能更好地促进芒果果皮转色, 改善果实外观品质。而 $0.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙烯利处理对促进芒果果实转色的效应不显著, 在低温下不促进果实转色。

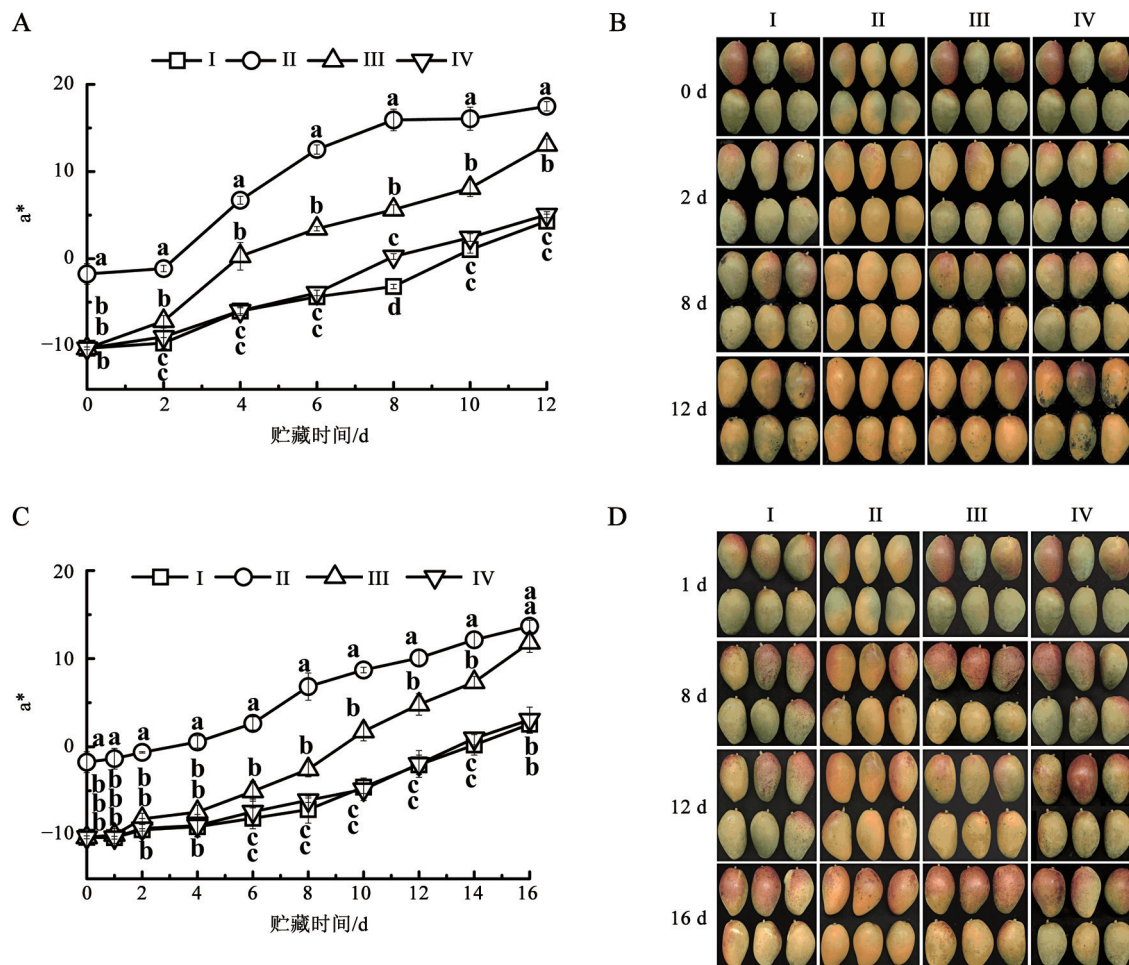


图3 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的杧果果实色泽发育的影响

Fig.3 Effects of ethylene and storage temperature on color development of mango fruits with different harvest maturity
A和B: 贮藏温度为25°C时杧果果实色泽a*变化(A)和果实外观(B); C和D: 贮藏温度为12°C时杧果果实色泽a*变化(C)和果实外观(D)。

2.4 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的杧果果实软化的影响

硬度是反映果实软化衰老程度的基础指标。在两种贮藏温度下, 各处理果实的硬度均呈现不断下降的趋势(图4), 但是25°C贮藏时果实硬度6 d前迅速下降, 而12°C贮藏时硬度变化趋势相反。两种温度下, 绿熟杧果的硬度下降最慢, 红熟杧果的硬度最低, 两个催熟处理(III和IV)的果实硬度下降速率显著高于处理I、II, 但处理III和IV两者硬度差异不显著。

25°C下, 处理I、II、III、IV的硬度下降为0的时间分别是10 d、6 d、6 d、6 d; 6 d时催熟处理的果实硬度损失率约是未催熟果实的2倍。12°C下,

处理I贮藏至16 d仍能测出果实硬度(2.06 N), 处理II、III、IV的硬度下降为0的时间分别为14 d、14 d、12 d, 各处理在6 d时的硬度损失率分别为21.38%、36.63%、60.99%、59.04%, 催熟处理与未催熟处理间差异显著。

结果表明, 红熟杧果的硬度显著低于绿熟杧果; 贮藏期间催熟处理的果实硬度下降最快, 损失率最高, 但不同浓度之间无显著差异性; 低温条件能显著抑制果实硬度下降, 延缓果实的软化。

2.5 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的杧果TSS和TA含量的影响

贮藏期间杧果果实的糖含量总体呈现先上升后下降的趋势(图5-A和B)。在25°C贮藏下(图5-A),

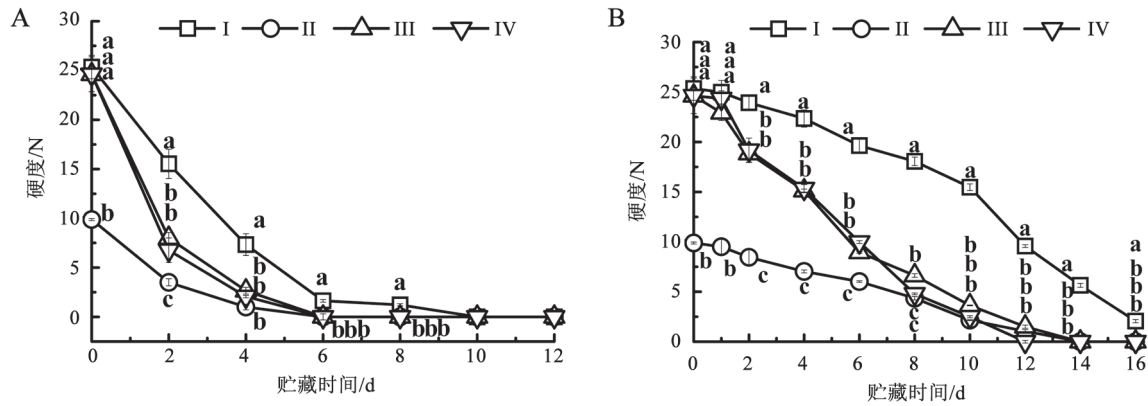


图4 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的杧果果实硬度的影响

Fig.4 Effects of ethylene and storage temperature on firmness of mango fruits with different harvest maturity

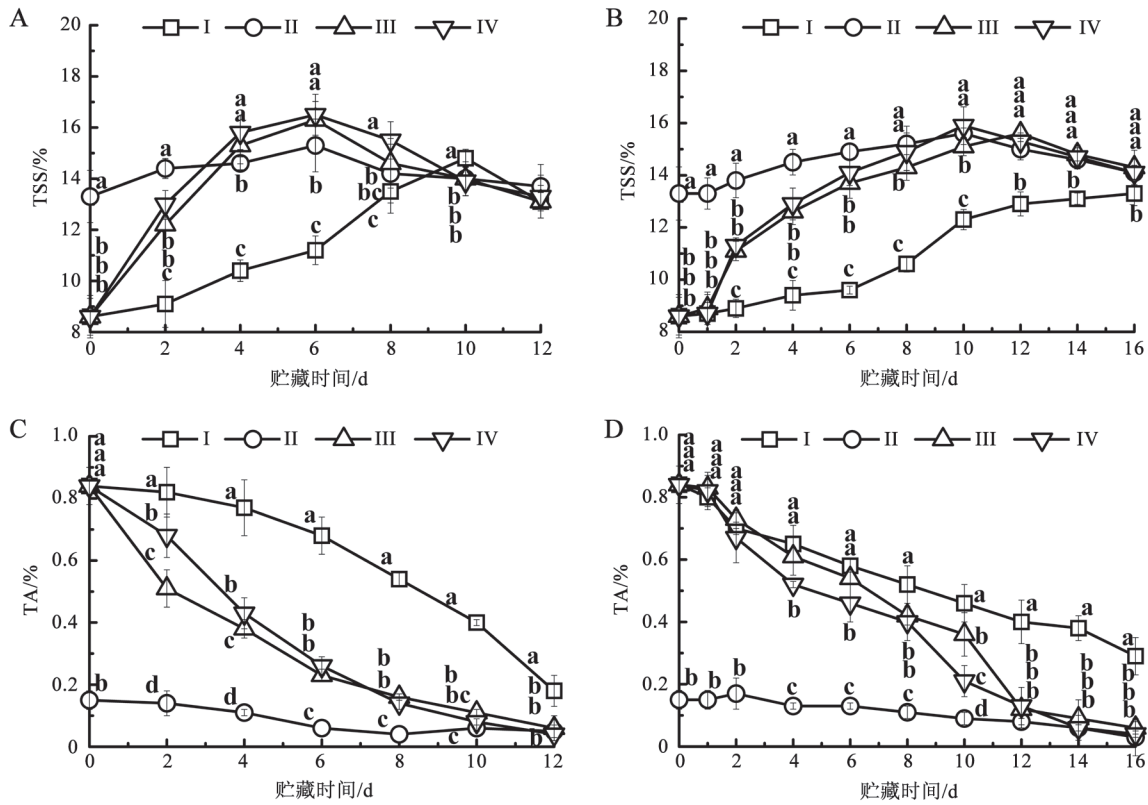


图5 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的杧果果实TSS和TA的影响

Fig.5 Effects of ethylene and storage temperature on TSS and TA of mango fruits with different harvest maturity

A和B: 25°C (A)和12°C (B)贮藏时杧果果实TSS变化; C和D: 25°C (C)和12°C (D)贮藏时杧果果实TA变化。

各处理的TSS含量分别在10 d (14.8%)、2 d (15.3%)、6 d (16.3%)和6 d (16.5%)达到最高值; 总体上两组催熟处理的果实TSS含量高于未催熟组。12°C贮藏下处理I、II、III、IV的TSS含量分别在16 d

(13.3%)、10 d (15.6%)、12 d (15.6%)、10 d (15.9%)达到最高值, 处理IV的TSS积累较处理III快速。催熟处理组(III、IV)的TSS积累较处理I迅速且含量较高, 可见乙烯催熟能够加速果实TSS积

累并最终提高果实含糖量。对比两种温度下的TSS变化发现低成熟度采收果实TSS积累缓慢,同时低温抑制了芒果TSS的积累。

分析25°C和12°C贮藏条件下各处理间的TA含量变化发现(5-C和D),总体上,贮藏期间芒果果实的TA含量不断降低,且处理I果实TA含量最高、处理II的TA含量最低,处理III和处理IV居中。25°C下贮藏至10 d时,处理I、II、III、IV的TA含量与0 d相比分别降低了52.38%、60.0%、86.90%、90.48%,说明成熟度越高果实有机酸分解越快,且乙烯利催熟处理可以有效促进这一进程。12°C下(图5-D),处理III的TA含量高于处理IV,且在10 d时表现出差异显著性。

当TSS含量最高时,25°C下各处理的TSS/TA的值依次为0.21、1.09、0.71、0.63;12°C下各处理的TSS/TA的值依次为0.46、1.73、1.30、0.76。说明低温延缓了果实的TSS积累和TA的降解;乙烯利催熟能够显著提高果实的固酸比,其中0.4 g·L⁻¹乙烯利催熟能够使果实保持较高的固酸比。

2.6 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果维生素C含量的影响

在25°C贮藏下,各处理组的维生素C含量均在4 d前迅速上升,随后迅速下降。各处理的最高维生素C含量分别为处理I 2.56 g·kg⁻¹ (FW) (4 d)、处理II 1.84 g·kg⁻¹ (FW) (2 d)、处理III 3.00 g·kg⁻¹ (FW) (2 d)、处理IV 2.79 g·kg⁻¹ (FW) (2 d),处理III的维生素C含量最高,处理II最低,且0.4 g·L⁻¹乙烯

利催熟的果实维生素C含量高于0.8 g·L⁻¹乙烯利催熟的果实。12°C条件下(图6-B),各处理的最高维生素C含量依次为处理I 2.92 g·kg⁻¹ (FW) (8 d)、处理II 1.60 g·kg⁻¹ (FW) (6 d)、处理III 3.17 g·kg⁻¹ (FW) (8 d)、处理IV 3.14 g·kg⁻¹ (FW) (6 d),处理II的维生素C含量低于25°C下最高值,而处理II、III、IV的维生素C含量均高于25°C下最高值。在两个温度下,绿熟芒果的维生素C含量均高于比红熟芒果,并且在催熟后能够保持较高的维生素C含量;除了处理II,其他处理在12°C下的维生素C含量均高于25°C,并且峰值出现得较晚。

以上表明,低温较好地保持了果实的维生素C含量,高成熟度的果实维生素C在贮藏过程中分解速率快于低成熟度果实;外施乙烯显著促进了贮藏期间维生素C的合成与降解,提高了果实总维生素C含量。

2.7 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果细胞膜透性和MDA含量的影响

随着贮藏时间的延长,果实细胞膜透性逐渐增大,MDA含量逐渐升高。25°C贮藏时(图7-A)处理II的细胞膜透性较平稳地增加;处理I、III、IV的细胞膜透性在4 d前变化缓慢,之后开始迅速增加,且增加的幅度处理IV>III>I;催熟处理III、IV的细胞膜透性分别在6 d和8 d后超过处理II,而处理I的细胞膜透性始终在最低水平。12°C贮藏时(图7-B)处理II在6 d前细胞膜透性增加较快,6 d后变化速度减缓,而处理I、III、IV的细胞膜透性变化趋势与25°C贮藏时类似,4 d后增加幅度变大。

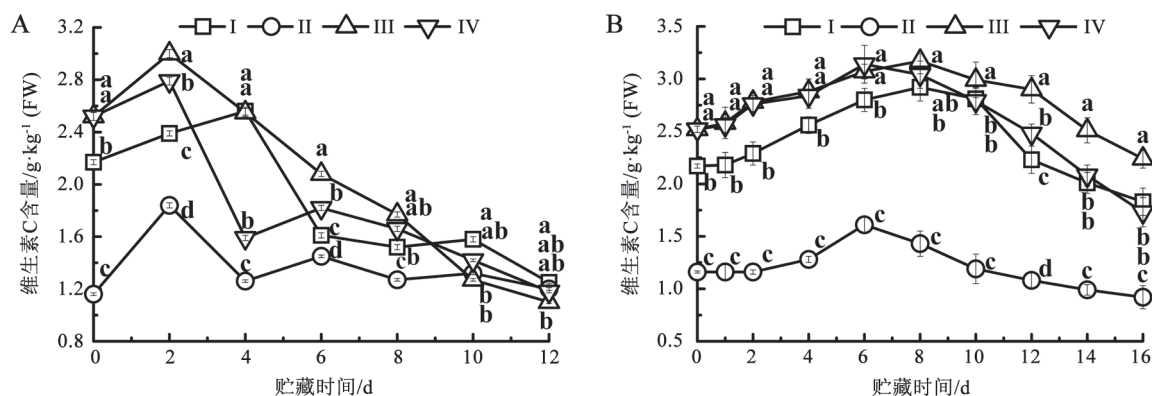


图6 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果果实维生素C含量的影响

Fig.6 Effects of ethylene and storage temperature on vitamin C of mango fruits with different harvest maturity

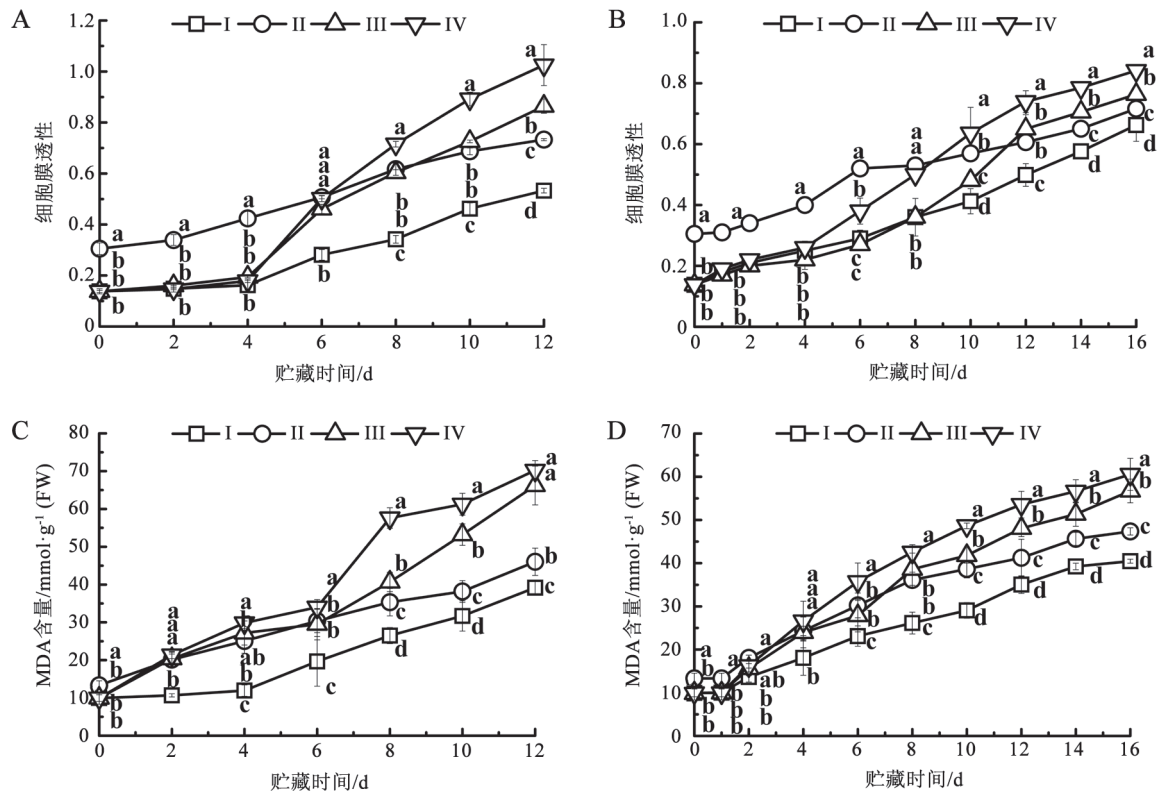


图7 乙烯和贮藏温度对不同采收成熟度的芒果果实细胞膜透性和MDA含量的影响

Fig.7 Effects of ethylene and storage temperature on membrane permeability and MDA of mango fruits with different harvest maturity

A和B: 25°C (A)和12°C (B)贮藏时芒果细胞膜透性变化; C和D: 25°C (C)和12°C (D)贮藏时芒果MDA含量变化。

处理IV的细胞膜透性始终快速上升并在8 d时超过处理II, 之后保持最高; 处理III的细胞膜透性在8 d前与对照无显著差异, 8 d后开始迅速上升, 12 d时超过处理II, 但两者之间无显著差异。同时贮藏至12 d时, 25°C贮藏时各处理细胞膜透性均比12°C贮藏时各处理的大。

果实的MDA含量变化与细胞膜透性的变化趋势类似(图7-C和D), 25°C贮藏下处理III、IV的MDA含量在贮藏期间迅速升高, 并且同一时间下MDA含量显著高于对照。贮藏至12 d时, 处理III、IV的MDA含量分别比对照高出27.03和31.03 mmol·g⁻¹ (FW), 各处理间差异显著。12°C贮藏下, 处理IV的MDA含量在4 d超过处理II并处于最高位置, 各处理的MDA含量从1 d贮藏至16 d依次上升了30.46、34.02、46.7和50.59 mmol·g⁻¹ (FW), 处理III、IV的MDA含量增加幅度远大于处理I、II。

综上, MDA含量变化较细胞膜透性快, 可见果实MDA的积累先于果实细胞膜透性的升高。两种温度下, 高采收成熟度的果实细胞膜透性和MDA的含量均高于低采收成熟度果实; 且贮藏结束时处理IV的细胞膜透性和MDA含量均最高, 说明乙烯利处理显著加速了果实的成熟衰老, 且浓度越高其加速成熟衰老的效应越显著。

3 讨论

首先, 芒果的采收成熟度直接影响果实的后熟品质和采后贮运方式。试验中, 红熟芒果采后果实固酸比、维生素C含量偏低而细胞膜透性和MDA含量偏高, 贮藏期间果实硬度较低且软化迅速, 常温下4 d果实完熟并迅速失去商品价值。绿熟芒果果实采收时果实TSS含量较低, TA含量较高, 但维生素C含量始终高于红熟芒果。并且只有

绿熟采收的杧果在贮藏期间出现了呼吸高峰和乙烯释放高峰。这与Lalel等(2003)研究结果一致:只有硬-绿熟阶段杧果的呼吸速率以及乙烯变化呈现典型的呼吸跃变型果实的特征,并且在硬-绿熟期采收的果实酸含量较高、总糖和还原糖含量较低。生产中为了能够远距离运输常采收绿熟或更低成熟度的杧果,但是不经过处理的杧果果实转色不均匀,后熟品质参差不齐。如果采收成熟度过低,果实后熟时果皮难以完全转色并且风味不佳,甚至催熟也难以改善(Sivakumar等2011; Rahman等2016)。而对于“树上熟”杧果,采收后果实熟后过快,货架期短,远距离销售风险大。采用怎样的保鲜处理和贮运方式保证“树上熟”杧果的良好发展还需进一步探索。

其次,贮藏温度是影响果实贮藏期的关键因素。试验中,25℃下果实呼吸速率和乙烯释放速率都很高,果实硬度、TA含量迅速降低,细胞膜透性和MDA含量迅速升高,货架期十分短暂。张冉冉等(2015)发现果实硬度与可溶性糖和蔗糖含量呈极显著负相关。在12℃下,果实的呼吸速率和乙烯释放速率显著低于常温贮藏的果实,延缓了果实的生理反应,使果实品质得以保持。前人研究发现,果实采后生理反应和品质受贮藏温度的影响:随着贮藏温度的升高,果实呼吸速率增加,最终会导致果实营养成分的变化和后熟品质的下降(Fawole和Opara 2013)。此外,温度过高过低都会抑制乙烯发挥作用。适当的高温能促进果实乙烯释放,诱导细胞壁水解酶活化,使果肉的软化优先于果皮的转色(Watada 1986),但温度过高会加速果实中原果胶合成而导致果实变硬(李伟明等2018)。低温则主要通过抑制呼吸速率和乙烯的产生来延缓果实的新陈代谢(Patel等2016)。

试验还研究了不同浓度乙烯利处理对‘贵妃’杧果贮藏品质的影响及采后生理反应。与对照(绿熟杧果)相比,0.4 g·L⁻¹乙烯利催熟提高了果实的呼吸强度,促进果实乙烯的合成与释放,改善了果实的色泽,使催熟果实色泽鲜亮、均匀,提高了果实维生素C等营养品质的含量,从而提高了杧果的熟化速率和商品品质。0.8 g·L⁻¹乙烯利催熟虽然加速了杧果的熟化,但催熟后的杧果果肉快速软化腐

烂,果实转色不均匀,迅速丧失商品价值。李伟明等(2018)发现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,提高果肉中果胶酶和纤维素酶活性,加快果肉的软化和开裂。Cheng等(2016)发现乙烯受体(*PsERS1*和*PsETR1*)和乙烯反应因子基因(*PsERFs*)的表达模式与花青素生物合成途径中的大多数结构基因(*PsPAL*、*PsCHS*、*PsCHI*)呈正相关,说明乙烯信号通路在果实采后花青素生物合成中起重要作用;并且在许多研究中(Jiang和Joyce 2003; Ma等2015; Alos等2019)提到外施乙烯通过诱导植物激素的合成,促进叶绿素降解,激活花青素、类胡萝卜素合成相关酶活性来促进果实的转色。但是0.8 g·L⁻¹乙烯利催熟的杧果转色速率与对照无显著性差异,且色泽饱满度低于0.4 g·L⁻¹处理,这表明果实的催熟品质与乙烯利的作用浓度相关。研究表明,在一定范围内(0.05~0.15 g·L⁻¹)乙烯利浓度越高,杧果熟化越快(Deepa等2016)。过高浓度的乙烯利会使猕猴桃(*Actinidia deliciosa*)、西瓜(*Citrullus lanatus*)等非呼吸跃变型果实快速衰老和过度软化(Hu等2011; 王建军等2012),也会导致香蕉果皮叶绿素降解受阻和果肉糖化,失去商品价值。Du等(2016)研究表明,在高于24℃的温度下外施乙烯催熟香蕉会抑制叶绿素分解和颜色形成,并从蛋白质组学角度解析了外施乙烯和高温影响香蕉果实成熟和衰老的机制。

综上所述,本研究选取的25℃和12℃两个温度,前者模拟货架温度,后者为杧果不受冷害的低温。不同温度下“树上熟”杧果(红熟)的外观色泽、硬度、内在品质及采后生理变化都快于绿熟期采收的杧果,采收后迅速达到最佳使用期。0.4 g·L⁻¹乙烯利处理显著提高了果实的维生素C含量,保持了完熟果实漂亮的外观和良好的内在品质。0.8 g·L⁻¹乙烯利处理虽然促进了果实营养物质的积累,但催熟果实过度软化、腐烂且并未促进果实转色。低温显著延缓了不同成熟度、不同处理果实的生理变化并且维持了果实良好的营养品质。当前工业化水平低,采后贮运加工技术落后仍然是阻碍海南杧果产业发展的主要问题,这使得海南在杧果出口贸易中几乎不占份额(纪铮铮等

2018)。因此, 在传统生产的基础上, 采取更科学的催熟方式并结合低温贮运, 既有利于改善芒果内在品质和外观色泽, 又有利于长期贮运, 对海南芒果产业发展具有一定参考价值。对于“树上熟”芒果, 进一步探索保持果实采后硬度的保鲜技术并结合低温贮运也许能在保持果实良好品质的前提下降低远距离销售的损耗, 促进芒果产业的可持续发展。对于芒果对不同浓度乙烯利处理的色泽转变差异, 有待进一步研究验证其他乙烯类植物生长调节剂是否存在同样现象以及乙烯对果实色泽的调控机理, 为更深入的研究奠定基础。

参考文献(References)

- Alos E, Martinez-Fuentes A, Reig C, et al (2019). Involvement of ethylene in color changes and carotenoid biosynthesis in loquat fruit (*Eriobotrya japonica* Lindl. cv. Algerie). *Postharv Biol Tec*, 149: 129–138
- Anusuya P, Nagaraj J, Janavi GJ, et al (2016). Pre-harvest sprays of hexanal formulation for extending retention and shelf-life of mango (*Mangifera indica* L.) fruits. *Sci Hort*, 211: 231–240
- Cao JK, Jiang WB, Zhao YM (2011). *Guidance for Post-harvest Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables*. Beijing: China Light Industry Press, 156–165 (in Chinese) [曹健康, 姜微波, 赵玉梅 (2011). 果蔬采后生理生化实验指导. 北京: 中国轻工业出版社, 156–165]
- Cheng YD, Liu LQ, Yuan C, et al (2016). Molecular characterization of ethylene-regulated anthocyanin biosynthesis in plums during fruit ripening. *Plant Mol Biol Rep*, 34: 777–785
- Deepa J, Rajkumar P, Rani CI (2016). Effect of ethrel (ethylene) on ripening of mango var *Banganapalli*. *Madras Agric J*, 103 (3): 72–77
- Du LN, Song J, Forney C, et al (2016). Proteome changes in banana fruit peel tissue in response to ethylene and high-temperature treatments. *Hortic Res*, 3: 16012
- Fawole OA, Opara UL (2013). Effects of storage temperature and duration on physiological responses of pomegranate fruit. *Ind Crop Prod*, 47: 300–309
- Gao HJ, Jia ZW, Li W, et al (2013). Response of mango fruits from different maturity stages and varieties to 1-MCP treatment. *Food Sci*, 34 (2): 293–299 (in Chinese with English abstract) [高豪杰, 贾志伟, 李雯等(2013). 不同采收成熟度、不同品种的芒果果实对1-MCP处理的反应. *食品科学*, 34 (2): 293–297]
- Hu QH, Fang Y, Yang YT, et al (2011). Effect of nanocomposite-based packaging on postharvest quality of ethylene-treated kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) during cold storage. *Food Res Int*, 44: 1589–1596
- Huang LT (2017). Cultivation techniques of early-ripening fruits on ‘Guifei’ mango trees. *Trop Agri China*, (6): 56–58 (in Chinese) [黄良团(2017). 贵妃芒果树上熟早果栽培技术. *中国热带农业*, (6): 56–58]
- Ji ZZ, Wei AR, Chen XM (2018). On the current situation and countermeasures of mango industry development in Hainan. *Cooper Econ Tech*, (11): 70–71 (in Chinese) [纪琤琤, 韦安冉, 陈晓明(2018). 浅谈海南芒果产业发展的现状及应对措施. *合作经济与科技*, (11): 70–71]
- Jiang YM, Joyce DC (2003). ABA effects on ethylene production, PAL activity, anthocyanin and phenolic contents of strawberry fruit. *Plant Growth Regul*, 39: 171–174
- Lalel HJD, Singh Z, Tan CC, et al (2003). Maturity stage at harvest affects fruit ripening, quality and biosynthesis of aroma volatile compounds in ‘Kensington Pride’ mango (*Mangifera indica* L.). *J Hort Sci Biotech*, 78 (2): 225–233
- Li WM, Chen JJ, Duan YJ, et al (2018). Effects of anti-ethylene treatments on polysaccharide metabolism, fruit softening and their relationship with postharvest cracking of atemoya fruit. *Plant Physiol J*, 54 (11): 1727–1736 (in Chinese with English abstract) [李伟明, 陈晶晶, 段雅婕等(2018). 番荔枝果实熟过程多糖代谢与果实软化和采后裂果的关系. *植物生理学报*, 54 (11): 1727–1736]
- Ma G, Zhang L, Kato M, 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. *Postharv Biol Tec*, 99: 99–104
- Patel BB, Roy FS, Sutar MJS, et al (2016). Respiration behaviour and heat of respiration of mango (cv. Langdo) under different storage conditions. *Inter J Agric Environ Biotech*, 513: 855–859
- Penta P, Jhon BG, Michael BC (2019). Postharvest UV-C treatment, followed by storage in a continuous low-level ethylene atmosphere, maintains the quality of ‘Kensington Pride’ mango fruit stored at 20°C. *Sci Hort*, 5: 1
- Rahman MM, Moniruzzaman M, Ahmad MR, et al (2016). Maturity stages affect the postharvest quality and shelf-life of fruits of strawberry genotypes growing in subtropical regions. *J Saudi Soci Agric Sci*, 15: 28–37
- Reig C, Martínez FA, Mesejo C, et al (2016). Loquat fruit lacks a ripening-associated autocatalytic rise in ethylene production. *J Plant Growth Regul*, 35: 232–244
- Sivakumar D, Jiang Y, Yahia EM (2011). Maintaining mango (*Mangifera indica* L) fruit quality during the export chain. *Food Res Inter*, 44: 1254–1263
- Wang JJ, Zhou YH, Zeng KF (2012). Effects of ethylene treatment on storage quality of postharvest fruit. *Sci Tech*

- Food Indus, 21 (33): 361–364 (in Chinese with English abstract) [王建军, 周雅涵, 曾凯芳(2012). 乙烯催熟对采后果实贮藏品质的影响. 食品工业科技, 21 (33): 361–364]
- Watada AE (1986). Effects of ethylene on the quality of fruits and vegetables. Food Tech, 5: 82–85
- Zhang RR, Duan YX, Li PH, et al (2015). Changes of soluble sugar contents and sucrose invertase activity and their relation to fruit hardness of peach fruits before and after ripening. Plant Physiol J, 51 (12): 2109–2113 (in Chinese with English abstract) [张冉冉, 段艳欣, 李培环等(2015). 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. 植物生理学报, 51 (12): 2109–2113]

Physiological responses of mango with different harvest maturity to ethylene and storage temperature

TANG Hong¹, MA Jiheng¹, XING Yifa², SHAO Yuanzhi³, LI Wen^{1,*}

¹College of Horticulture, Hainan University, Haikou 570228, China

²Hainan JingQian Fruit Industry Co., Ltd., Lingshui, Hainan 572400, China

³School of Life and Pharmaceutical Sciences, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: Green maturity (100 d after flowering, 100 DAF) and red maturity (120 DAF) mangoes were used as test materials to study the effects of spraying ethephon (0.4 and 0.8 g·L⁻¹) and storage temperatures (25 and 12°C) on mango storage quality and postharvest physiology. The results showed that the postharvest quality of red maturity fruits changed quickly at two storage temperatures, which included higher level of a*, TSS content, MDA content and membrane permeability, and lower level of firmness, vitamin C content and TA content. Storage at low temperature prolonged the storage period of mangoes through inhibited the respiration rate of mangoes and the production of plant ethylene, as well as reduced the accumulation of MDA and the addition of cell membrane permeability. At two temperatures, different concentrations of ethephon treatments significantly enhanced the nutritional quality (TSS and vitamin C), reduced the content of TA, promoted the release of ethylene, improved the respiratory rate and accelerated fruits' softening. Particularly, the higher ethephon concentrations showed more obvious effects. Although 0.4 g·L⁻¹ ethephon treatment made fruit color noticeably developed, 0.8 g·L⁻¹ ethephon treatment inhibited color development. In practice, this study can provide a reference for improving the ripening quality of mangoes, and in theory, it can provide ideas for further study on the relationship between ethylene and the conversion of pericarp color.

Key words: ethephon ripening; harvest maturity; storage temperature; mango quality

Received 2019-09-03 Accepted 2020-01-21

This work was supported by National Natural Science Foundation of China (31660586) and Horticultural Discipline Construction Project of Hainan University.

*Corresponding author (liwen9-210@163.com).