

# 冷激处理对香蕉果实脂氧合酶和膜脂脂肪酸的影响及其与抗冷性的关系

邱佳容<sup>1</sup>, 张良清<sup>1</sup>, 陈纯<sup>1,2</sup>, 林震山<sup>1,2</sup>, 王则金<sup>1,2</sup>

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002) (2. 福建省农副产品保鲜技术开发基地, 福建福州 350002)

**摘要:** 探讨 3 °C 冷激处理对冷藏香蕉果实脂氧合酶活性和膜脂脂肪酸的影响及相关生理机理。用 3 °C 冷激处理香蕉 6 h 后置于 (8±0.5) °C 下贮藏, 以不经过冷激处理直接置于 (8±0.5) °C 的作为对照组。定期测定香蕉果实 (8±0.5) °C 贮藏期间的冷害指数、细胞膜透性、脂氧合酶活性和膜脂脂肪酸组分。贮藏 30 d 后置于 (20±0.5) °C 恒温箱中催熟, 观察冷害症状和后熟情况。结果表明: 香蕉果肉中含有 8 种脂肪酸, 分别为十三烷酸、十七烷酸、顺-10-十七碳烯酸、反亚油酸、亚油酸、花生酸、 $\gamma$ -亚麻酸和  $\alpha$ -亚麻酸。3 °C 冷激处理 6 h 能够降低香蕉果实的冷害指数、相对电导率、脂氧合酶活性以及十三烷酸、十七烷酸、花生酸等饱和脂肪酸的含量; 有效地抑制顺-10-十七碳烯酸、反亚油酸、亚油酸、 $\gamma$ -亚麻酸、 $\alpha$ -亚麻酸等不饱和脂肪酸含量的下降, 维持较高的膜脂不饱和脂肪酸指数和膜脂脂肪酸饱和度, 从而增强香蕉果实的抗冷性, 减少冷害的发生并提高香蕉果实的后熟品质。

**关键词:** 冷激处理; 香蕉; 脂氧合酶; 脂肪酸; 抗冷性

文章编号: 1673-9078(2015)11-211-218

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.11.033

## Effects of Cold-shock Treatment on Fatty Acids in Membrane Lipids, Lipoygenase and Chilling Resistance of Banana Fruit

QIU Jia-rong<sup>1</sup>, ZHANG Liang-qing<sup>1</sup>, CHEN Chun<sup>1,2</sup>, LIN Zhen-shan<sup>1,2</sup>, WANG Ze-jin<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2. Agricultural Preservation Technology Development Base in Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The effects of cold-shock treatment (CST) at 3 °C on fatty acids present in the membrane lipids and lipoygenase of cold-stored banana fruits and the related physiological mechanisms were investigated. Banana fruits were treated with cold air at 3 °C for 6 h and then stored at 8 °C ±0.5 °C; the fruits without CST were directly stored at 8 °C ±0.5 °C and were used as the control group. The chilling injury index, cell membrane permeability, lipoygenase activity, and membrane fatty acid composition of banana fruits were measured regularly during the period of storage at 8 °C ±0.5 °C. After the fruits were stored in a constant temperature oven at 20 °C ±0.5 °C for 30 days to accelerate fruit ripening, the conditions of chilling injury and fruit after ripening were observed. Eight fatty acids were identified in the pulp of banana, that is, tridecylic acid, heptadecanoic acid, arachidic acid, *cis*-10-heptadecenoic acid, *trans*-linoleic acid, linoleic acid,  $\gamma$ -linolenic acid, and  $\alpha$ -linolenic acid. CST at 3 °C for 6 h could decrease the chilling injury index, relative conductivity, lipoygenase activity, and the content of tridecylic acid, heptadecanoic acid, arachidic acid, and other saturated fatty acids (SFAs). Besides, it effectively prevent the decrease in the content of *cis*-10-heptadecenoic acid, *trans*-linoleic acid, linoleic acid,  $\gamma$ -linolenic acid,  $\alpha$ -linolenic acid and other unsaturated fatty acids (UFSAs). It can also maintain relatively high SFA and UFSAs indexes in membrane lipids. Thus, CST enhanced the chilling resistance of banana fruits, reduced the incidence of cold damage, and improved the after-ripening quality of banana fruits.

**Key words:** cold-shock treatment; banana; lipoygenase; fatty acid; chilling resistance

香蕉 (*Musa spp.*) 是芭蕉科 (*Musaceae*) 芭蕉属

收稿日期: 2015-02-12

基金项目: 科技部科技富民强县专项 (国科发农[2013]514号)

作者简介: 邱佳容 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程

通讯作者: 王则金 (1957-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为农副产品贮藏与加工

(*Musa*) 植物, 约有 300 多个栽培品种, 是热带和亚热带“四大果品之一”, 以其肉质甜糯、芳香味美、营养丰富, 广受喜爱<sup>[1]</sup>。联合国粮农组织 (FAO) 将香蕉列为世界第四大经济作物<sup>[2]</sup>。低温贮藏是全球目前应用最广泛且行之有效的果蔬贮藏方法, 但香蕉对低温很敏感, 在低温贮藏时极易发生冷害, 导致果皮快速褐变, 催熟后出现斑点; 温度较高时其生理代谢活

跃且易受病菌侵染,贮藏保鲜期很短,不利于香蕉的商品化流通,从而制约了香蕉产业的良性发展。

冷害是冷敏性果蔬冷藏及冷藏运输过程中造成损失最严重的问题之一,冷害促进植物体内脂氧合酶活性增强,启动细胞膜的膜脂过氧化作用;脂氧合酶以不饱和脂肪酸为底物,催化植物中亚油酸和亚麻酸等多元不饱和脂肪酸的加氧反应,导致不饱和脂肪酸形成氢过氧化物,引发膜脂过氧化而造成细胞膜的伤害<sup>[3-6]</sup>。同时,冷害可使果实的膜脂成分含量和脂肪酸组成发生改变,脂肪酸是生物膜的重要组分,不同脂肪酸含量及比例决定着生物膜的稳定性。研究表明,不饱和脂肪酸和植物的冷敏性密切相关,这一点已在番茄<sup>[7]</sup>、黄瓜<sup>[8]</sup>、枇杷<sup>[9]</sup>、橄榄<sup>[10]</sup>和柠檬罗勒<sup>[11]</sup>等果蔬上得到证实。

适当的逆境锻炼可以使细胞膜组分中脂肪酸的不饱和度增加,从而使植物抗逆性增强。这就反应出膜脂不饱和度可诱导的特性。抗冷锻炼可提高不饱和脂肪酸含量,从而降低膜脂相变温度,抑制冷害的发生。本文采用 3℃处理 6 h 作为冷激处理条件,分析冷激处理对香蕉果实在低温贮藏期间脂氧合酶和膜脂脂肪酸的影响,以进一步探索冷激处理减轻冷害作用的机理。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料处理

供试的“坂仔”香蕉于 2014 年 7 月 23 日采自漳州地区一个管理良好的果园,采收成熟度为 7~8 成,在果园落梳后用纸箱包装当天运回福建农林大学海西农产品中心实验室。选择端正、大小均匀一致、无机械损伤和病虫害的果实于 (12±0.5)℃ 的冷库中预冷约 48 h 至中心温度降至 12℃。

将预冷后的香蕉果实用 3℃ 的冷空气处理 6 h,采用 0.05 mm 打孔聚乙烯薄膜袋包装,扎口,置于 (8±0.5)℃ 下贮藏,对照果用 0.05 mm 打孔聚乙烯薄膜袋包装后直接置于 (8±0.5)℃ 下贮藏。定期取样测定香蕉果实 (8±0.5)℃ 贮藏期间的冷害指数、细胞膜透性、脂氧合酶活性及膜脂脂肪酸组分。贮藏 30 d 后置于 (20±0.5)℃ 恒温箱中催熟,观察冷害症状和后熟情况。

### 1.2 仪器和试剂

Agilent7890A 气相色谱仪:美国安捷伦公司;DJW-2000 高精度全自动交流稳压电源:上海全力电器有限公司;SIGMA 2-16K 型通用台式冷冻离心机:

上海东工实业有限公司。HWS28 型电热恒温水浴锅:上海—恒科学仪器有限公司;高纯 H<sub>2</sub> (99.999%)、高纯 N<sub>2</sub> (99.999%)、纯空气:福州新航工业气体有限公司;苯、石油醚、甲醇、氢氧化钾均为优级纯:购自天津市永大化学试剂开发中心;脂肪酸甲酯混标准试剂(色谱纯):购自美国 sigma 公司。

## 1.3 方 法

### 1.3.1 冷害指数 (CII) 的测定

冷害指数参照朱世江等<sup>[12]</sup>的方法,稍作修改。冷害程度根据香蕉表皮外观症状确定,分别从表面色泽、褐变程度进行评价,每次评价均通过 3 次重复取样观察而获得最终数值。冷害级别分为 5 级,详见表 1。

$$\text{冷害指数} = \frac{\sum(\text{冷害级别} \times \text{该级别果数})}{(4 \times \text{总果数})}$$

表 1 香蕉果实冷害指数分级标准

Table 1 Grading standards for chilling injury index of banana

fruits	
冷害级别	香蕉表皮症状描述
0 级	果皮呈亮绿色,没有冷害症状;
1 级	果皮变暗失去光泽,出现褐色小凹陷斑点,冷害面积占果皮总面积 0~25%;
2 级	果皮褐变,凹陷斑面积扩大,冷害面积占果皮总面积 25%~50%;
3 级	果皮变黑,凹陷斑面积扩大并呈水渍状,冷害面积占果皮总面积 50%~75%;
4 级	果皮大部分变黑,水渍状面积进一步扩大有连呈一片,冷害面积占果皮总面积 75%~100%

### 1.3.2 感观品质的评定

根据果皮黑斑、腐烂,果肉风味、硬度评分。评定小组由 10 名具有相关专业知识的老师和学生组成,具体评分标准见表 2,货架期要求感观指标高于或等于 5 分。感观指标评定以单果进行。

表 2 香蕉果实感观品质评定标准

Table 2 Assessment standards for sensory quality of banana

fruits	
评分值	香蕉感观表现
9 分	果皮颜色好(黄色),手感硬;好,有极少量小褐斑,褐斑面积占总面积 0~2%
7 分	较好,根据多个零售商认为易销售,有少量小褐斑,褐斑面积占总面积少 5%
5 分	不易销售,有成片褐斑,褐斑面积占总面积 10%以上;
3 分	明显腐烂
1 分	

### 1.3.3 细胞膜透性

果皮膜透性的测定参照张昭其等<sup>[13]</sup>的方法, 稍有修改。取香蕉果皮, 用直径 10 mm 的打孔器打 10 个圆孔, 蒸馏水清洗 3 次后用滤纸吸干, 放 50 mL 具塞刻度试管中, 加入 25 mL 蒸馏水, 浸泡 30 min 后测定溶液的初始电导率  $C_1$ , 记录; 煮沸 30 min 后, 冷却, 再用电导率仪测定溶液的最大电导率  $C_0$ 。以前后两次电导率之比所得的相对电导率来表示细胞膜透性。重复 3 次。

$$\text{相对电导率 (\%)} = \left( \frac{\text{初始电导率}}{\text{最大电导率}} \right) \times 100\%$$

### 1.3.4 脂氧合酶 (LOX) 活性测定

称取 2.0 g 香蕉果肉, 加入 5.0 mL 经 4 °C 预冷的提取缓冲液, 在冰浴条件下研磨匀浆, 于 12000 r/min、4 °C 离心 30 min, 收集上清液, 低温保存备用。

取 2.75 mL 0.1 mol/L、pH 6.8 磷酸钠缓冲溶液, 加入 100  $\mu$ L 0.5% 亚油酸溶液, 在 30 °C 预保温 10 min, 再加入 200  $\mu$ L 粗酶液, 混匀。以蒸馏水为参比, 在反应 15 s 时开始记录反应体系在波长 234 nm 处的吸光度值, 作为初始值, 然后每隔 30 s 记录一次, 连续测定, 至少获得 6 个点的数据。

### 1.3.5 脂肪酸成分及含量的测定

将香蕉果实在 100 °C 下钝化脂酶 15 min, 称取磨好的果肉 1.0 g, 移到 10 mL 的离心管, 加入 8 mL 氯仿-甲醇溶液 (1:2, V/V), 充分混匀, 超声波处理 20 min, 静止 12 h 后离心 (12000 r/min, 15 min) 取上清液。用 7 mL 氯仿-甲醇 (1:2, V/V) 再次萃取离心, 合并滤液。向滤液中加入 5 mL 1% NaCl, 充分振荡 20 min, 静置分两层, 收集下层为总类脂。量取 2 mL 膜脂到 25 mL 试管, 加入 4 mL 苯-石油醚 (1:1, V/V), 使之溶解, 静置 30 min 后加入 4 mL 0.5 mol/L KOH-甲醇溶液充分振荡静置 20 min, 再加入 8 mL 蒸馏水, 再次充分振荡静置到溶液分层, 取上清液用小针筒过滤到进样瓶中, 将上层清液直接进行气相色谱分析。色谱柱 HP-560 m,  $\times$  320  $\mu$ m  $\times$  0.25  $\mu$ m 毛细柱; FID 检测器, 柱温 195 °C, 检测温度 300 °C, 载气:  $H_2$  30 mL/min,  $N_2$  20 mL/min, 空气 300 mL/min, 不分流。

用标准脂肪酸甲酯色谱峰保留时间定性分析。采用内标法对膜脂脂肪酸组分进行定量分析, 并计算膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和膜脂脂肪酸不饱和度。

$$IUFA = \left[ \sum_{i=1}^n (S_i \times t_i) \right] \times 100;$$

$$\text{膜脂脂肪酸不饱和度} = \frac{\text{不饱和脂肪酸相对含量}}{\text{饱和脂肪酸相对含量}}$$

式中,  $S_i$  膜脂不饱和脂肪酸相对含量;  $t_i$  该不饱和脂肪酸

所含不饱和键的个数。

### 1.3.6 试验数据处理

样品指标均进行 3 次重复试验。采用计算机统计软件 DPS V3.01 数据处理系统 (Data Processing System) 对数据进行方差分析 (ANOVA), 各处理平均数间采用 Duncan 多重比较法进行差异显著性分析, 差异显著水平为  $\alpha=0.05$ , 极显著水平为  $\alpha=0.01$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 冷激处理对香蕉果实冷害指数的影响

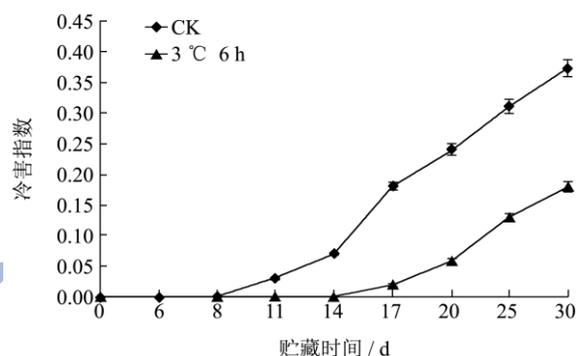


图 1 冷激处理对香蕉果实低温贮藏期间冷害指数的影响

Fig.1 Effect of cold-shock treatment on chilling injury index of banana fruits stored at 8 °C

冷害指数是判断果实贮藏效果最直观, 也是最主要的生理指标之一。由图 1 可知, 香蕉在 (8 $\pm$ 0.5) °C 贮藏期间, 对照组和冷激组的冷害指数在贮藏前期均未发生冷害; 但随着贮藏时间的延长, 对照组香蕉果实第 11 d 出现轻微冷害, 第 30 d 达到中度冷害, 冷害指数为 0.37; 而冷激组则在第 17 d 出现轻微冷害, 第 30 d 冷害指数为 0.18, 与对照组相比冷害指数明显降低; 在贮藏后期, 对照组和冷激组均随贮藏时间的延长冷害指数不断增加, 但对照组的上升幅度和冷害指数均明显高于冷激组。可见, 冷激处理可以明显减轻香蕉果实的冷害程度。

### 2.2 冷激处理对香蕉果实感官品质的影响

表 3 冷激处理对香蕉果实感官品质的影响

Table 3 Effects of cold-shock treatment on sensory quality of banana fruits

处理	感官评价	货架期
CK	4	1
3 °C 6 h	7	3

由表 3 可知, 当香蕉果实经 (8 $\pm$ 0.5) °C 贮藏 30 d 后于 (20 $\pm$ 0.5) °C 下催熟, 结果发现, 对照组香蕉果实虽能勉强后熟, 但食用品质大大下降, 果肉迅速软

化, 风味变淡, 果皮出现较多的褐斑, 商品价值受到较大影响, 在  $(12 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  下的货架期仅有 1 d; 而冷激组香蕉果实能正常后熟, 且保持果实的正常品质和风味, 果皮有极少褐斑, 仍保持了较高的商品价值, 在  $(12 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  下的货架期达到 3 d; 可见, 冷激处理在一定程度上可以减轻香蕉冷害的发生, 且能保证香蕉正常后熟并保持香蕉果实较好的感官品质。

### 2.3 冷激处理对香蕉果皮细胞膜透性的影响

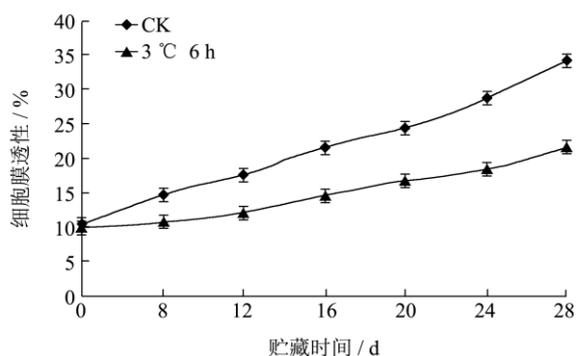


图2 冷激处理对香蕉果实低温贮藏期间果皮细胞膜透性的影响

Fig.2 Effect of cold-shock treatment on cell membrane permeability in the pericarp of banana fruits stored at  $8^\circ\text{C}$

细胞膜透性的变化可作为植物耐冷性的生理指标之一。由图2可知, 随着香蕉在  $(8 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  下贮藏时间的延长和冷害程度的加深, 其果皮细胞膜透性逐渐升高, 且对照组香蕉果皮细胞膜透性明显高于  $3^\circ\text{C}$  冷激处理 6 h 的。在整个贮藏过程中, 对照组的香蕉果皮细胞膜透性上升明显, 而  $3^\circ\text{C}$  冷激处理 6 h 的细胞膜透性上升幅度较小, 在贮藏第 28 d 时细胞膜透性为 21.5% 与对照组相比降低了 37%, 存在极显著性差异 ( $P < 0.01$ )。可见,  $3^\circ\text{C}$  冷激处理 6 h 可以明显地抑制冷藏香蕉果皮细胞膜透性的上升。

### 2.4 冷激处理对香蕉果实脂氧合酶 (LOX) 活性的影响

从图3可知, 香蕉在  $(8 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  下贮藏期间, 对照组和冷激组的脂氧合酶活性均随贮藏时间的延长而上升。其中, 对照组的上升幅度明显, 而冷激组的上升趋势相对较为平缓, 贮藏到第 28 d 对照组的比冷激组的高 38%, 且在整个贮藏过程中对照组的脂氧合酶活性始终明显高于冷激组的。统计分析表明, 对照组和冷激组的脂氧合酶活性差异达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。可见, 冷激处理明显抑制了香蕉果实低温贮藏期间脂氧合酶活性的上升。

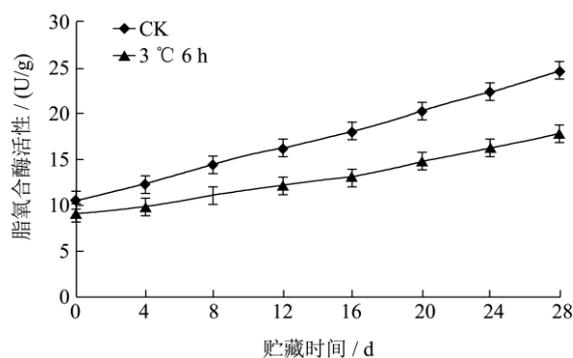


图3 冷激处理对香蕉果实低温贮藏期间脂氧合酶活性的影响

Fig.3 Effect of cold-shock treatment on LOX activity of banana fruits stored at  $8^\circ\text{C}$

### 2.5 香蕉果肉脂肪酸组分及含量的分析

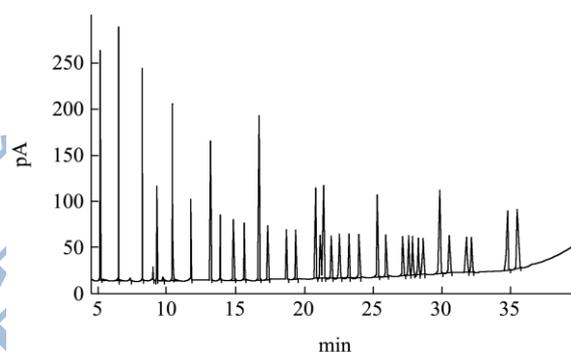


图4 脂肪酸甲酯混标色谱图

Fig.4 Chromatogram of mixed fatty acid methyl ester standards

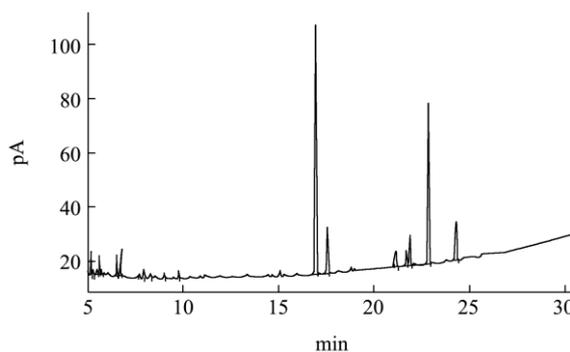


图5 香蕉果肉脂肪酸色谱图

Fig.5 Chromatogram of fatty acids in banana pulp

通过比较图4和图5的色谱图, 对香蕉果肉中脂肪酸定性分析可知, 香蕉果肉中含有8种脂肪酸, 分别为十三烷酸 ( $\text{C}_{18:0}$ )、十七烷酸 ( $\text{C}_{17:0}$ )、顺-10-十七碳烯酸 ( $\text{C}_{17:1}$ )、反亚油酸 ( $\text{C}_{18:2}$ )、亚油酸 ( $\text{C}_{18:2}$ )、花生酸 ( $\text{C}_{20:0}$ )、 $\gamma$ -亚麻酸 ( $\text{C}_{18:3}$ ) 和  $\alpha$ -亚麻酸 ( $\text{C}_{18:3}$ ); 其中, 饱和脂肪酸分别是十三烷酸、十七烷酸和花生酸, 且饱和脂肪酸以十三烷酸为主; 不饱和脂肪酸分别是顺-10-十七碳烯酸、反亚油酸、亚油酸、 $\gamma$ -亚麻酸

和 $\alpha$ -亚麻酸, 且饱和脂肪酸以亚麻酸为主。

对色谱图中显示的脂肪酸用内标法进行计算, 得到香蕉果实中各种脂肪酸的相对含量。由表4可知, 香蕉果肉中以十三烷酸含量最高, 其相对含量为31.11%, 其次是亚麻酸, 花生酸, 亚油酸, 而十七烷

酸和顺-10-十七碳烯酸相对含量较低。进一步分析发现, 刚采收的香蕉果实其果肉膜脂饱和脂肪酸相对含量为56.08%, 比膜脂不饱和脂肪酸略微高些, 这可能与香蕉的冷敏性有关。

表4 香蕉果肉脂肪酸的组成及其相对含量

Table 4 Composition and relative content of fatty acids in banana pulp

试验号	保留时间/min	脂肪酸	分子式	分子量	相对含量/%
1	9.75±0.03	十三烷酸	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	214.35	31.08±0.03
2	16.94±0.05	十七烷酸	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	270.45	7.27±0.03
3	17.54±0.10	顺-10-十七碳烯酸	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	268.43	2.58±0.06
4	21.19±0.06	反亚油酸	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280.44	8.14±0.06
5	21.66±0.09	亚油酸	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280.45	7.63±0.07
6	21.75±0.12	花生酸	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	312.53	17.73±0.09
7	22.85±0.10	$\gamma$ -亚麻酸	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278.43	16.12±0.08
8	24.33±0.06	$\alpha$ -亚麻酸	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278.43	9.45±0.07

## 2.6 冷激处理对香蕉果实膜脂脂肪酸组分的影响

### 2.6.1 冷激处理对香蕉果实膜脂饱和脂肪酸组分的影响

从图6a可知, 香蕉在(8±0.5)℃贮藏期间, 对照组和冷激组的十三烷酸含量均随贮藏时间的延长而上升, 但上升幅度均不明显, 整个贮藏期间对照组和冷激组分别只上升了4.5%和3.5%。

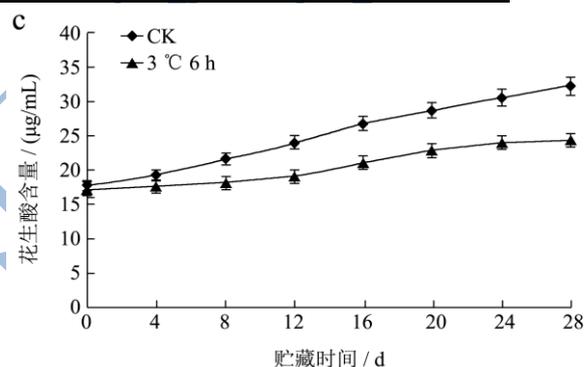
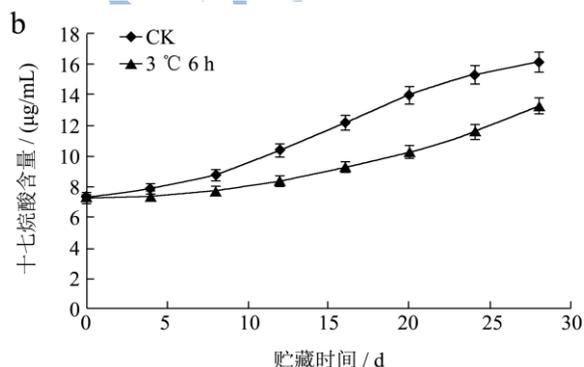
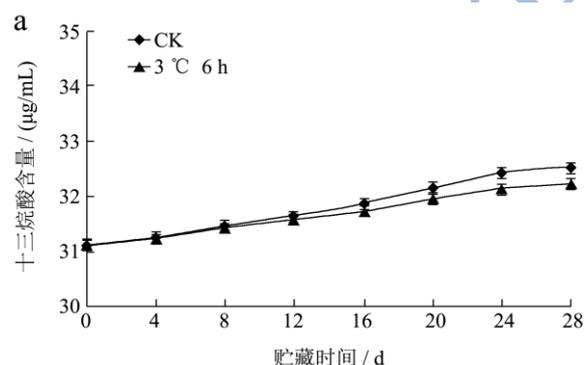


图6 冷激处理对香蕉果实低温贮藏期间膜脂饱和脂肪酸组分的影响

Fig.6 Effect of cold-shock treatment on saturated fatty acid components in membrane lipids of banana fruits stored at 8 °C

在贮藏前12 d对照组和冷激组的十三烷酸含量非常接近, 而之后对照组的上升幅度逐渐高于冷激组的。统计分析表明, 对照组和冷激组的十三烷酸含量差异达到显著水平( $P<0.05$ )。可见, 冷激处理抑制了香蕉低温贮藏期间十三烷酸含量的上升。

从图6b可知, 香蕉在(8±0.5)℃贮藏期间, 对照组和冷激组的十七烷酸含量均随贮藏时间的延长而上升, 且整个贮藏期间对照组的上升幅度明显大于冷激组的。贮藏到第20 d时对照组的十七烷酸含量比冷激组的高36%。统计分析表明, 对照组和冷激组的十七烷酸含量差异达到极显著水平( $P<0.01$ )。可见, 冷激处理有效地抑制了香蕉低温贮藏期间十七烷酸含量的上升。

从图6c可知, 香蕉在(8±0.5)℃贮藏期间, 对照组和冷激组的花生酸含量均随贮藏时间的延长而上

升,且对照组上升迅速,贮藏期间上升了82%,明显高于冷激组的变化量,且整个贮藏期间对照组的始终明显大于冷激组的。贮藏到第28 d时对照组的花生酸含量比冷激组的高33%,统计分析表明,对照组和冷激组的花生酸含量差异达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。可见,冷激处理有效地抑制了香蕉低温贮藏期间花生酸含量的上升。

上述结果表明,香蕉在  $(8\pm 0.5)$  °C 贮藏期间,对照组和冷激组的膜脂饱和和脂肪酸相对含量均随贮藏时间的延长而上升,但冷激组的上升幅度较为缓慢,且整个贮藏期间对照组的始终大于冷激组的。可见,冷激处理能有效地抑制香蕉低温贮藏期间膜脂饱和脂肪酸含量的上升。

### 2.6.2 冷激处理对香蕉膜脂不饱和脂肪酸组分的影响

从图7a可知,香蕉在  $(8\pm 0.5)$  °C 贮藏期间,对照组和冷激组的顺-10-十七碳烯酸含量均随贮藏时间的延长而下降,但下降幅度有所不同,在整个贮藏期间对照组的变化量接近冷激组的2倍,除了在贮藏初期对照组的值稍高于冷激组的,之后随着冷害程度的加深对照组的逐渐低于冷激组的。统计分析表明,对照组和冷激组的顺-10-十七碳烯酸含量差异达到显著水平 ( $P<0.05$ )。可见,冷激处理延缓了香蕉低温贮藏期间顺-10-十七碳烯酸含量的下降。

从图7b可知,香蕉在  $(8\pm 0.5)$  °C 贮藏期间,对照组和冷激组的反亚油酸含量均随贮藏时间的延长而下降。

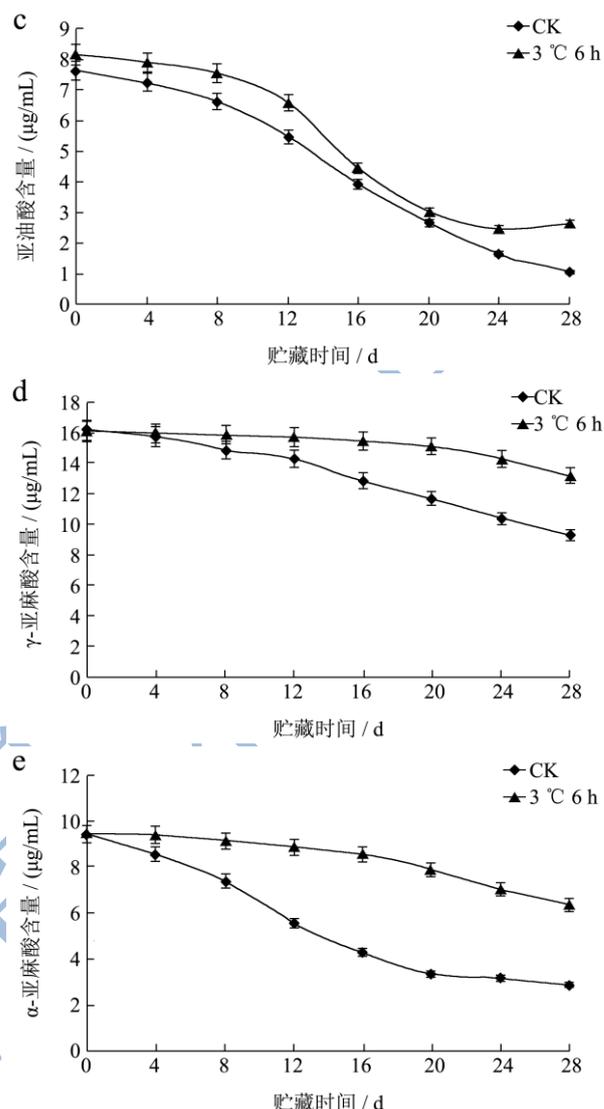
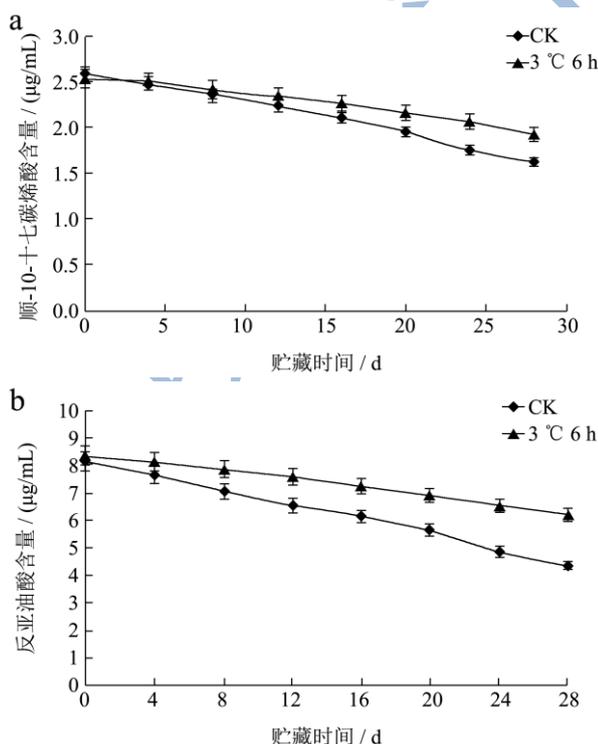


图7 冷激处理对香蕉果实低温贮藏期间膜脂不饱和脂肪酸组分的影响

Fig.7 Effect of cold-shock treatment on unsaturated fatty acid components in membrane lipids of banana fruits stored at 8°C

图7b中,对照组的反亚油酸含量下降迅速,而冷激组的下降比较缓慢,且在整个贮藏期间,对照组的始终明显低于冷激组的。贮藏到第28 d时对照组的比冷激组的低30%。统计分析表明,对照组和冷激组的反亚油酸含量差异达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。可见,冷激处理有效地延缓了香蕉低温贮藏期间反亚油酸含量的下降。

从图7c可知,香蕉在  $(8\pm 0.5)$  °C 贮藏期间,对照组和冷激组的亚油酸含量均随贮藏时间的延长而下降。其中,对照组的亚油酸含量下降迅速;而冷激组的在贮藏前12 d下降比较缓慢,在12 d~20 d出现迅速下降趋势,到贮藏末期下降幅度趋于平缓,贮藏到第28 d时对照组比冷激组的低59%,且在整个贮藏过程中对照组的始终明显低于冷激组的。统计分析表明,

对照组和冷激组的反亚油酸含量差异达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。可见,冷激处理有效地延缓了香蕉低温贮藏期间反亚油酸含量的下降。

从图 7d 可知,香蕉在 ( $8\pm 0.5$ ) °C 贮藏期间,对照组和冷激组的  $\gamma$ -亚麻酸含量均随贮藏时间的延长而下降。整个贮藏期间,对照组的  $\gamma$ -亚麻酸含量下降幅度明显,下降了 74%;而冷激组的始终维持在较高水平,只下降了 2%;在贮藏前 4 d 对照组和冷激组的  $\gamma$ -亚麻酸含量非常相近,但之后到贮藏末期对照组的始终明显低于冷激组的。贮藏到第 28 d 时对照组比冷激组的低 59%。统计分析表明,对照组和冷激组的  $\gamma$ -亚麻酸含量差异达极显著水平 ( $P<0.01$ )。可见,冷激处理有效地延缓了香蕉低温贮藏期间  $\gamma$ -亚麻酸含量的下降。

从图 7e 可知,香蕉在 ( $8\pm 0.5$ ) °C 贮藏期间,对照组和冷激组的  $\alpha$ -亚麻酸含量均随贮藏时间的延长而下降。在贮藏前 20 d 对照组的  $\alpha$ -亚麻酸含量下降迅速,在第 20 d~28 d 下降较为缓慢;而冷激组的下降始终较为缓慢;且在整个贮藏期间对照组的始终明显低于冷激组的。贮藏到第 20 d 对照组比冷激组的低 58%。统计分析表明,对照组和冷激组的  $\alpha$ -亚麻酸含量差异达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。可见,冷激处理有效地延缓了香蕉低温贮藏期间  $\alpha$ -亚麻酸含量的下降。

上述结果表明,香蕉在 ( $8\pm 0.5$ ) °C 贮藏期间,对照组和冷激组的不饱和脂肪酸含量均呈逐渐下降的变化趋势。其中,对照组不饱和脂肪酸含量下降幅度明显大于冷激组的,而冷激组的在整个贮藏过程中下降缓慢,变化量非常小。可见,冷激处理能够有效地抑制香蕉低温贮藏期间总不饱和脂肪酸含量的下降。

### 2.6.3 冷激处理对香蕉果实膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和膜脂脂肪酸不饱和度的影响

从图 8a 和 8b 可知,香蕉在 ( $8\pm 0.5$ ) °C 贮藏期间,对照组和冷激组的膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和膜脂脂肪酸不饱和度均随贮藏时间的延长而下降。其中,对照组的膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和膜脂脂肪酸不饱和度下降较为迅速,而冷激组的在整个贮藏过程中下降缓慢。可见,冷激处理能够有效地抑制香蕉低温贮藏期间膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和膜脂脂肪酸不饱和度的下降。

## 3 结论

3.1 在低温胁迫过程中,植物膜系统是最先受到伤害的部位,会使膜结构发生膜脂相变,细胞膜从液晶相变为凝胶相,导致膜脂脂肪酸组分改变,膜的流动性下降,细胞膜透性增大,细胞膜功能丧失<sup>[14-16]</sup>。脂氧

合酶与冷害发生时膜脂脂肪酸的变化存在一定相关性,随着冷害持续发生,脂氧合酶不断被激活,冷害果实中亚麻酸相对含量逐渐降低。本试验中,冷激处理抑制了脂氧合酶活性的增加,延缓了香蕉果实中膜脂的亚油酸和亚麻酸相对含量的下降。相关分析表明,脂氧合酶与亚油酸、亚麻酸相对含量呈显著负相关,这可能是由于脂氧合酶可催化植物中亚油酸和亚麻酸等多元不饱和脂肪酸的加氧反应,导致亚油酸和亚麻酸含量降低,从而减少了自由基对膜的破坏和伤害,保护了膜的完整性,提高了果实的抗冷性。进一步分析发现,脂氧合酶与十七烷酸、花生酸相对含量呈现显著的正相关,而脂氧合酶与十三烷酸、顺-10-十七碳烯酸相对含量的相关性不显著。

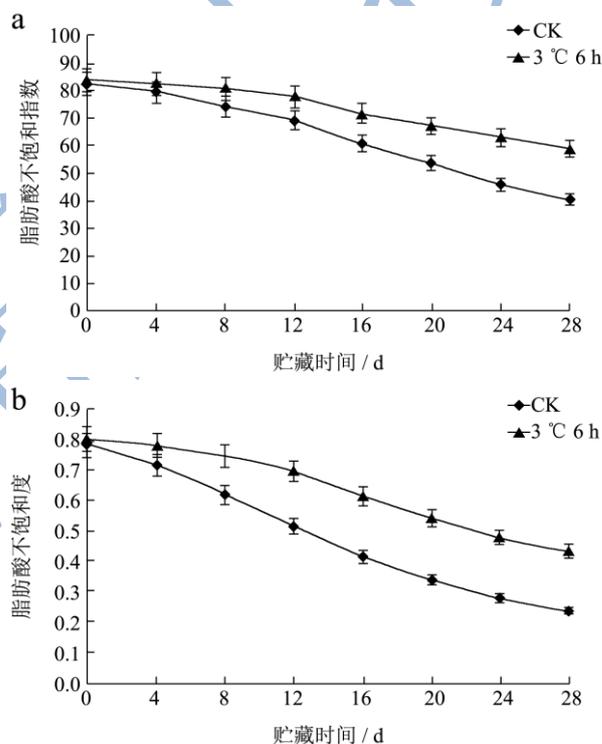


图 8 冷激处理对香蕉果实低温贮藏期间膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和膜脂脂肪酸不饱和度的影响

Fig.8 Effect of cold-shock treatment on the unsaturated fatty acid (IUFA) index and degree of fatty acid unsaturation of banana fruits stored at 8°C

3.2 膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 是衡量膜脂脂肪酸不饱和程度的重要指标之一,能反映膜的流动性。而不饱和脂肪酸含量的升高可降低脂质的相变温度以维持细胞膜的稳定性,从而提高其抗冷性<sup>[17,18]</sup>。这是因为脂肪酸不饱和链的大量存在会提高膜的活化能力,能使膜在低温下维持液晶态,有利于膜在低温下的稳定性,并保持膜的正常功能。抗冷锻炼可提高或延缓许多作物的不饱和脂肪酸含量,从而降低膜脂相

变温度,抑制冷害的发生<sup>[15]</sup>。本试验中,冷激处理明显地抑制了细胞膜相对电导率的增加,延缓了十三烷酸、十七烷酸、花生酸等饱和脂肪酸含量的上升;有效地延缓了顺-10-十七碳烯酸、反亚油酸、亚油酸、 $\gamma$ -亚麻酸、 $\alpha$ -亚麻酸等不饱和脂肪酸含量的下降,尤其是抑制了亚油酸和亚麻酸的降解,同时提高了膜脂脂肪酸不饱和指数(IUFA)和膜脂脂肪酸不饱和度,从而防止膜从液晶态变为凝胶态,保持了膜的流动性、完整性,减少膜的通透性,使膜尽可能具有正常结构和生理功能,从而提高其抗冷性。

3.3 综上所述,3℃冷激处理6h能够降低香蕉果实的冷害指数、相对电导率、脂氧合酶活性以及膜脂饱和脂肪酸的含量,有效地抑制膜脂不饱和脂肪酸含量、脂肪酸不饱和指数(IUFA)和脂肪酸不饱和度的下降,从而提高香蕉在低温贮藏期间的抗冷性、减少冷害的发生以维持香蕉果实的后熟品质。

### 参考文献

- [1] 郭晓明,温海祥,吕顺,等.响应面法优化香蕉酒的制作工艺[J].现代食品科技,2011,27(11):1382-1386  
GUO Xiao-ming, WEN Hai-xiang, LV Shun, et al. Optimization of fermentation of banana wine by response surface methodology [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(11): 1382-1386
- [2] 张岩,吴继军,唐道邦,等.香蕉片的真空油炸工艺及质构品质初探[J].现代食品科技,2010,26(9):987-990,1008  
ZHANG Yan, WU Ji-jun, TANG Dao-bang, et al. Effects of processing conditions on the quality and texture of the vacuum-fried banana chips [J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(9): 987-990, 1008
- [3] 苏卿,周志钦.采收因素对果蔬产品营养和质量安全的影响研究现状[J].食品工业科技,2012,33(19):362-369  
SU Qing, ZHOU Zhi-qin. Current research status of the influences of postharvest factors on the nutrition and quality of fruit and vegetable products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(19): 362-369
- [4] 曹嵩晓,张冲,汤雨凡,等.植物脂氧合酶蛋白特性及其在果实成熟衰老和逆境胁迫中的作用[J].植物生理学报, 2014, 50(8):1096-1108  
CAO Song-xiao, ZHANG Chong, TANG Yu-fan, et al. Protein characteristic of the plant lipoxygenase and the function on fruit ripening and senescence and adversity stress [J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(8): 1096-1108
- [5] 左进华,陈安均,孙爱东,等.番茄果实成熟衰老相关因子研究进展[J].中国农业科学,2010,43(13):2724-2734  
ZUO Jin-hua, CHEN An-jun, SUN Ai-dong, et al. Research progress on the factors related to tomato fruit ripening and senescence [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2724-2734
- [6] Boonsiri K, Ketsa S, Doorn W G V. Seed browning of hot peppers during low temperature storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(3): 358-365
- [7] Luengwilai K, Beckles D M, Saltveit M E. Chilling-injury of harvested tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Micro-Tom fruit is reduced by temperature pre-treatments [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 63(1): 123-128
- [8] Chen B, Yang H. 6 - Benzylaminopurine alleviates chilling injury of postharvest cucumber fruit through modulating antioxidant system and energy status [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(8): 1915-1921
- [9] Gao H, Tao F, Song L, et al. Effects of short-term N<sub>2</sub> treatment on quality and antioxidant ability of loquat fruit during cold storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(7): 1159-1163
- [10] 孔祥佳,林河通,郑俊峰,等.热空气处理诱导冷藏橄榄果实抗冷性及其与膜脂代谢的关系[J].中国农业科学, 2012, 45(4):752-760  
KONG Xiang-jia, LIN He-tong, ZHRNG Jun-feng, et al. Hot-air treatment induced chilling tolerance of cold-stored Chinese olive fruits and its relation to the metabolism of membrane lipids [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(4): 752-760
- [11] Wongsheree T, Ketsa S, van Doorn W G. The relationship between chilling injury and membrane damage in lemon basil (*Ocimum × citriodourum*) leaves [J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(1): 91-96
- [12] 朱世江,季作梁.热处理提高芒果抗冷性与内源 ABA 的关系[J].中国农业科学,2002,35(9):1150-1153  
ZHU Shi-jiang, JI Zuo-liang. The relationship between heat-induced chilling tolerance and endogenous ABA levels in mango fruits [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1150-1153
- [13] 张昭其,段学武,庞学群,等.冷激对采后香蕉几个与耐热性有关的生理指标的影响[J].植物生理学通讯, 2002, 38(4): 333-335  
ZHANG Zhao-qi, DUAN Xue-wu, PANG Xue-qun, et al. The effects of cold shock on some physiological changes related to thermotolerance of postharvest bananas [J]. Plant Physiology Communications, 2002, 38(4): 333-335

- [14] Promyou S, Ketsa S, van Doorn W G. Hot water treatments delay cold-induced banana peel blackening [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 48(1): 132-138
- [15] Mirdehghan S H, Rahemi M, Martínez-Romero D, et al. Reduction of pomegranate chilling injury during storage after heat treatment: Role of polyamines [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 44(1): 19-25
- [16] Lurie S, Crisosto C H. Chilling injury in peach and nectarine [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37(3): 195-208
- [17] Zhang C, Tian S. Crucial contribution of membrane lipids' unsaturation to acquisition of chilling-tolerance in peach fruit stored at 0 °C [J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(2): 405-411
- [18] 闫师杰,梁丽雅,陈计峦,等.降温方法对不同采收期鸭梨采后果心褐变和膜脂组分的影响[J].*农业工程学报*, 2010, 26(8):356-362
- YAN Shi-jie, LIANG Li-ya, CHEN Ji-luan, et al. Effects of different cooling methods on core browning and membrane fatty acid components of postharvest Yali pears with different harvest periods [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(8): 356-362