

# 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

孔祥佳<sup>1,3</sup>, 林河通<sup>1,2</sup>, 郑俊峰<sup>1</sup>, 林艺芬<sup>1,2</sup>, 陈艺晖<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>福建农林大学食品科学学院, 福州 350002; <sup>2</sup>福建农林大学农产品产后技术研究所, 福州 350002; <sup>3</sup>福建中医药大学药学院, 福州 350108)

**摘要:**【目的】研究热空气处理对冷藏橄榄果实抗冷性的影响及其与脂氧合酶(LOX)活性和膜脂脂肪酸组分变化的关系。【方法】采后‘檀香’橄榄[*Canarium album* (Lour.) Raeusch cv. Tanxiang]果实 38℃热空气处理 30 min, 采用 0.015 mm 厚的聚乙烯薄膜袋密封包装, 在 (2±1)℃下贮藏。贮藏期间定期测定橄榄果实冷害指数和细胞膜透性, 果皮 LOX 活性和膜脂脂肪酸组分。【结果】与对照果实比, 38℃热空气处理 30 min 降低冷藏橄榄果实冷害指数、细胞膜透性和果皮 LOX 活性, 提高果皮棕榈油酸(C<sub>16:1</sub>)、亚油酸(C<sub>18:2</sub>)和亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)等不饱和脂肪酸相对含量, 降低肉豆蔻酸(C<sub>14:0</sub>)、棕榈酸(C<sub>16:0</sub>)和硬脂酸(C<sub>18:0</sub>)等饱和脂肪酸相对含量, 抑制果皮脂肪酸不饱和指数和脂肪酸不饱和度下降。【结论】热空气处理通过降低冷藏橄榄果实果皮 LOX 活性而减少膜脂不饱和脂肪酸的降解, 维持较高的膜脂脂肪酸不饱和程度, 从而增强橄榄果实抗冷性、减轻冷藏橄榄果实冷害的发生。

**关键词:** 橄榄; 冷害; 抗冷性; 脂氧合酶; 脂肪酸; 热空气处理

## Hot-Air Treatment Induced Chilling Tolerance of Cold-Stored Chinese Olive Fruits and Its Relation to the Metabolism of Membrane Lipids

KONG Xiang-jia<sup>1,3</sup>, LIN He-tong<sup>1,2</sup>, ZHENG Jun-feng<sup>1</sup>, LIN Yi-fen<sup>1,2</sup>, CHEN Yi-hui<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; <sup>2</sup>Institute of Postharvest Technology of Agricultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; <sup>3</sup>College of Pharmacy, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350108)

**Abstract:** 【Objective】 The effects of hot-air treatment on chilling tolerance of cold-stored Chinese olive fruits in relation to the changes of lipoxygenase (LOX) activity and fatty acid constituents of membrane lipids were investigated. 【Method】 The harvested ‘Tanxiang’ Chinese olive [*Canarium album* (Lour.) Raeusch cv. Tanxiang] fruits were pre-treated with hot-air at 38℃ for 30 minutes and then packed into sealed polyethylene bags (0.015 mm thickness) and stored at (2±1)℃. Chilling injury index and cellular membrane permeability of fruit, LOX activity and fatty acid constituents of membrane lipids in pericarp of Chinese olive fruits during cold storage were determined. 【Result】 As compared to the control fruit, there were lower fruit chilling injury index, cellular membrane permeability and pericarp LOX activity in cold-stored Chinese olive fruits pre-treated with hot-air at 38℃ for 30 minutes. The contents of unsaturated fatty acids in pericarp, such as palmitoleic acid (C<sub>16:1</sub>), linoleic acid (C<sub>18:2</sub>) and linolenic acid (C<sub>18:3</sub>) increased, while the contents of saturated fatty acids in pericarp, such as myristic acid (C<sub>14:0</sub>), palmitic acid (C<sub>16:0</sub>) and stearic acid (C<sub>18:0</sub>) decreased, and index of unsaturated fatty acids (IUFA) and unsaturated degree of fatty acids in pericarp increased. 【Conclusion】 It is suggested that the enhancement of chilling tolerance and the alleviation of chilling injury in cold-stored Chinese olive fruits by hot-air treatment may be due to the decrease of LOX activity in pericarp, which may reduce the degradation of unsaturated fatty acids of membrane lipids and maintain higher unsaturated degree of fatty acids.

收稿日期: 2011-03-04; 接受日期: 2011-05-10

基金项目: 国家科技支撑计划专项(2007BAD07B06)、福建省自然科学基金项目(C94015)、福建省教育厅科技项目(JA02208)、福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划(闽教科(2007)20号)

联系方式: 孔祥佳, Tel: 13459495750; E-mail: nihaojia2005@126.com. 通信作者林河通, Tel: 13950305980; E-mail: hetonglin@163.com

**Key words:** Chinese olive [*Canarium album* (Lour.) Raeusch]; chilling injury; chilling tolerance; lipoxygenase; fatty acid; hot-air treatment

## 0 引言

【研究意义】橄榄 [*Canarium album* (Lour.) Raeusch] 为青绿色核果, 是中国南方特有的亚热带常绿果树之一。橄榄果实营养价值丰富, 具有较高的保健作用和药用价值, 鲜食有清热解毒、利咽化痰、生津止渴、开胃降气等功效, 深受消费者喜爱。橄榄果实较不耐贮藏, 鲜果在室温下易劣变、腐烂, 放置数天即失水皱缩, 果皮易失去鲜绿色而变成黄褐色; 冷藏能有效抑制采后橄榄果实劣变, 但橄榄是冷敏型果实, 贮藏温度低于 6℃ 时就会发生冷害, 其冷害症状表现为表面出现斑点, 表皮凹陷、失色, 果肉褐变, 果实失水皱缩等<sup>[1-2]</sup>。冷害影响橄榄果实外观品质而使其失去商品价值, 还会导致果实抗病性和耐贮性下降, 从而限制低温贮藏技术在橄榄果实采后保鲜中的应用<sup>[2]</sup>。因此, 寻求控制橄榄果实低温贮藏冷害的新方法或新途径, 具有重要的理论和实践意义。【前人研究进展】前人研究认为, 冷害对植物细胞的伤害首先作用于细胞膜, 会使膜结构发生膜脂相变, 细胞膜从液晶态转变为凝胶态<sup>[3]</sup>, 导致膜脂脂肪酸组分改变<sup>[4]</sup>, 膜流动性降低, 细胞膜透性增大<sup>[5]</sup>, 使植物组织出现各种生理失调和代谢紊乱, 严重时导致细胞死亡<sup>[6]</sup>。热处理作为一种无毒、无农药残留的果蔬采后物理处理方法<sup>[7]</sup>, 能通过改变西葫芦、番茄、柿果等果蔬膜脂脂肪酸组分及相对含量而诱导果蔬抗冷性, 从而达到控制冷藏果蔬冷害发生而延长果蔬贮藏期的目的<sup>[8-10]</sup>。笔者前期的研究认为, 38℃ 热空气处理 30 min 可以作为提高 (2±1)℃ 下冷藏的橄榄果实抗冷性、减轻橄榄果实冷害发生的适宜热空气处理条件。【本研究切入点】目前有关热处理诱导冷藏橄榄果实抗冷性及其与脂氧合酶 (LOX) 活性和膜脂脂肪酸组分的关系未见报道。【拟解决的关键问题】本文以福建主栽橄榄品种 ‘檀香’ 橄榄果实为材料, 研究经 38℃ 热空气处理 30 min 的橄榄果实 (2±1)℃ 下冷藏期间的冷害发生情况、LOX 活性和膜脂脂肪酸组分的变化规律, 旨在阐明热空气处理诱导冷藏橄榄果实抗冷性及其与 LOX 活性和膜脂脂肪酸组分的关系, 为提高冷藏橄榄果实抗冷性、控制冷藏橄榄果实冷害发生和延长果实贮藏保鲜期提供科学依据和生产指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验处理

供试 ‘檀香’ 橄榄 [*Canarium album* (Lour.) Raeusch cv. Tanxiang] 果实于 2009 年 11 月 15 日采自福建省闽侯县竹歧乡橄榄科技示范场, 果实约 9 成熟。果实采收当天运至福建农林大学农产品产后技术研究所食品贮藏保鲜实验室 (福州), 选择大小均匀、色泽一致、无病虫、无损伤的健康果实作为试验材料。经过挑选的橄榄果实用 25% 戴挫霉杀菌剂 1.0 mL·L<sup>-1</sup> 浸果 5 min, 取出晾干后进行以下处理: (1) 对照 (20℃ 放置 30 min); (2) 热空气处理 (38℃ 热空气处理 30 min)。每处理重复 3 次, 处理后的果实立即用 0.015 mm 厚的聚乙烯薄膜袋密封包装, 每袋装果 100 个, 每处理 30 袋, 果实包装后在 (2±1)℃ 下贮藏。贮藏期间定期取样观察橄榄果实的冷害发生情况, 并测定有关生理指标。

### 1.2 指标测定

1.2.1 果实冷害指数 参照陈莲<sup>[11]</sup>的方法, 略有修改。每次随机取 100 个橄榄果实, 按照果实表面所呈现的冷害斑分为 6 级: 1 级果为无冷害症状; 2 级果为轻微冷害, 冷害斑 < 1/4 果实总表面积; 3 级果为中度冷害, 1/4 果实总表面积 ≤ 冷害斑 < 1/2 果实总表面积; 4 级果为中高度冷害, 1/2 果实总表面积 ≤ 冷害斑 < 3/4 果实总表面积; 5 级果为严重冷害, 3/4 果实总表面积 ≤ 冷害斑 < 果实全部表面积; 6 级果为果实表面积全部出现冷害斑。果实冷害指数 = Σ (冷害级数 × 该级果数) / 总果数。

1.2.2 果实细胞膜透性测定 参照林河通等<sup>[12]</sup>的方法, 沿 10 个橄榄果实的赤道面取果实圆片 (圆片直径为 5 mm; 圆片厚度为 8 mm) 2.0 g, 加重蒸馏水 25 mL, 于 20℃ 下放置 3 h, 搅拌均匀后以 3173 型台式电导率仪测定浸出液的电导度 (C<sub>1</sub>)。随后再将果实圆片及浸出液回流煮沸 30 min, 冷却后加重蒸馏水至 25 mL, 搅拌均匀后测定果实圆片全渗电导度 (C<sub>2</sub>)。用相对电导率表示果实细胞膜透性大小。相对电导率 (%) = (C<sub>1</sub>/C<sub>2</sub>) × 100%。

1.2.3 脂氧合酶 (LOX) 活性测定 从 10 个橄榄果实中取果皮 1.0 g, 按照林河通等<sup>[12]</sup>的方法测定蛋白质含量, 按照陈昆松等<sup>[13]</sup>的方法测定果皮 LOX 活性, 结

果以 $\Delta OD_{234} \cdot \text{mg}^{-1} \text{protein} \cdot \text{min}^{-1}$ 表示。

**1.2.4 膜脂脂肪酸组分测定** 参照陈莲等<sup>[14]</sup>的方法,将 10 个橄榄果实的果皮在 100℃ 下钝化脂酶 10 min,称取 0.25 g 置于 10 mL 具塞试管中,加 2 mL 苯-石油醚 (1:1, v/v),振摇 16 h 后,离心取清液,再加 2 mL 0.1 mol·L<sup>-1</sup> KOH-甲醇溶液 (1:1, v/v),振摇 10 min 后再加饱和 NaCl 至 10 mL。抽滤液于 GC-9A 气相色谱仪测定。条件是:20% DEGS 担体,3.0 mm×2.0 m 石英玻璃柱,FID 检测灵敏度为 0.015 c·g<sup>-1</sup>。N<sub>2</sub> 流速 50 mL·min<sup>-1</sup>,H<sub>2</sub> 流速 50 mL·min<sup>-1</sup>,空气流速 500 mL·min<sup>-1</sup>,柱温 195℃,进样口温度 240℃。用标准脂肪酸甲酯的色谱峰保留时间定性分析。果皮膜脂脂肪酸组分定量分析采用对各组分峰面积积分,用归一化法计算各组分的百分含量,结果以%表示,并计算膜脂脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和膜脂脂肪酸不饱和度。

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

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。

膜脂脂肪酸不饱和度=不饱和脂肪酸相对含量/饱和脂肪酸相对含量。

以上各指标测定均重复 3 次,采用 SPSS 16.0 数据分析软件进行数据统计和差异显著性分析。

## 2 结果

### 2.1 果实冷害指数

由图 1 可知,橄榄果实冷害指数随着冷藏时间的延长而增加,但不同处理的变化幅度不同。其中,对照橄榄果实在冷藏 0—60 d 内,果实冷害指数缓慢增加,之后快速增加,冷藏到 120 d 时,果实全部出现冷害斑,冷害指数高达 6.0。而经热空气处理的橄榄果实冷害指数在整个冷藏期间呈缓慢增加的趋势。统计分析表明,在整个冷藏期间的同一贮藏时期,经热空气处理的橄榄果实冷害指数都显著 ( $P < 0.05$ ) 低于对照。上述结果表明,38℃ 热空气处理 30 min 减轻了冷藏橄榄果实冷害的发生。

### 2.2 果实细胞膜透性

细胞膜透性可反映果实细胞膜结构的完整性,它可用细胞膜相对电导率大小来表示<sup>[12]</sup>。由图 2 可知,对照橄榄果实细胞膜相对电导率随着冷藏时间的延长而增加,但在不同贮藏时期,果实细胞膜相对电导率变化不同;其中在冷藏 0—40 d 内,果实细胞膜相对

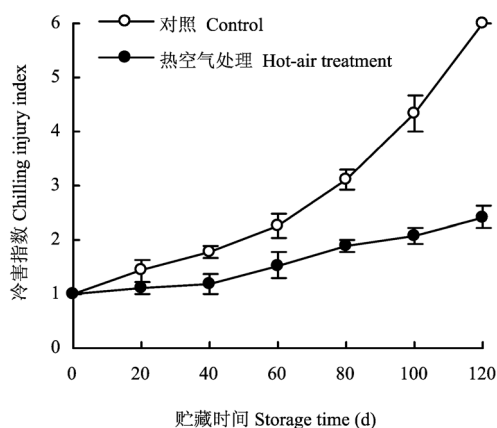


图 1 热空气处理对冷藏橄榄果实冷害指数的影响

Fig. 1 Effects of hot-air treatment on chilling injury index of Chinese olive fruits during cold storage

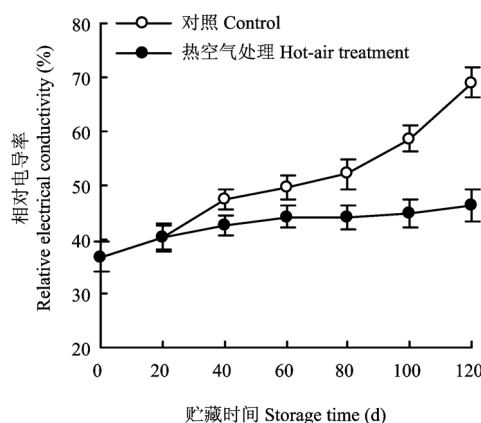


图 2 热空气处理对冷藏橄榄果实细胞膜相对电导率的影响

Fig. 2 Effects of hot-air treatment on relative electrical conductivity of cell membrane of Chinese olive fruits during cold storage

电导率较快增加,40—80 d 内缓慢增加,之后快速增加。而经热空气处理的橄榄果实细胞膜相对电导率在整个冷藏期间呈缓慢增加的趋势。统计分析表明,经热空气处理的橄榄果实细胞膜相对电导率在 40—120 d 内显著 ( $P < 0.05$ ) 低于对照。上述结果表明,38℃ 热空气处理 30 min 能较好地保持冷藏橄榄果实细胞膜结构的完整性。

### 2.3 果脂氧化酶 (LOX) 活性

由图 3 可知,对照橄榄果实果皮 LOX 活性在冷

藏 0—20 d 内快速上升, 20—40 d 内略有下降, 40—100 d 内平缓上升, 冷藏到第 100 天时 LOX 活性达到最高值, 之后快速下降。而经热空气处理的橄榄果皮 LOX 活性在冷藏 0—20 d 内平缓上升, 20—60 d 内较快下降, 60—100 d 内快速升高, 之后变化不大。进一步分析发现, 在冷藏 0—100 d 内, 经热空气处理的橄榄果皮 LOX 活性显著 ( $P<0.05$ ) 低于对照。上述结果表明, 38℃热空气处理 30 min 抑制了冷藏橄榄果实果皮 LOX 活性的上升。

由图 3 还发现, 对照橄榄果实冷藏至 120 d 时, 其果皮 LOX 活性低于热空气处理的橄榄果实, 这可能与对照橄榄果实冷藏至 120 d 时冷害症状发生严重 (图 1) 而导致细胞代谢紊乱、酶系统破坏有关。

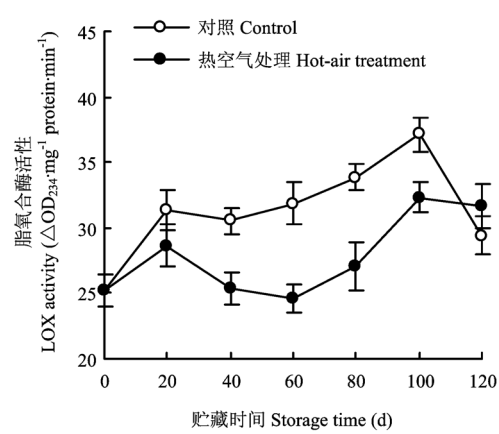


图 3 热空气处理对冷藏橄榄果实果皮脂氧合酶 (LOX) 活性的影响

Fig. 3 Effects of hot-air treatment on lipoxxygenase (LOX) activity in pericarp of Chinese olive fruits during cold storage

2.4 果皮膜脂脂肪酸组分及其比例

脂肪酸是生物膜的重要组分, 膜的稳定性由脂肪酸的相对含量及其比例决定<sup>[15]</sup>。由表可知, 采收当天未经热空气处理的‘檀香’橄榄果实果皮膜脂脂肪酸组分有肉豆蔻酸 (C<sub>14:0</sub>)、棕榈酸 (C<sub>16:0</sub>)、硬脂酸 (C<sub>18:0</sub>)、棕榈油酸 (C<sub>16:1</sub>)、油酸 (C<sub>18:1</sub>)、亚油酸 (C<sub>18:2</sub>)、亚麻酸 (C<sub>18:3</sub>), 相对含量由高到低的顺序为油酸(26.6%)>亚麻酸(25.5%)>棕榈酸(25.3%)>亚油酸(10.4%)>棕榈油酸(9.1%)>肉豆蔻酸(2.1%)>硬脂酸(1.0%)。进一步分析发现, 刚采收的橄榄果实果皮膜脂脂肪酸以不饱和脂肪酸 (棕榈

油酸、油酸、亚油酸和亚麻酸) 为主, 占 71.6%, 而饱和脂肪酸 (肉豆蔻酸、棕榈酸和硬脂酸) 含量仅占 28.4%。

表 采收当天‘檀香’橄榄果实果皮膜脂脂肪酸组分和相对含量

Table Constituents and relative contents of fatty acid of membrane lipids in pericarp of ‘Tanxiang’ Chinese olive fruits at the day of harvesting

| 类别                | 膜脂脂肪酸组分                                  | 相对含量                 |
|-------------------|--|----------------------|
| Category          | Fatty acid constituent of membrane lipid | Relative content (%) |
| C <sub>14:0</sub> | 肉豆蔻酸 Myristic acid                       | 2.1±0.070            |
| C <sub>16:0</sub> | 棕榈酸 Palmitic acid                        | 25.3±0.11            |
| C <sub>18:0</sub> | 硬脂酸 Stearic acid                         | 1.0±0.017            |
| C <sub>16:1</sub> | 棕榈油酸 Palmitoleic acid                    | 9.1±0.15             |
| C <sub>18:1</sub> | 油酸 Oleic acid                            | 26.6±0.29            |
| C <sub>18:2</sub> | 亚油酸 Linoleic acid                        | 10.4±0.13            |
| C <sub>18:3</sub> | 亚麻酸 Linolenic acid                       | 25.5±0.41            |

“C<sub>m,n</sub>”中 m 和 n 分别表示脂肪酸的碳原子数目及不饱和键的数目, 如 C<sub>16:1</sub> 表示棕榈油酸中的碳原子数为 16, 不饱和键数为 1  
m and n in “C<sub>m,n</sub>” respectively represented carbon atom number and unsaturated bond number in fatty acid, for example, C<sub>16:1</sub> representing there were 16 carbon atom numbers and 1 unsaturated bond number in palmitoleic acid

由图 4-A 可知, 经热空气处理的橄榄果实果皮肉豆蔻酸 (C<sub>14:0</sub>) 相对含量在冷藏 0—20 d 内略有下降, 20—60 d 内较快上升, 冷藏到第 60 天时达到最大值, 之后下降, 而在 100—120 d 内快速升高。进一步分析发现, 在冷藏 20—120 d 内的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮肉豆蔻酸相对含量极显著 ( $P<0.01$ ) 低于对照。

由图 4-B 可知, 经热空气处理的橄榄果实果皮棕榈酸 (C<sub>16:0</sub>) 相对含量在冷藏 0—40 d 内较快上升, 40—60 d 内较快下降, 60—100 d 内略有升高, 之后快速下降。进一步分析发现, 在冷藏 40—120 d 内的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮棕榈酸相对含量显著 ( $P<0.05$ ) 低于对照。

由图 4-C 可知, 经热空气处理的橄榄果实果皮硬脂酸 (C<sub>18:0</sub>) 相对含量在冷藏 0—20 d 内略有下降, 20—60 d 内快速升高, 冷藏到第 60 天时达到最大值, 之后快速下降, 而在 80—100 d 内较快升高, 之后略有下降。进一步分析发现, 在冷藏 20—80 d 内的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮硬脂酸相对含量显著 ( $P<0.05$ ) 低于对照。

由图 4-D 可知, 经热空气处理的橄榄果实果皮棕榈油酸 (C<sub>16:1</sub>) 相对含量在冷藏 0—20 d 内略有增加,

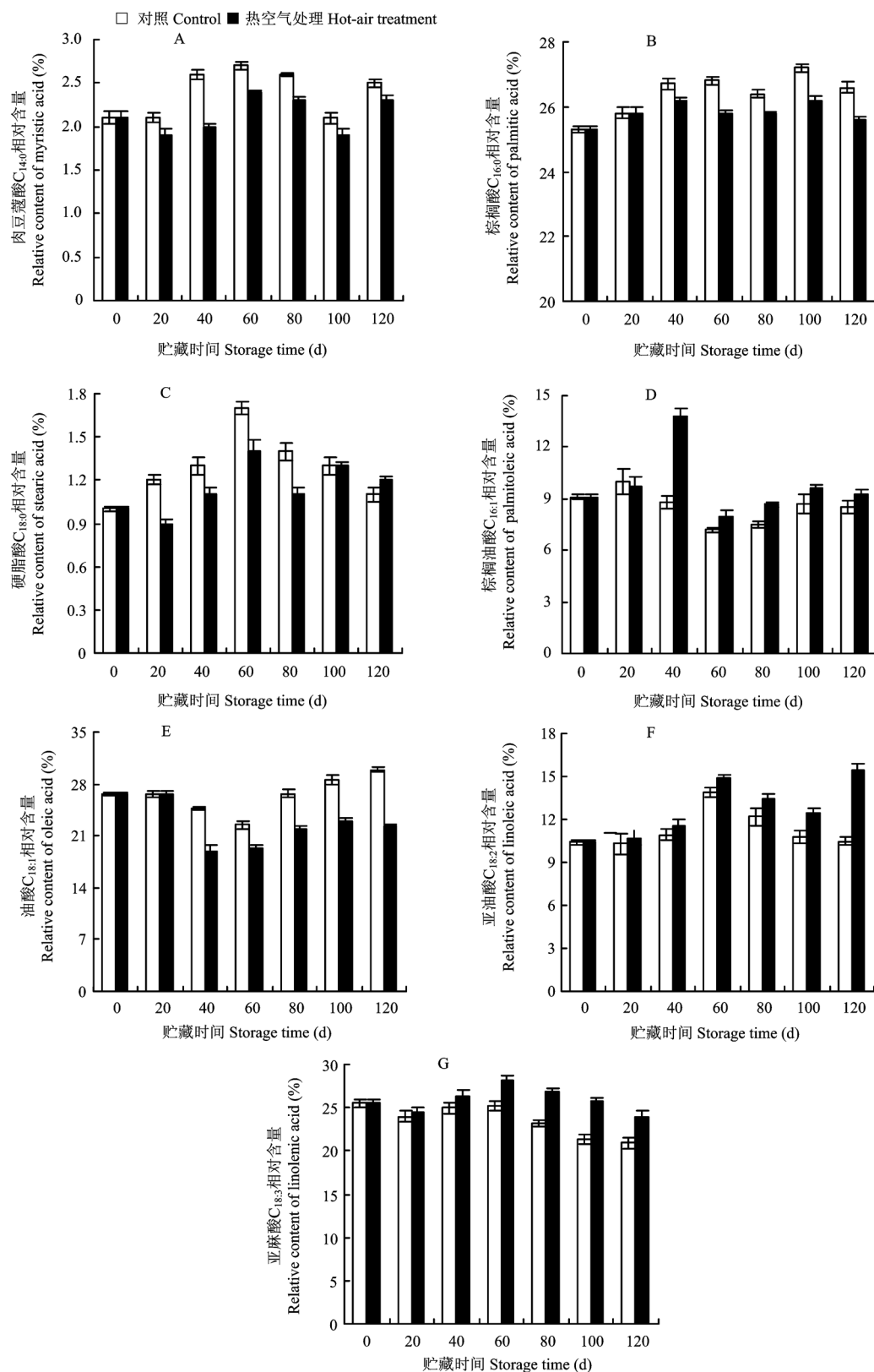


图 4 热空气处理对冷藏橄榄果实果皮膜脂脂肪酸组分的影响

Fig. 4 Effects of hot-air treatment on fatty acid constituents of membrane lipids in pericarp of Chinese olive fruits during cold storage

而在 20—40 d 内快速升高, 冷藏到第 40 天时达到最大值, 其相对含量为 13.8%; 40—60 d 内快速下降, 60—100 d 内缓慢升高, 之后变化不大。进一步分析发现, 在冷藏 40—120 d 内的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮棕榈油酸相对含量都高于对照。如冷藏到第 40 天时, 经热空气处理的橄榄果实果皮棕榈油酸相对含量是对照果实的 1.57 倍, 两者间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

由图 4-E 可知, 经热空气处理的橄榄果实果皮油酸 ( $C_{18:1}$ ) 相对含量在冷藏 0—20 d 内变化不大, 20—40 d 内快速下降, 40—100 d 内缓慢升高, 之后略有下降。进一步分析发现, 在冷藏 40—120 d 的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮油酸相对含量显著 ( $P < 0.05$ ) 低于对照。

由图 4-F 可知, 经热空气处理的橄榄果实果皮亚油酸 ( $C_{18:2}$ ) 相对含量在冷藏 0—40 d 内缓慢升高, 40—60 d 内快速升高, 60—100 d 内缓慢下降, 100—120 d 内急剧升高。进一步分析发现, 在冷藏 20—120 d 的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮亚油酸相对含量都高于对照。如冷藏到第 120 天时, 经热空气处理的橄榄果实果皮亚油酸相对含量是对照果实的 1.47 倍, 两者间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

由图 4-G 可知, 经热空气处理的橄榄果实果皮亚麻酸 ( $C_{18:3}$ ) 相对含量在冷藏 0—20 d 内略有下降, 20—60 d 内缓慢上升, 之后缓慢下降。进一步分析发现, 在冷藏 40—120 d 的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮亚麻酸相对含量均显著 ( $P <$

0.05) 高于对照。

上述结果表明, 与对照橄榄果实比, 热空气处理的果实肉豆蔻酸 ( $C_{14:0}$ )、棕榈酸 ( $C_{16:0}$ )、硬脂酸 ( $C_{18:0}$ ) 等饱和脂肪酸相对含量下降, 而棕榈油酸 ( $C_{16:1}$ )、亚油酸 ( $C_{18:2}$ ) 和亚麻酸 ( $C_{18:3}$ ) 等不饱和脂肪酸相对含量增加, 表明 38℃ 热空气处理 30 min 诱导了冷藏橄榄果实膜脂脂肪酸组分的改变。

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。由图 5-A 可知, 对照橄榄果实果皮 IUFA 值在冷藏 0—20 d 内略有下降, 20—60 d 内缓慢升高, 之后快速下降。而经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮 IUFA 值在冷藏 0—20 d 内略有下降, 20—60 d 内快速升高, 冷藏到第 60 天时达到最大值, 之后较快下降。进一步分析发现, 在冷藏 40—120 d 的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮 IUFA 值极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于对照。

膜脂脂肪酸不饱和度是衡量膜脂脂肪酸不饱和程度的另一个重要指标, 它可反映膜脂脂肪酸的构成和比例变化。由图 5-B 可知, 对照橄榄果实果皮膜脂脂肪酸不饱和度在冷藏 0—60 d 内快速下降, 60—80 d 内略有增加, 之后变化不大。而经热空气处理的橄榄果实果皮膜脂脂肪酸不饱和度在冷藏 0—60 d 内呈缓慢下降的趋势, 之后变化不大。进一步分析发现, 在冷藏 20—120 d 的同一贮藏时间, 经热空气处理的冷藏橄榄果实果皮膜脂脂肪酸不饱和度都极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于对照。

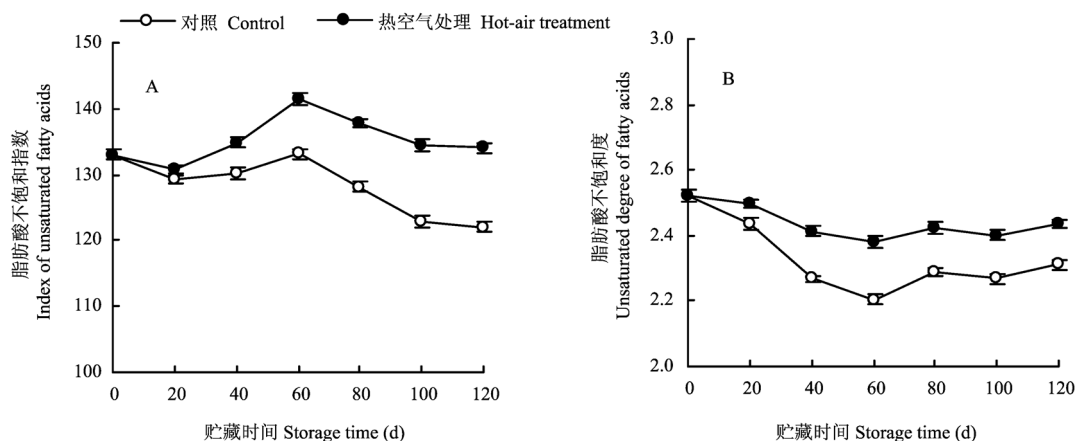


图 5 热空气处理对冷藏橄榄果实果皮脂肪酸不饱和指数 (IUFA) 和脂肪酸不饱和度的影响

Fig. 5 Effects of hot-air treatment on index of unsaturated fatty acids (IUFA) and unsaturated degree of fatty acids in pericarp of Chinese olive fruits during cold storage

上述结果表明, 38℃热空气处理 30 min 提高了冷藏橄榄果实果皮膜脂脂肪酸的不饱和程度, 从而增大膜的流动性。

### 3 讨论

#### 3.1 橄榄果实冷害发生与脂氧合酶活性和膜脂脂肪酸组分的关系

冷害促进植物体内 LOX 活性增强, 启动细胞膜的膜脂过氧化作用; LOX 以不饱和脂肪酸为底物, 专一催化含顺, 顺-1,4-戊二烯结构的多元不饱和脂肪酸(以亚油酸或亚麻酸为主)的加氧反应, 生成具有共轭双键的过氧化氢物, 降低膜脂脂肪酸的不饱和程度, 加剧对植物组织细胞结构和功能的破坏<sup>[16-20]</sup>。橄榄是冷敏型果实, 在 6℃以下贮藏即发生冷害<sup>[1-2]</sup>。本研究发现, 橄榄果实在 2℃冷藏期间果皮 LOX 活性上升(图 3), 棕榈油酸(C<sub>16:1</sub>)、亚油酸(C<sub>18:2</sub>)和亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)等不饱和脂肪酸相对含量下降(图 4-D、图 4-F、图 4-G), 而肉豆蔻酸(C<sub>14:0</sub>)、棕榈酸(C<sub>16:0</sub>)、硬脂酸(C<sub>18:0</sub>)等饱和脂肪酸相对含量增加(图 4-A、图 4-B、图 4-C), 膜脂脂肪酸不饱和指数(IUFA)(图 5-A)和膜脂脂肪酸不饱和度(图 5-B)下降, 表明膜的流动性下降。这些结果与膜完整性的丧失(图 2)和冷害发生(图 1)一致。因此认为, 橄榄果实凹陷褐斑等冷害症状的出现是不适宜的低温冷藏引起果实 LOX 活性增强、促进不饱和脂肪酸的降解而破坏细胞膜结构完整性的结果。

本研究还发现, 对照橄榄果实果皮 LOX 活性(图 3)与亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)相对含量(图 4-G)呈极显著( $P < 0.01$ )负相关(相关系数  $r = -0.969$ ), 而与棕榈油酸(C<sub>16:1</sub>)、亚油酸(C<sub>18:2</sub>)等不饱和脂肪酸相对含量没有明显的相关性( $P > 0.05$ )。据此认为, 橄榄果实亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)是 LOX 的主要作用底物, 这与罗自生<sup>[10]</sup>在柿果上的研究结果类似。

进一步分析发现, 对照橄榄果实在冷藏期间, 其果皮棕榈油酸(C<sub>16:1</sub>)、亚油酸(C<sub>18:2</sub>)和亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)等不饱和脂肪酸相对含量虽然下降(图 4-D、图 4-F、图 4-G), 但橄榄果实冷害指数(图 1)与棕榈油酸(C<sub>16:1</sub>)、亚油酸(C<sub>18:2</sub>)的相对含量没有明显的相关性( $P > 0.05$ ), 只与亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)相对含量(图 4-G)呈极显著( $P < 0.01$ )负相关(相关系数  $r = -0.925$ )。据此认为, 橄榄果实冷害发生程度与果皮亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)相对含量的降低密切相关, 这与柿果、桃果的研究结果相一致<sup>[10,21]</sup>。

#### 3.2 热空气处理诱导冷藏橄榄果实抗冷性的可能机理

采后果实抗冷性与膜脂脂肪酸的不饱和程度、膜的流动性及相变温度密切相关; 当膜脂脂肪酸中不饱和脂肪酸相对含量高时, 膜的流动性较大, 膜的相变温度较低, 果实的抗冷性较强<sup>[22-23]</sup>。前人研究认为, 热处理能抑制果蔬 LOX 活性、改变膜脂脂肪酸组分及相对含量, 表现为饱和脂肪酸相对含量下降、不饱和脂肪酸相对含量增加, 提高了膜脂脂肪酸的不饱和程度; 同时, 热处理增加了膜的流动性, 降低了细胞膜透性, 通过维持细胞膜结构的完整性来提高果蔬抗冷性, 从而减轻冷藏果蔬冷害的发生<sup>[4-5,8-10,21,24-26]</sup>。

本研究发现, 38℃热空气处理 30 min 会降低 2℃下冷藏橄榄果实的冷害指数(图 1), 抑制果皮 LOX 活性上升(图 3), 提高棕榈油酸(C<sub>16:1</sub>)、亚油酸(C<sub>18:2</sub>)和亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)等不饱和脂肪酸相对含量(图 4-D、图 4-F、图 4-G), 降低肉豆蔻酸(C<sub>14:0</sub>)、棕榈酸(C<sub>16:0</sub>)、硬脂酸(C<sub>18:0</sub>)等饱和脂肪酸相对含量(图 4-A、图 4-B、图 4-C), 提高膜脂脂肪酸不饱和指数(IUFA)(图 5-A)和膜脂脂肪酸不饱和度(图 5-B), 抑制细胞膜相对电导率的增加(图 2)。据此认为, 热空气处理降低了果皮中 LOX 活性、抑制不饱和脂肪酸降解、维持较高的膜脂脂肪酸不饱和程度和较大膜流动性, 使膜发生相变的温度较低, 从而增强冷藏橄榄果实的抗冷性。因此, 热空气处理能减轻冷藏橄榄果实冷害的发生。

### 4 结论

(2±1)℃冷藏会促进橄榄果实果皮 LOX 活性上升, 降低果皮棕榈油酸(C<sub>16:1</sub>)、亚油酸(C<sub>18:2</sub>)和亚麻酸(C<sub>18:3</sub>)等不饱和脂肪酸相对含量, 增加果皮肉豆蔻酸(C<sub>14:0</sub>)、棕榈酸(C<sub>16:0</sub>)、硬脂酸(C<sub>18:0</sub>)等饱和脂肪酸相对含量, 从而降低果皮膜脂脂肪酸的不饱和程度, 导致果实抗冷性下降, 促进橄榄果实冷害的发生; 38℃热空气处理 30 min 通过降低(2±1)℃下冷藏橄榄果实果皮 LOX 活性而减少膜脂不饱和脂肪酸的降解, 维持较高的膜脂脂肪酸不饱和程度, 从而增强橄榄果实抗冷性、减轻冷藏橄榄果实冷害的发生。

#### References

- [1] 林河通, 傅虬声, 洪启征. 橄榄果实的冷藏适温与冷害初报. 福建农业大学学报, 1996, 25(4): 485-489.

- Lin H T, Fu Q S, Hong Q Z. Preliminary report of optimum cold storage temperature for Chinese olive fruits and chilling injury to them. *Journal of Fujian Agricultural University*, 1996, 25(4): 485-489. (in Chinese)
- [2] 林河通, 陈 莲, 陈绍军, 林娇芬, 赵云峰. 橄榄果实采后生物学研究进展. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2005, 34(4): 464-469.
- Lin H T, Chen L, Chen S J, Lin J F, Zhao Y F. Advances in the post-harvest biology of Chinese olive fruit. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2005, 34(4): 464-469. (in Chinese)
- [3] Marangoni A G, Palma T, Stanley D W. Membrane effects in postharvest physiology. *Postharvest Biology and Technology*, 1996, 7(3): 193-217.
- [4] Promyou S, Ketsa S, van Doorn W G. Hot water treatments delay cold-induced banana peel blackening. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 48(1): 132-138.
- [5] Mirdehghan S H, Rahemi M, Martínez-Romero D, Guillén F, Valverde J M, Zapata P J, Serrano M, Valero D. Reduction of pomegranate chilling injury during storage after heat treatment: Role of polyamines. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 44(1): 19-25.
- [6] Lurie S, Crisosto C H. Chilling injury in peach and nectarine. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37(3): 195-208.
- [7] Ferguson I B, Ben-Yehoshua S, Mitcham E J, McDonald R E, Lurie S. Postharvest heat treatments: introduction and workshop summary. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 21(1): 1-6.
- [8] Wang C Y, Kramer G F, Whitaker B D, Lusby W R. Temperature preconditioning increases tolerance to chilling injury and alters lipid composition in zucchini squash. *Journal of Plant Physiology*, 1992, 140(2): 229-235.
- [9] Lurie S, Laamim M, Lapsker Z, Fallik E. Heat treatments to decrease chilling injury in tomato fruit. Effects on lipids, pericarp lesions and fungal growth. *Physiologia Plantarum*, 1997, 100(2): 297-302.
- [10] 罗自生. 热激减轻柿果冷害及其与脂氧合酶的关系. 果树学报, 2006, 23(3): 454-457.
- Luo Z S. Relationship between heat shock alleviating chilling injury and lipoxygenase of persimmon fruit. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(3): 454-457. (in Chinese)
- [11] 陈 莲. 低温引起橄榄果实冷害褐变的生理生化机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2006: 28.
- Chen L. Physiological and biochemical mechanism of browning development induced by low temperature in Chinese olive fruit[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2006: 28. (in Chinese)
- [12] 林河通, 席珣芳, 陈绍军. 龙眼果实采后失果皮褐变与活性氧及酚类代谢的关系. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(3): 287-297.
- Lin H T, Xi Y F, Chen S J. The relationship between the desiccation-induced browning and the metabolism of active oxygen and phenolics in pericarp of postharvest longan fruit. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(3): 287-297. (in Chinese)
- [13] 陈昆松, 徐昌杰, 许文平, 吴 敏, 张上隆. 猕猴桃和桃果实脂氧合酶活性测定方法的建立. 果树学报, 2003, 20(6): 436-438.
- Chen K S, Xu C J, Xu W P, Wu M, Zhang S L. Improved method for detecting lipoxygenase activity from kiwifruit and peach fruit. *Journal of Fruit Science*, 2003, 20(6): 436-438. (in Chinese)
- [14] 陈 莲, 林河通, 陈艺晖, 林艺芬, 陈绍军. 2,4-二硝基苯酚对采后龙眼果皮脂氧合酶活性和膜脂脂肪酸组分的影响. 热带亚热带植物学报, 2009, 17(5): 477-482.
- Chen L, Lin H T, Chen Y H, Lin Y F, Chen S J. Effects of 2,4-dinitrophenol on lipoxygenase activity and fatty acid constituents of membrane lipids in pericarp of harvested longan fruits. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2009, 17(5): 477-482. (in Chinese)
- [15] 高 慧, 饶景萍. 冷害对贮藏油桃膜脂脂肪酸及相关酶活性的影响. 西北植物学报, 2007, 27(4): 710-714.
- Gao H, Rao J P. Effect of chilling injury on membrane fatty acid and enzymatic activity of stored nectarines. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(4): 710-714. (in Chinese)
- [16] 生吉萍, 申 琳, 罗云波. 果蔬成熟和衰老中的重要酶—脂氧合酶. 果树科学, 1999, 16(1): 72-77.
- Sheng J P, Shen L, Luo Y B. Lipoxygenases—Important enzymes in the ripening and senescence of fruits and vegetables. *Journal of Fruit Science*, 1999, 16(1): 72-77. (in Chinese)
- [17] Stark G. Functional consequences of oxidative membrane damage. *Journal of Membrane Biology*, 2005, 205(1): 1-16.
- [18] Liavonchanka A, Feussner I. Lipoxygenases: occurrence, functions and catalysis. *Journal of Plant Physiology*, 2006, 163(3): 348-357.
- [19] Boonsiri K, Ketsa S, van Doorn W G. Seed browning of hot peppers during low temperature storage. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 45(3): 358-365.
- [20] 左进华, 陈安均, 孙爱东, 罗云波, 朱本忠. 番茄果实成熟衰老相关因子研究进展. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2724-2734.
- Zuo J H, Chen A J, Sun A D, Luo Y B, Zhu B Z. Research progress on the factors related to tomato fruit ripening and senescence. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (13): 2724-2734. (in Chinese)



- [21] 王阳光, 茅林春, 陆胜明. 热处理对桃果实的酶活性变化及膜脂肪酸的影响. 食品科学, 2001, 22(4): 72-74.  
Wang Y G, Mao L C, Lu S M. Effects of heat treatment on enzymes and fatty acid of peach. *Journal Food Science*, 2001, 22(4):72-74. (in Chinese)
- [22] Zhang C F, Tian S P. Crucial contribution of membrane lipids' unsaturation to acquisition of chilling-tolerance in peach fruit stored at 0°C. *Food Chemistry*, 2009, 115(2): 405-411.
- [23] 闫师杰, 梁丽雅, 陈计峦, 李晓丹, 胡小松. 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. 农业工程学报, 2010, 26(8): 356-362.  
Yan S J, Liang L Y, Chen J L, Li X D, Hu X S. Effects of different cooling methods on core browning and membrane fatty acid components of postharvest Yali pears with different harvest periods. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 356-362. (in Chinese)
- [24] Zhang J H, Huang W D, Pan Q H, Liu Y P. Improvement of chilling tolerance and accumulation of heat shock proteins in grape berries (*Vitis vinifera* cv. Jingxiu) by heat pretreatment. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 38(1): 80-90.
- [25] 乔勇进, 冯双庆, 李丽萍, 张绍铃, 刘招龙. 热处理、多胺处理对黄瓜膜脂肪酸变化的影响. 食品科学, 2006, 27(5): 246-249.  
Qiao Y J, Feng S Q, Li L P, Zhang S L, Liu Z L. Effects on changing of membrane fatty acid in cucumber by heat and polyamine treatment. *Journal Food Science*, 2006, 27(5): 246-249. (in Chinese)
- [26] Ghasemnezhad M, Marsh K, Shilton R, Babalar M, Woolf A. Effect of hot water treatments on chilling injury and heat damage in 'satsuma' mandarins: Antioxidant enzymes and vacuolar ATPase, and pyrophosphatase. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 48(3): 364-371.

(责任编辑 曲来娥)