

# 不同低温贮藏对荔枝 $\gamma$ -氨基丁酸富集及贮藏品质的影响

周沫霖, 胡卓炎, 赵雷, 余小林, 周凯  
(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 本研究以“桂味”荔枝为试材, 探究了冰温贮藏、低温驯化结合冰温贮藏、冷藏三种贮藏方式对荔枝 GABA 富集的影响, 并比较了贮藏期间荔枝质地、色差、感官品质等指标的变化。结果表明: 荔枝低温驯化结合冰温贮藏的 GABA 含量显著增加, 且能维持较高水平, 最高达 15.65 mmol/kg FW, 较未低温处理荔枝提高了 2.49 倍; GABA 含量与 GAD 活力变化呈正相关、与 GABA-T 活力变化趋势基本相反, 表明荔枝 GABA 富集主要是由于 GAD 活力上升、GABA-T 活力下降所引起的; 低温驯化结合冰温贮藏的荔枝其可溶性蛋白、果肉硬度、果皮色泽、感官品质均显著优于直接冰温贮藏和冷藏的样品; 荔枝直接冰温贮藏将会出现严重冷害, 使其丧失商品价值。低温驯化结合冰温贮藏有利于荔枝 GABA 的富集及品质的保持, 是一种适合荔枝的贮藏方式。

**关键词:** 荔枝; 贮藏;  $\gamma$ -氨基丁酸; 富集; 品质

文章编号: 1673-9078(2016)3-189-196

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.3.031

## Effect of Different Low-temperature Storage Methods on $\gamma$ -Aminobutyric Acid Accumulation and Storage Quality of Litchi

ZHOU Mo-lin, HU Zhuo-yan, ZHAO Lei, YU Xiao-lin, ZHOU Kai

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** *Litchi chinensis* Sonn. cv. Guiwei was analyzed to test the effects of ice-temperature storage, cold acclimation combined with ice-temperature storage, and cold storage on  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in litchi. Changes in the texture, color, and sensory qualities of litchi during the storage period were compared. The results showed that GABA concentration in fruits increased significantly from cold acclimation combined with ice-temperature storage; the high concentration was maintained and the peak concentration (15.65 mmol/kg FW) was 2.49-fold higher than that of the sample without cold-storage treatment. GABA concentration was positively correlated with glutamate decarboxylase (GAD; EC 4.1.1.15) activity, and showed an opposite trend with the variation in GABA transaminase (GABA-T; EC 2.6.1.19) activity. This indicates that GABA accumulation in litchi results mainly from increased GAD activity and decreased GABA-T activity. The total soluble protein, fresh firmness, pericarp color, and sensory quality of litchi fruits subjected to cold acclimation combined with ice-temperature storage were significantly better than those of fruits subjected to ice-temperature storage or cold storage. Litchi fruits may exhibit chilling injury in ice-temperature storage without cold-acclimation, decreasing their commercial value. Cold acclimation combined with ice-temperature storage favors GABA accumulation and quality maintenance, showing to be a suitable method for storing litchi fruits.

**Key words:** litchi; storage;  $\gamma$ -aminobutyric acid; accumulation; quality

$\gamma$ -氨基丁酸 (GABA) 是一种广泛存在于脊椎动物、植物、细菌中的四碳非蛋白氨基酸, 但是其含量往往非常低。有学者认为, 低温会诱导植物防御反应, 而 GABA 富集作为植物系统应对非生物逆境的一种应激反应, 在低温环境下, 植物可能通过提高谷氨酸

收稿日期: 2015-04-29

基金项目: 国家荔枝龙眼产业技术体系项目 (GARS-33); 广东省科技计划项目 (2013B020502012); 广东省科技计划项目 (2015A020209143)

作者简介: 周沫霖 (1988-), 男, 博士研究生, 研究方向: 食品加工与保藏

通讯作者: 胡卓炎 (1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与保藏

脱羧酶 (GAD; EC 4.1.1.15) 活性、降低  $\gamma$ -氨基丁酸转氨酶 (GABA-T; EC 2.6.1.19) 活性实现 GABA 富集, 抑制冷害指数增加<sup>[1-2]</sup>。有研究表明, GABA 是脊椎动物神经系统中最主要的抑制性神经递质, 主要通过超极化和分路抑制来降低神经的活动性, 具有舒缓情绪的功效<sup>[3]</sup>。此外, GABA 还具有抗焦虑、抗抑郁、抗过敏、抗癌、降血压、促进尿钠排泄以及调节激素分泌等功能性<sup>[4]</sup>。

冰温贮藏能够使果蔬处于 0 °C 以下, 且未开始结冰, 这有利于 GABA 的富集。同时, 作为继冷藏和气

调贮藏之后的第三代保鲜技术,冰温贮藏可维持细胞活体状态,以抑制呼吸及有害微生物活动,也可避免冻结食品因冰晶带来的蛋白质变性、细胞破坏、组织结构损伤、汁液流失等现象<sup>[5]</sup>。已有学者探讨了冰温贮藏对荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 保鲜效果的影响,发现冰温贮藏能够抑制果实的呼吸速率、乙烯释放率以及多酚氧化酶、过氧化物酶和花色素苷酶活性,并且能够延缓果肉营养成分的损失<sup>[6]</sup>,但荔枝作为冷敏性水果,在冰温贮藏条件下容易产生冷害,有学者提出采用低温驯化可提高果蔬抗冻能力,使其更好地适应贮藏温度,避免或延缓冷害的发生<sup>[7]</sup>。

本文以荔枝为试材,通过分析冰温贮藏、低温驯化结合冰温贮藏和冷藏(4℃)三种不同低温贮藏中荔枝 GABA 含量及相关酶活力的变化,并分析质构、色差、感官品质等贮藏指标,研究不同低温贮藏对荔枝 GABA 富集及贮藏品质的影响。为获得既能促进荔枝 GABA 富集又能保持其优良品质的冷藏技术提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

荔枝鲜果:品种为“桂味”,于2014年6月29日采摘于华南农业大学园艺学院校内试验果园,选择色泽、大小均一的荔枝,去除病虫果、机械损伤果,1h内置于 $4 \pm 1$ ℃的冷库预冷,待用。

GABase、NADP<sup>+</sup>、NAD<sup>+</sup>、Tris-Cl、 $\gamma$ -氨基丁酸、 $\alpha$ -酮戊二酸、二硫苏糖醇、磷酸吡哆醛、苯甲基磺酰氟、丙酮酸、L-丙氨酸脱氢酶, Sigma-Aldrich 公司; Miracloth 滤膜, Calbiochem 公司; 氯化镧、焦磷酸钾、L-谷氨酸、丙氨酸、磺基水杨酸、2-巯基乙醇、乙二胺四乙酸、考马斯亮蓝 G-250、牛血清白蛋白等均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

RS232 高低温交变湿热试验箱,广州市成诚试验设备厂; OSR 光纤探头测温系统, FISO Technologies 公司; MIR-254 低温恒温培养箱, Panasonic 公司; CM-3500d 色差仪, Minolta 公司; TA500 质构仪, Lloyd Instruments 公司; UVmini-1240 紫外可见分光光度计, Shimadzu 公司。

### 1.3 实验设计

#### 1.3.1 荔枝果肉冰点温度测定

根据预实验结果,将测温光纤探头 FISO FOT-L

插入荔枝果肉中心,并放入高低温交变湿热试验箱,箱内设定温度为-30℃,温度采集时间间隔为6s,绘制样品从3℃开始的温度下降曲线,在348s到达过冷点(-3.38℃),随后因部分水分冻结,释放潜热使温度上升。在444s温度升至-2.65℃后,温度趋于平衡,即热交换达到动态平衡,该温度即为荔枝果肉的冰点温度。

#### 1.3.2 低温贮藏及低温驯化处理

冰温贮藏:考虑低温贮藏箱温度波动( $\pm 0.5$ ℃)及安全余量等因素,结合1.3.1荔枝果肉冰点温度测定结果和荔枝冰温贮藏标准<sup>[8]</sup>,将冰温贮藏温度设为-1℃,略高于冰点温度,相对湿度为85%。

低温驯化结合冰温贮藏:荔枝冰温贮藏前进行低温驯化处理,驯化过程如下:

4℃  $\xrightarrow{10\text{h}}$  2℃  $\xrightarrow{10\text{h}}$  0℃  $\xrightarrow{10\text{h}}$  -0.5℃  $\xrightarrow{10\text{h}}$  -1℃

冷藏:温度设为4℃,相对湿度为85%。

各处理荔枝果实采用开孔率为5%的聚乙烯袋包装,每袋约装500g。

### 1.4 检测指标及方法

贮藏期间,在驯化处理后取样一次,以后每隔7d取样一次,每次随机取样15颗。鲜果取出后,室温放置约1h,测定果皮色差,随后去皮核,果肉沿果蒂方向纵切成两半。一半果肉液氮研磨,用于测定可溶性蛋白、GABA含量及其相关酶酶活。另一半果肉用于测定质构、果肉色差、感官品质。每个指标做3次重复,取平均值。

#### 1.4.1 GABA 测定

GABA含量测定参考Zhang和Bown的方法<sup>[9]</sup>,并作部分修改。称取100mg样品置于0.4mL甲醇中提取10min。冻干,并溶解于1mL70mM氯化镧,振荡15min,10000r/min离心5min。取0.8mL上清液与0.16mL1M氢氧化钾混合,振荡5min,10000r/min离心5min,再取上清液用于GABA测定。GABA含量以NADP<sup>+</sup>减少量表征,1mL用于测定的混合物包括0.6mM NADP<sup>+</sup>、0.1unit GABase、0.1M焦磷酸钾缓冲液(pH8.6)、1mM $\alpha$ -酮戊二酸、0.55mL上清液。添加 $\alpha$ -酮戊二酸,并置于室温下反应10min,此操作前后,使用紫外分光光度计在340nm测定吸光度。以GABA标准品绘制标准曲线( $0 \sim 2 \times 10^{-3}$ M),计算GABA含量。

#### 1.4.2 GAD、GABA-T 酶活测定

酶提取物通过缓冲液提取,该缓冲液包括0.1M Tris-Cl(pH9.1)、10%(V/V)丙三醇、1mM二硫苏

糖醇 (DTT)、5 mM 乙二胺四乙酸 (EDTA)、0.5 mM 吡哆醛磷酸盐 (PLP)、1 mM 苯甲基磺酰氟 (PMSF)。称取 2 g 样品置于 6 mL 经过预冷的提取缓冲液中, 振荡 15 min, Miracloth 滤膜过滤, 14000 r/min 离心 30 min。取上清液用于 GAD 和 GABA-T 测定。

GAD 活力测定参考 Bartyze 等的方法<sup>[10]</sup>, 并作部分修改。酶活力通过 30 °C 下, 混合液反应 60 min 测定, 0.4 mL 混合液包括 0.1 M 磷酸钾缓冲液 (pH 5.8)、0.04 mM PLP、3 mM L-谷氨酸、0.2 mL 上清液。该反应通过添加 0.1 mL 0.5 M 盐酸终止。酶活力以 GABA 产量计算。

GABA-T 活力测定参考 Ansari 等的方法<sup>[11]</sup>, 并作部分修改。酶活力是通过 30 °C 下, 混合液反应 60 min 测定, 0.5 mL 混合液包括 50 mM Tris-Cl (pH 8.2)、1.5 mM DTT、0.75 mM EDTA、0.1 mM PLP、10% (V/V) 丙三醇、16 mM GABA、4 mM 丙酮酸、0.2 mL 上清液。该反应通过添加 0.05 mL 40 mM 磺基水杨酸终止。酶活力以丙氨酸产量计算, 以丙氨酸标准品绘制标准曲线 (0~5×10<sup>-3</sup> M), 通过丙氨酸脱氢酶的酶促反应确定丙氨酸产量。该反应在 25 °C 下, 混合液反应 10 min, 此操作前后, 在 340 nm 测定吸光度。1 mL 混合液中包括 50 mM 碳酸钠缓冲液 (pH 10)、1.5 mM NAD<sup>+</sup>、0.02 unit L-丙氨酸脱氢酶、0.2 mL 已终止反应液。

### 1.4.3 可溶性蛋白测定

可溶性蛋白含量根据 Bradford 的方法测定<sup>[12]</sup>, 以牛血清白蛋白标准品绘制标准曲线 (0~1 mg/mL)。

### 1.4.4 质构分析

荔枝鲜果置于室温中, 平衡 1 h。取已称重果肉切片 (大约 20 mm×20 mm×5.0 mm) 置于 Kramer 剪切槽, 探头下降速度为 100 mm/min, 检测果肉硬度。

### 1.4.5 色差分析

采用色差仪测定, 每个荔枝测 3 次色差 (底部及赤道面两侧各 1 次)。色差值表示为 CIE L\* (明度/暗度)、a\* (红色/绿色)、b\* (黄色/蓝色)<sup>[13]</sup>。

### 1.4.6 感官评价

荔枝感官评价使用模糊综合评价法, 由 10 名经过培训的具有食品专业背景的硕士研究生组成感官评价小组, 确定果皮色泽、果肉色泽、肉质、风味、汁液、香气为评价因素:

$U = \{u_1(\text{果皮色泽}), u_2(\text{果肉色泽}), u_3(\text{肉质}), u_4(\text{风味}), u_5(\text{汁液}), u_6(\text{香气})\}$

5 个水平被确定为评价水平:

$V = \{v_1(\text{优}), v_2(\text{良}), v_3(\text{中等}), v_4(\text{较差}), v_5(\text{差})\}$

建立模糊矩阵, 关联评价因素和评价水平:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} \end{bmatrix}$$

果皮色泽、果肉色泽、肉质、风味、汁液、香气的权重被确定为:

$A = \{a_1(\text{果皮色泽}), a_2(\text{果肉色泽}), a_3(\text{肉质}), a_4(\text{风味}), a_5(\text{汁液}), a_6(\text{香气})\}$

$= \{0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.1\}$

模糊综合评价的结果集为:

$B = A \cdot R = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6) \cdot$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$$

归一化组合索引值:

$B' = (b_1', b_2', b_3', b_4', b_5')$

根据感官评价的特殊性, 设各评语对应的分值为: 优 95 分, 良 87.5 分, 中等 82.5 分, 较差 75 分, 差 65 分, 建立模糊综合评分矩阵<sup>[14]</sup>:

$$Y = \begin{bmatrix} 95 \\ 87.5 \\ 82.5 \\ 75 \\ 65 \end{bmatrix}$$

模糊综合评价总分:

$$T = B' \cdot Y = (b_1', b_2', b_3', b_4', b_5') \cdot \begin{bmatrix} 95 \\ 87.5 \\ 82.5 \\ 75 \\ 65 \end{bmatrix}$$

## 1.5 数据分析

所有数据均使用 SPSS (version 19.0) 进行数据分析。

## 2 结果与讨论

## 2.1 不同低温贮藏对 GABA 含量的影响

不同低温贮藏对荔枝 GABA 含量的影响结果见图 1。

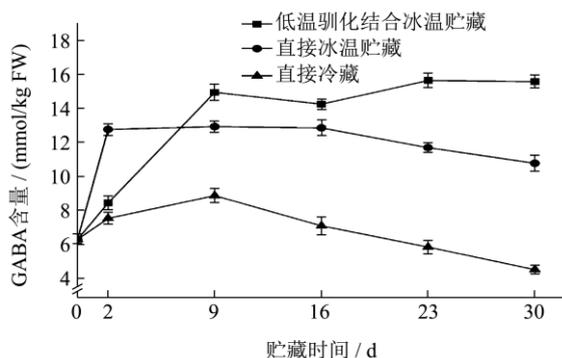


图 1 不同低温贮藏对 GABA 含量的影响

Fig.1 Effect of different low-temperature storage methods on GABA content

GABA 作为代谢产物参与了三羧酸循环的两个分路，它首先在 GAD 的催化下，通过 L-谷氨酸或其盐的不可逆的  $\alpha$ -脱羧反应合成。之后，GABA 在线粒体内的 GABA-T 的催化下，通过不可逆的转氨反应，转化为琥珀酸半醛<sup>[15]</sup>。如图 1 所示，在 0~2 d (第 0 d 为采摘当天，未低温处理的荔枝)，低温驯化结合冰温贮藏组 (以下简称驯化冰温组) 完成低温驯化过程，GABA 含量由 6.28 mmol/kg FW 上升至 8.43 mmol/kg FW，高于直接冷藏组 (以下简称冷藏组) (7.52 mmol/kg FW)，但低于直接冰温贮藏组 (以下简称冰温组) (12.76 mmol/kg FW)，这可能是由于 GABA 富集本身就是植物体内防御机制的应激反应，而低温驯化的温度高于直接冰温贮藏，低于直接冷藏。在贮藏期内，驯化冰温组的 GABA 富集量较高，最高达 15.65 mmol/kg FW (贮藏第 23 d)，较未低温处理的荔枝，提高了 2.49 倍。驯化冰温组先迅速上升，随后略有下降，再缓慢上升，最后趋于稳定，而冰温组、冷藏组总体上均呈下降趋势，这可能是由于相较直接冰温贮藏，低温驯化过程的温度降低较为平缓，导致 GAD 活力提高及 GABA-T 活力下降的速率也较缓，使得进入冰温贮藏阶段后，GAD 活力依然平缓上升，且 GABA-T 活力依然平缓下降；冰温组由于最初的温度较低，GAD 活力迅速上升，GABA-T 迅速下降，而荔枝在适应了该逆境后，GAD 活力开始下降，GABA-T 活力上升，导致 GABA 含量总体上呈下降趋势；冷藏组的 GABA 变化趋势与冰温组相似，但由于其温度较高，故 GABA 含量一直处于较低水平。

## 2.2 不同低温贮藏对 GAD、GABA-T 酶活力的影响

的影响

不同低温贮藏对荔枝 GAD 酶活力的影响结果见图 2。

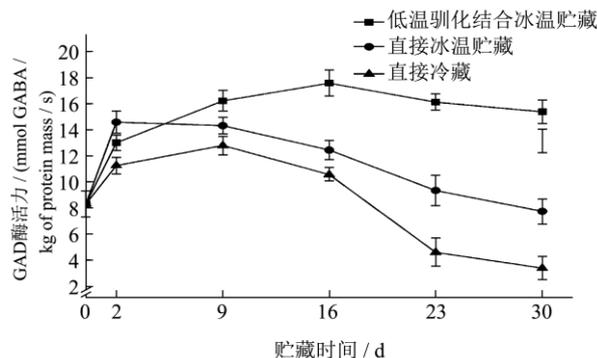


图 2 不同低温贮藏对 GAD 酶活力的影响

Fig.2 Effect of different low-temperature storage methods on GAD activity

GAD 是合成 GABA 最重要的酶，其活力取决于细胞质酸化导致的  $Ca^{2+}$ -钙调素复合物构象变化<sup>[16]</sup>。如图 2 所示，GAD 活力变化趋势与 GABA 含量变化趋势相同，呈正相关 ( $r_{驯化冰温}=0.79, p_{驯化冰温}=0.014$ ;  $r_{冰温}=0.95, p_{冰温}=0.015$ ;  $r_{冷藏}=0.96, p_{冷藏}=0.011$ )。而 GAD 作为 GABA 的合成酶，相同的趋势从 GABA 合成机理上说明了不同低温贮藏对 GABA 富集的影响规律。可以认为低温处理作为一种逆境刺激了荔枝，导致荔枝细胞质酸化，而荔枝本身的植物反应系统作出应激反应，引起  $Ca^{2+}$ -钙调素复合物构象改变，进而提高了 GAD 活力<sup>[15]</sup>。与 GABA 含量变化趋势有一处显著不同，驯化冰温组的 GAD 活力在贮藏 16 d 后开始下降，而 GABA 含量却缓慢上升至相对平衡，这可能是由于 GABA 含量上升到一定阶段，导致了产物的反馈抑制，使 GAD 活力下降，也有学者猜测可能是多胺降解合成 GABA 途径的存在，使 GABA 在 GAD 活力下降的情况下，依然上升<sup>[17]</sup>。

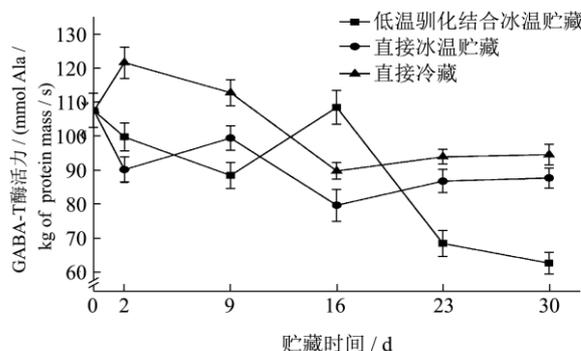


图 3 不同低温贮藏对 GABA-T 酶活力的影响

Fig.3 Effect of different low-temperature storage methods on GABA-T activity

不同低温贮藏对荔枝 GABA-T 酶活力的影响结果见图 3。

GABA-T 是以 GABA 为氨基供体的 GABA 分解酶。如图 3 所示, GABA-T 活力变化趋势除驯化冰温组第 16 d 外, 与 GABA 含量、GAD 活力变化趋势基本相反, 而 GABA-T 作为 GABA 的分解酶, 相反的趋势从 GABA 分解机理上说明了不同低温处理对 GABA 富集的影响规律。低温处理在提高 GAD 活力的同时, 也降低了 GABA-T 的活力, 这使得 GABA 转化为琥珀酸半醛的转氨反应减弱, 有利于 GABA 的合成。综合分析图 1、图 2、图 3, 发现虽然驯化冰温组 GAD 活力在第 16 d 达到峰值, 但驯化冰温组 GABA-T 活力在第 16 d 也剧烈上升, 导致驯化冰温组 GABA 含量在第 16 d 出现小幅下降, 这从侧面证明了 GAD、GABA-T 参与了荔枝 GABA 代谢, 并起着显著的调节作用。对于驯化冰温组 GABA-T 活力在第 16 d 剧烈上升的原因, 可能是由于荔枝在贮藏过程中, 戊邻酮二酸、丙酮酸等非 GABA 氨基供体含量上升, 而高底物浓度促使 GABA-T 活力剧烈上升<sup>[18]</sup>; 也可能是催化分解 GABA-T 产物琥珀酸半醛的琥珀酸半醛脱氢酶 (SSADH; EC 1.2.1.24) 活力升高, 即 SSADH 限制解除, 使得其催化的辅酶 II 型氧化反应增强, 进而导致琥珀酸半醛含量下降, 最终使 GABA-T 活力剧烈上升<sup>[19]</sup>; 在排除实验操作、数据误差等人为因素后, 更进一步的解释有待从基因表达的角度展开。

### 2.3 不同低温贮藏对可溶性蛋白含量的影响

不同低温贮藏对荔枝可溶性蛋白含量的影响结果见图 4。

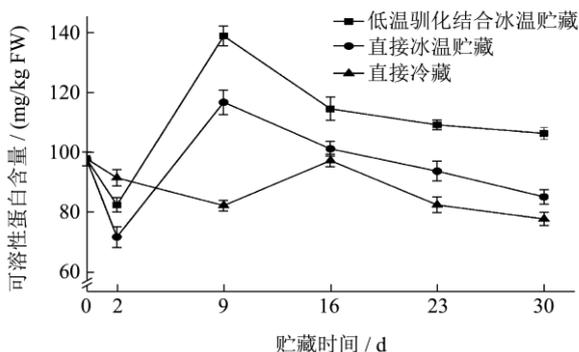


图 4 不同低温贮藏对可溶性蛋白含量的影响

Fig.4 Effect of different low-temperature storage methods on soluble protein content

可溶性蛋白中很大比例是代谢酶, 作为一类重要的调控蛋白, 其含量可表征植物体自我调控能力及抗胁迫能力。如图 4 所示, 在三种贮藏处理中, 可溶性蛋白变化趋势均呈先下降后升高再下降, 可能由于低

温使荔枝可溶性蛋白需转化为其他物质以增强自身防御能力及降低过冷却点来调控其耐寒性; 随后, 作为对低温的积极适应, 其含量上升; 最后, 为了维持荔枝在较低温度下正常的生理代谢, 可溶性蛋白大量消耗<sup>[20]</sup>。该趋势也与荔枝 GAD、GABA-T 活力在贮藏期总体呈下降趋势相吻合。由于植物体诱导性耐冷机制的存在, 驯化冰温组可溶性蛋白含量总体上处于最高水平; 而由于温度较高, 冷藏组的先下降后升高再下降的变化趋势具有相对滞后性。

### 2.4 果肉质构分析

不同低温贮藏对荔枝果肉硬度的影响结果见图 5。

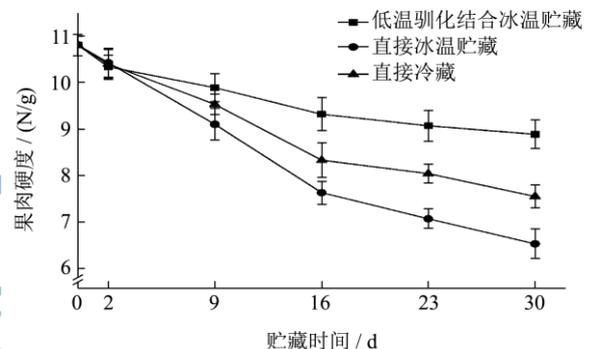


图 5 不同低温贮藏对果肉硬度的影响

Fig.5 Effect of different low-temperature storage methods on fresh firmness

由于细胞壁被酶水解, 荔枝贮藏一段时间后硬度下降, 而软化的荔枝果肉导致口感降低, 影响荔枝销售。如图 5 所示, 驯化冰温组的硬度下降最慢, 这可能是由于低温驯化过程激活了荔枝的诱导性耐冷机制, 使其适应了冰温环境, 避免了冷害的发生, 同时冰温贮藏又抑制呼吸代谢, 延缓了细胞壁的水解<sup>[21]</sup>。直接冰温贮藏由于没有适应低温的驯化过程, 导致没有激活诱导性耐冷机制, 仅依靠亚热带水果较弱的本底耐冷机制, 无法适应冰温环境, 最终导致冷害发生, 硬度迅速下降。

### 2.5 色差分析

不同低温贮藏对荔枝果皮色差的影响结果见表 1。由于酶促褐变、失水褐变、花色素苷降解变色等原因, 常温下荔枝采后果皮极易褐变, 而鲜艳色泽丧失降低了荔枝的品质。如表 1 所示, 驯化冰温组与亮度成正比的  $L^*$  值、与红色成正比的  $a^*$  值均下降最慢, 而与黄色成正比的  $b^*$  值与冷藏组相同, 高于冰温组。这表明低温驯化结合冰温贮藏能够一定程度上抑制荔枝果皮色泽的劣变, 尤其是对抑制果皮亮度下降及鲜

红色泽丧失的效果显著。直接冰温贮藏由于低温冷害的发生,  $L^*$ 值、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值均下降最快。

表 1 不同低温贮藏对果皮色差的影响

Table 1 Effect of different low-temperature storage methods on pericarp color

贮藏时间/d	$L^*$ 值			$a^*$ 值		
	驯化+冰温	冰温贮藏	冷藏贮藏	驯化+冰温	冰温贮藏	冷藏贮藏
0	40.06±2.50 <sup>a</sup>	40.06±2.50 <sup>a</sup>	40.06±2.50 <sup>a</sup>	30.68±0.77 <sup>a</sup>	30.68±0.77 <sup>a</sup>	30.68±0.77 <sup>a</sup>
2	39.80±2.12 <sup>a</sup>	39.32±3.88 <sup>a</sup>	39.04±1.44 <sup>a</sup>	28.56±1.09 <sup>a</sup>	29.76±1.23 <sup>a</sup>	27.08±2.03 <sup>a</sup>
9	36.31±2.08 <sup>a</sup>	31.17±1.25 <sup>b</sup>	37.02±1.54 <sup>a</sup>	25.22±0.95 <sup>a</sup>	15.19±0.60 <sup>b</sup>	26.77±1.97 <sup>a</sup>
16	35.48±1.16 <sup>a</sup>	29.18±2.41 <sup>b</sup>	35.56±3.42 <sup>a</sup>	23.43±1.37 <sup>a</sup>	14.34±3.51 <sup>b</sup>	21.98±1.69 <sup>a</sup>
23	33.70±0.84 <sup>a</sup>	27.17±1.02 <sup>b</sup>	32.36±2.89 <sup>a</sup>	22.28±0.83 <sup>a</sup>	10.49±0.66 <sup>c</sup>	18.73±2.10 <sup>b</sup>
30	30.86±0.76 <sup>a</sup>	25.28±0.27 <sup>c</sup>	28.64±1.25 <sup>b</sup>	19.10±1.32 <sup>a</sup>	8.02±0.93 <sup>c</sup>	16.75±1.16 <sup>b</sup>

贮藏时间/d	$b^*$ 值		
	驯化+冰温	冰温贮藏	冷藏贮藏
0	18.16±2.28 <sup>a</sup>	18.16±2.28 <sup>a</sup>	18.16±2.28 <sup>a</sup>
2	17.19±1.92 <sup>a</sup>	17.50±2.43 <sup>a</sup>	17.74±2.55 <sup>a</sup>
9	16.94±1.32 <sup>a</sup>	13.94±1.71 <sup>b</sup>	17.26±0.96 <sup>a</sup>
16	14.82±1.57 <sup>ab</sup>	11.33±2.12 <sup>b</sup>	15.72±1.74 <sup>a</sup>
23	13.26±0.88 <sup>a</sup>	9.20±1.17 <sup>b</sup>	14.25±1.60 <sup>a</sup>
30	12.20±1.40 <sup>a</sup>	9.07±0.92 <sup>b</sup>	12.42±2.01 <sup>a</sup>

注: 同一色差指标同一行不同字母代表同一贮藏时间三种处理方式的色差值有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

不同低温贮藏对荔枝果肉色差的影响结果见表 2。驯化冰温组的  $L^*$ 值在贮藏期内逐渐升高, 而冰温组在第 16 d 后  $L^*$ 值快速下降, 并与驯化冰温组有显著差异。这是由于冰温组在果皮出现严重冷害后, 果

肉出现了由果皮褐色物质渗透所致的均匀浅褐色, 使果肉亮度降低。同样地, 由于果皮褐色物质渗透, 冰温组的  $a^*$ 值、 $b^*$ 值在第 16 d 后快速上升, 并与驯化冰温组有显著差异。

表 2 不同低温贮藏对果肉色差的影响

Table 2 Effect of different low-temperature storage methods on fresh color

贮藏时间/d	$L^*$ 值			$a^*$ 值		
	驯化+冰温	冰温贮藏	冷藏贮藏	驯化+冰温	冰温贮藏	冷藏贮藏
0	51.29±3.88 <sup>a</sup>	51.29±3.88 <sup>a</sup>	51.29±3.88 <sup>a</sup>	-1.65±0.45 <sup>a</sup>	-1.65±0.45 <sup>a</sup>	-1.65±0.45 <sup>a</sup>
2	53.46±1.98 <sup>a</sup>	53.40±2.01 <sup>a</sup>	53.34±2.29 <sup>a</sup>	-1.79±0.46 <sup>a</sup>	-1.98±0.35 <sup>a</sup>	-1.74±0.21 <sup>a</sup>
9	54.13±3.33 <sup>a</sup>	54.67±1.91 <sup>a</sup>	54.38±1.38 <sup>a</sup>	-1.76±0.41 <sup>a</sup>	-1.56±1.03 <sup>a</sup>	-1.36±0.20 <sup>a</sup>
16	56.79±4.52 <sup>a</sup>	55.98±3.63 <sup>a</sup>	54.93±1.57 <sup>a</sup>	-1.45±0.09 <sup>a</sup>	0.09±0.54 <sup>a</sup>	-0.10±1.31 <sup>a</sup>
23	56.40±0.80 <sup>a</sup>	42.74±4.62 <sup>b</sup>	55.57±0.82 <sup>a</sup>	-0.02±0.29 <sup>b</sup>	2.96±1.01 <sup>a</sup>	1.06±0.35 <sup>b</sup>
30	64.28±1.35 <sup>a</sup>	35.13±3.09 <sup>c</sup>	55.97±2.51 <sup>b</sup>	1.04±0.77 <sup>b</sup>	4.41±1.67 <sup>a</sup>	2.11±1.58 <sup>ab</sup>

贮藏时间/d	$b^*$ 值		
	驯化+冰温	冰温贮藏	冷藏贮藏
0	3.01±0.89 <sup>a</sup>	3.01±0.89 <sup>a</sup>	3.01±0.89 <sup>a</sup>
2	1.69±0.46 <sup>a</sup>	1.98±0.67 <sup>a</sup>	1.37±0.47 <sup>a</sup>
9	1.41±0.28 <sup>a</sup>	1.67±0.56 <sup>a</sup>	1.56±0.66 <sup>a</sup>
16	1.64±0.62 <sup>a</sup>	3.62±0.96 <sup>a</sup>	3.45±1.34 <sup>a</sup>
23	2.09±1.59 <sup>b</sup>	4.89±1.45 <sup>a</sup>	3.29±0.32 <sup>ab</sup>
30	1.45±0.79 <sup>b</sup>	6.34±1.68 <sup>a</sup>	4.27±2.39 <sup>ab</sup>

注: 同一色差指标同一行不同字母代表同一贮藏时间三种处理方式的色差值有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

## 2.6 感官评定

不同低温贮藏对荔枝感官品质的影响结果见表 3。

3。

表3 不同低温贮藏对感官品质的影响

Table 3 Effect of different low-temperature storage methods on sensory quality

贮藏时间/d	感官分数		
	驯化+冰温	冰温贮藏	冷藏贮藏
0	95.00	95.00	95.00
2	92.50	91.25	89.50
9	88.33	79.44	86.43
16	82.78	76.07	81.25
23	79.29	68.33	77.92
30	74.17	65.00	72.50

由于荔枝的直接受用对象是人,且荔枝的某些性状难以完全依靠仪器检测及化学分析,因此,感官评定在荔枝的综合评价中有着重要意义。如表3所示,驯化冰温组的感官评分下降最慢,表明低温驯化结合冰温贮藏对于荔枝贮藏的效果最优;而冰温组在第9天已出现较为明显的冷害,果皮龟裂片尖出现褐色,随后扩大,褐斑在果面均匀分布,逐渐显现分布较均匀的水渍状褐斑,至第23d后,已整果褐变,且剥开果皮后已出现“铁锈水”,完全失去商品价值。

### 3 结论

3.1 贮藏期内,荔枝低温驯化结合冰温贮藏的GABA含量显著增加,且能维持在较高水平,较未低温处理的荔枝增加了2.49倍(贮藏第23d),分别是直接冰温贮藏、直接冷藏最高值的1.21、1.77倍,从荔枝GABA富集的角度,证明了荔枝低温驯化结合冰温贮藏的优势。

3.2 通过对荔枝GABA代谢相关酶的研究,发现GABA含量与GAD活力呈正相关、与GABA-T活力变化趋势基本相反,说明荔枝GABA富集主要由GAD活力上升和GABA-T活力下降所引起,这从机理上初步解释了荔枝GABA富集的原因。

3.3 贮藏期内,低温驯化结合冰温贮藏的荔枝的可溶性蛋白、果肉硬度、果皮色泽、感官品质均显著优于直接冰温贮藏和直接冷藏,从贮藏品质的角度,证明了荔枝低温驯化结合冰温贮藏的优越性。

3.4 通过对贮藏期内果肉硬度、果皮色泽和感官品质的分析发现,荔枝直接冰温贮藏会导致严重冷害,使其丧失商品价值。

### 参考文献

[1] Yang R, Guo Q, Gu Z. GABA shunt and polyamine degradation pathway on  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation in germinating fava bean (*Vicia faba* L.) under hypoxia [J].

Food Chemistry, 2013, 136(1): 152-159

- [2] Wang Y, Luo Z, Huang X, et al. Effect of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) treatment on chilling injury and antioxidant capacity in banana peel [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 168: 132-137
- [3] Matsuki T, Takasu M, Hirose Y, et al. GABA<sub>A</sub> receptor-mediated input change on orexin neurons following sleep deprivation in mice [J]. Neuroscience, 2015, 284(22): 217-224
- [4] Yang N, Zhou K, Tseng C. Antihypertensive effect of mulberry leaf aqueous extract containing  $\gamma$ -aminobutyric acid in spontaneously hypertensive rats [J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1796-1801
- [5] 张辉,乔勇进,张娜娜,等.冰温贮藏过程中蟹味菇几种营养成分变化的动力学特征[J].现代食品科技, 2014, 30(4): 124-129,153
- ZHANG Hui, QIAO Yong-jin, ZHANG Na-na, et al. The reaction kinetics of the change of nutrition ingredients in crab flavor mushroom during ice-temperature storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(4): 124-129, 153
- [6] 胡位荣.荔枝果实冷害生理及冰温贮藏技术的研究[D].广州:华南农业大学,2003
- HU Wei-rong. The physiology of chilling injury and technology of ice-temperature storage in litchi (*Litchi chinensis* sonn.) fruit [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2003
- [7] Barrero-Gil J, Salinas J. Post-translational regulation of cold acclimation response [J]. Plant Science, 2013, 205-206: 48-54
- [8] NY/T 1401-2007,荔枝冰温贮藏[S].
- NY/T 1401-2007, Controlled Freezing-Point Storage of Litchi [S]
- [9] Zhang G, Bown A W. The rapid determination of  $\gamma$ -aminobutyric acid [J]. Phytochemistry, 1997, 44(6): 1007-1009
- [10] Bartyzel I, Pelczar K, Paszkowski A. Functioning of the  $\gamma$ -aminobutyrate pathway in wheat seedlings affected by osmotic stress [J]. Biologia Plantarum, 2003, 47(2): 221-225
- [11] Ansari M I, Lee R, Chen S G. A novel senescence-associated gene encoding  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA): pyruvate transaminase is upregulated during rice leaf senescence [J]. Physiologia Plantarum, 2005, 123(1): 1-8
- [12] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry,

- 1976, 72: 248-254
- [13] MacDougall D B. Changes in the colour and opacity of meat [J]. Food Chemistry, 1982, 9: 75-88
- [14] 陈希,李汴生,梅灿辉,等.模糊综合评判在催陈黄酒感官分析的应用[J].现代食品科技,2009,25(4):394-397  
CHEN Xi, LI Bian-sheng, MEI Can-hui, et al. Application of sensory fuzzy comprehensive evaluation in ageing rice wine [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(4): 394-397
- [15] Trobacher C P, Clark S M, Bozzo G G, et al. Catabolism of GABA in apple fruit: Subcellular localization and biochemical characterization of two  $\gamma$ -aminobutyrate transaminases [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 75: 106-113
- [16] Al-Quraan N A, Sartawe F A, Qaryouti M M. Characterization of  $\gamma$ -aminobutyric acid metabolism and oxidative damage in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under salt and osmotic stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2013, 170(11): 1003-1009
- [17] Shelp B J, Bozzo G G, Trobacher C P, et al. Hypothesis/review: contribution of putrescine to 4-aminobutyrate (GABA) production in response to abiotic stress [J]. Plant Science, 2012, 193-194: 130-135
- [18] Akihiro T, Koike S, Tani R, et al. Biochemical mechanism on GABA accumulation during fruit development in tomato [J]. Plant and Cell Physiology, 2008, 49(9): 1378-1389
- [19] Deyman K L, Brikis C J, Bozzo G G, et al. Impact of 1-methylcyclopropene and controlled atmosphere storage on polyamine and 4-aminobutyrate levels in "Empire" apple fruit [J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 1-9
- [20] Sceba F, Sebastiani L, Vitagliano C. Protective enzymes against activated oxygen species in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings: responses to cold acclimation [J]. Journal of Plant Physiology, 1999, 155(6): 762-768
- [21] Kato-Noguchi H. Low temperature acclimation mediated by ethanol production is essential for chilling tolerance in rice roots [J]. Plant Signaling and Behavior, 2008, 3(3): 202-203