

不同温度对中热 1 号香蕉采后品质的影响

肖 华^{1,2}, 郑云柯², 张建斌², 常丽丽², 苏祖祥³, 李新国^{1*}, 刘菊华^{2*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101; 3. 广西农业科学院生物技术研究所, 广西南宁 530007

摘 要: 香蕉具有极高的营养与经济价值, 但采后易变质, 保鲜难度大, 且其品质受外部条件影响显著。温度是调控其采后成熟品质的关键因素。中热 1 号香蕉为本课题组自主培育的抗枯萎病、丰产优质香蕉新品种, 但其最佳贮藏温度尚未明确。因此, 研究不同温度对中热 1 号香蕉采后品质的影响, 对该品种的产业化具有重要意义。本研究将新鲜采收的中热 1 号香蕉分别置于 14、16、18、20、22、25 °C 温度下催熟, 系统观察其成熟特性与淀粉降解动态, 并测定失重率、果皮色差、乙烯释放量、硬度、淀粉含量、糖含量等指标, 分析贮藏温度对这些品质指标的影响, 旨在确定其最佳保鲜温度。结果表明, 温度越高, 果实转色、失重、脱把、乙烯释放、软化及淀粉降解均越迅速。不同贮藏温度对果糖和葡萄糖含量影响较小, 但显著影响蔗糖含量, 22、25 °C 处理的蔗糖含量显著高于 14、18 °C 处理, 其中 22 °C 处理的蔗糖含量最高, 14 °C 处理最低。14 °C 处理的果实耐储性最强, 转黄后色泽稳定, 适合长期贮藏与运输; 22 °C 处理的果实成熟快、甜度高, 但色泽较差; 18 °C 处理的果实成熟较快, 果色金黄饱满, 更适于快速上架销售; 25 °C 处理则无法正常褪绿, 易脱把, 丧失商品价值。

关键词: 中热 1 号香蕉; 采后; 品质; 温度

中图分类号: S668.1 文献标志码: A

Effects of Different Temperature on the Postharvest Quality of Zhongre No. 1 Bananas

XIAO Hua^{1,2}, ZHENG Yunke², ZHANG Jianbin², CHANG Lili², SU Zuxiang³, LI Xinguo^{1*}, LIU Juhua^{2*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Biotechnology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China

Abstract: Banana has high nutritional and economic value. However, banana is easy to decay after harvest, making preservation difficult. Banana quality is significantly affected by external conditions. Temperature is a key factor in regulating the post-harvest banana ripening quality. Zhongre No. 1 is a new variety resistant to Fusarium wilt with high yield and good quality, which is independently cultivated by our research group. However, its optimal storage temperature has not been clearly defined. Therefore, investigating the effect of different temperature on the post-harvest quality of Zhongre No. 1 is of great significance for the industrialization of the variety. In the study, freshly harvested Zhongre No. 1 banana was ripened at 14 °C, 16 °C, 18 °C, 20 °C, 22 °C and 25 °C, respectively. Aimed at determining the optimal preservation temperature, the ripening characteristics and starch degradation dynamics were systematically observed, and indicators such as weight loss rate, peel color difference, ethylene release amount, firmness, and starch and sugar content were measured to analyze the effect of storage temperature on the quality indicators. The results showed that higher temperature led to faster fruit color change, weight loss, bunch separation, ethylene release, softening, and starch degradation. Different temperature had little effect on fructose and glucose content but significantly affected sucrose

收稿日期 2025-10-30; 接受日期 2025-12-26

基金项目 广西重点研发计划项目(林桂科 AB25069296); 海南省自然科学基金项目(No. 322RC767); 国家香蕉产业技术体系建设专项(No. CARS-31)。

作者简介 肖 华(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 香蕉采后保鲜。*通信作者(Corresponding author): 李新国(LI Xinguo), E-mail: lixinguo13@163.com; 刘菊华(LIU Juhua), E-mail: juhua69@126.com。

content, with the sucrose content in 22 °C and 25 °C being significantly higher than that at 14 °C and 18 °C, among which 22 °C had the highest sucrose content and 14 °C had the lowest. Banana stored at 14 °C had the strongest storability, with stable color after turning yellow, making them suitable for long-term storage and transportation. Banana at 22 °C ripened quickly and had high sweetness but poor color. Banana at 18 °C ripened relatively quickly with golden and plump fruit color, making it more suitable for rapid shelf placement and sales. Banana at 25 °C failed to normally lose green color, was easy to bunch separation, and lost commercial value.

Keywords: Zhongre No. 1 banana; postharvest; quality; temperature

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.019

香蕉 (*Musa* spp.) 是芭蕉科芭蕉属草本植物, 广泛栽培于热带和亚热带地区, 是一种营养丰富、风味独特的热带水果, 深受全球消费者喜爱, 具有极高的营养和经济价值。但作为新鲜农产品, 香蕉在采摘后便开始变质^[1]。且香蕉较大部分水果娇嫩, 不易保鲜且不耐贮藏, 品质极易受温度、湿度、空气、机械挤压等外部因素影响, 导致采后贮藏与运输中损失率高^[2]。这些损失包括香蕉果实的风味口感下降、营养流失、果皮褐变黑斑、机械损伤、腐烂及病害侵染等, 影响其食用与销售价值, 导致营养和经济价值下降^[3]。

香蕉一般在未成熟时采摘, 在运输、贮藏、上架过程中成熟, 此过程中温度控制至关重要。通常, 低温会降低新陈代谢, 减少水分流失、降低昆虫活动、减少采后病害发生率、延缓成熟, 而在较高温度下储存会加速所有损害^[4]。因此, 采后香蕉通常采用低温贮藏。但同时也要注意, 温度过低则会导致冷害。我国于 2007 年实施的《中华人民共和国农业行业标准 NY/T 1395—2007 香蕉包装、贮存与运输技术规程》中阐明采后香蕉应先于 12 °C 贮藏 48 h, 后转入 14 °C 贮藏。KADER^[5]认为, 香蕉果实的理想储藏温度为 12~16 °C, 这既延迟了成熟过程, 并保持了果实的保质期, 又防止了冷害。王斌等^[6]建议, 香蕉鲜果销售宜采用(16±0.5)°C 催熟, 而大批量催熟加工则宜采用(19±0.5)°C。苏园等^[7]研究表明, 20 °C 恒温催熟的香蕉果实色泽与硬度适度, 适合大批量加工。

中热 1 号为本实验室自主培育的丰产、稳产、优质、抗病香蕉新品种, 其保持品质的最适贮藏温度尚不明确。常规香蕉贮藏温度条件未必完全适用于中热 1 号, 因此, 探究温度对其采后品质的影响, 对该品种的推广与产业化具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

供试中热 1 号香蕉果实采自中国热带农业科学院海南儋州试验基地。将新鲜香蕉果实于基地采收后立即运回实验室, 置于 16 °C 环境下预处理一夜, 第二天早上进行去轴落梳处理。落梳后将果梳浸泡于 0.1% 次氯酸钠中洗净消毒, 取出晾干。将每把果的前 2 梳和末 2 梳移除, 剩余果梳中大小相近、完整、无明显损伤的果梳分为 6 组, 分别置于黑色塑料袋中, 每袋放入 1 包沾水的乙烯利 (山东奥维特生物有限公司, 600 mg/包) 后扎紧袋口, 分别置于 6 个温度处理 (14、16、18、20、22、25 °C) 的恒温箱贮藏, 至果实成熟度为 7 (即果皮完全变黄并出现黑色斑点) 时结束^[8]。每组中标记 1 梳果实用于完整果梳的观察和拍照、称重, 其余果实将在需要时分切果指。贮藏期间, 每天对标记的完整果梳观察拍照、称重, 并取果指存样。

1.2 方法

1.2.1 存样 干样制备: 切除香蕉果实两端, 去皮后迅速切成薄片, 立即将果片放入玻璃培养皿中, 并将不带盖的培养皿放入 40 °C 烘箱。48 h 后取出干燥果片并放入自封袋密封, 置于室温、通风、阴凉处保存备用。

冻样制备: 将 50 mL 离心管提前置于液氮中预冷。切除香蕉果实两端, 去皮后迅速切成薄片, 立即将果片置入预冷的离心管中, 拧紧管盖后迅速放入液氮中, 随后将离心管转移到 -80 °C 冰箱中保存备用。

1.2.2 果皮颜色测定 使用色差仪测定果实果皮表面的 L 和 a^* 值: L 表示果实明暗度, 取值范围为 0~100, L 值越高, 则果实颜色越亮; a^* 表示果实在红-绿水平方向的色相, a^* 为正值表示红色, a^* 为负值则表示绿色。依次测定 3 根果实, 每根果实测 3 个面。

1.2.3 淀粉降解情况观察 首先将 0.01% I-KI 溶液倒入玻璃培养皿中,然后将待测果实沿中线切成 2 半,取半根果将横截面浸入 0.01% I-KI 溶液中染色 30 s,取出后切出染色的薄片,立即拍照。

1.2.4 乙烯释放速率测定 将 3 根待测果实一起放入保鲜袋中,取一段乳胶管,将乳胶管一端插入保鲜袋内后扎紧袋口,再将乳胶管另一端用夹子夹闭以防漏气。随后将保鲜袋于室温下放置 2 h 后,使用乙烯测量仪测定乙烯释放量,测量时将仪器探针插入乳胶管中再松开夹子,仪器读数先升后降,读取峰值作为结果。

1.2.5 果实硬度测定 使用 ILC500N 质构仪测定果实果肉硬度,选择穿刺程序,设定量程为 500 N,形变百分量为 50%。测定前削去待测果实中间区域的果皮,同一根果在果实中间区域依次测定 3 个点,取平均值作为测定结果。

1.2.6 果实淀粉含量测定 参照徐昌杰等^[9]的方法并作部分调整。将香蕉干样磨成粉,取 100 mg 香蕉粉于 15 mL 离心管中,加入 5 mL 80%乙醇,充分振荡混匀。于 4000 r/min 下离心 5 min 后弃上清液,沉淀用 5 mL 蒸馏水悬浮洗涤 1 次,再次离心后,沉淀用 5 mL 80% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 悬浮,沸水浴中放置 10 min,于 4000 r/min 下离心 5 min 后将上清液转入 20 mL 容量瓶中。沉淀用 80% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 重新提取 2 次,合并提取液,用 80% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 定容至 15 mL。取 0.2 mL 80% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 补充至 1 mL,加入 50 μL 的 1% I-KI,混匀后于 620 nm 波长下测定吸光度值,代入标准曲线计算出样品淀粉含量。

取 7 个容量瓶分别加入 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的淀粉标准溶液 0、100、200、500、1000、1500、2000 μL ,用 80% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 定容至 2 mL,再加入 100 μL I-KI 溶液,混匀,于 620 nm 波长下测定吸光度值,以淀粉溶液浓度为纵坐标,吸光度值为横坐标绘制标准曲线。

1.2.7 果肉总糖和可溶性糖含量测定 选择 0 d、14 $^{\circ}\text{C}$ 12 d、18 $^{\circ}\text{C}$ 7 d、22 $^{\circ}\text{C}$ 5 d、25 $^{\circ}\text{C}$ 4 d 的冻样,每样取 3 管,每管约 50 g,送至武汉普奈斯检测技术有限公司,使用其实验室内方法测定样品中的总糖含量及果糖、葡萄糖、蔗糖、水苏糖、棉籽糖、鼠李糖、木糖、海藻糖、半乳糖、麦芽糖含量。

1.3 数据处理

使用 Graphpad Prism 9 软件进行数据分析与

作图。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度对中热 1 号香蕉果实成熟特性的影响

将采收后的中热 1 号香蕉果实置于不同温度的恒温箱中催熟处理,每天观察拍照,结果如图 1A 所示。14 $^{\circ}\text{C}$ 处理果实贮藏 9 d 时果皮颜色开始转黄,18 d 时开始出现黑色斑点,20 d 时开始脱把并结束贮藏。16 $^{\circ}\text{C}$ 处理果实贮藏 11 d 时果皮颜色开始转黄,15 d 时开始出现黑色斑点,16 d 时开始脱把,17 d 时结束贮藏。18 $^{\circ}\text{C}$ 处理果实贮藏 9 d 时果皮颜色开始转黄,11 d 时开始脱把,12 d 时开始出现黑色斑点,13 d 时结束贮藏。20 $^{\circ}\text{C}$ 处理果实贮藏 6 d 时果皮颜色开始转黄,9 d 时开始脱把,10 d 时开始出现黑色斑点,12 d 时完全脱把并结束贮藏。22 $^{\circ}\text{C}$ 处理果实贮藏 6 d 时果皮颜色明显转黄,8 d 时开始脱把并出现黑色斑点,10 d 时完全脱把并结束贮藏。25 $^{\circ}\text{C}$ 处理果实贮藏 6 d 时果皮颜色开始明显转黄,8 d 时开始脱把且完全脱把,9 d 时结束贮藏,结束时果皮未完全转黄,表面呈黄绿相间的斑驳状,褪绿不均匀,无黑色斑点。

测定不同贮藏温度果实的色差,结果显示:果实采收后成熟过程中, L 值逐渐升高,在达到最高水平后趋于稳定。14 $^{\circ}\text{C}$ 处理的果实在第 10 天、16 $^{\circ}\text{C}$ 处理的果实在第 9 天、18 $^{\circ}\text{C}$ 以上处理的果实在第 6 天开始, L 值不再明显上升。20 $^{\circ}\text{C}$ 以下贮藏温度果实的 L 值峰值高于 22 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 处理下的果实(图 1B)。果实采收时 a^* 值为负数,在贮藏过程中随着果实成熟度提高, a^* 值迅速升高, a^* 值大于 0 后,提高速率大幅减缓。18 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏温度果实的 a^* 值于第 6 天最先升高至 0 以上,随后依次是 22 $^{\circ}\text{C}$ 于第 9 天、20 $^{\circ}\text{C}$ 于第 10 天、16 $^{\circ}\text{C}$ 于第 12 天、14 $^{\circ}\text{C}$ 于第 13 天,25 $^{\circ}\text{C}$ 处理的果实 a^* 值始终小于 0(图 1C)。

2.2 不同贮藏温度对中热 1 号香蕉果实失重率的影响

对每日观察拍照的果实称重,计算失重率,结果如图 2 所示。果实在贮藏过程中质量小幅度降低。14、16、18、20、22、25 $^{\circ}\text{C}$ 处理的果实完全成熟后的失重率依次为 2.02%、1.95%、2.03%、1.71%、1.83%、2.33%。25 $^{\circ}\text{C}$ 处理的果实失重率

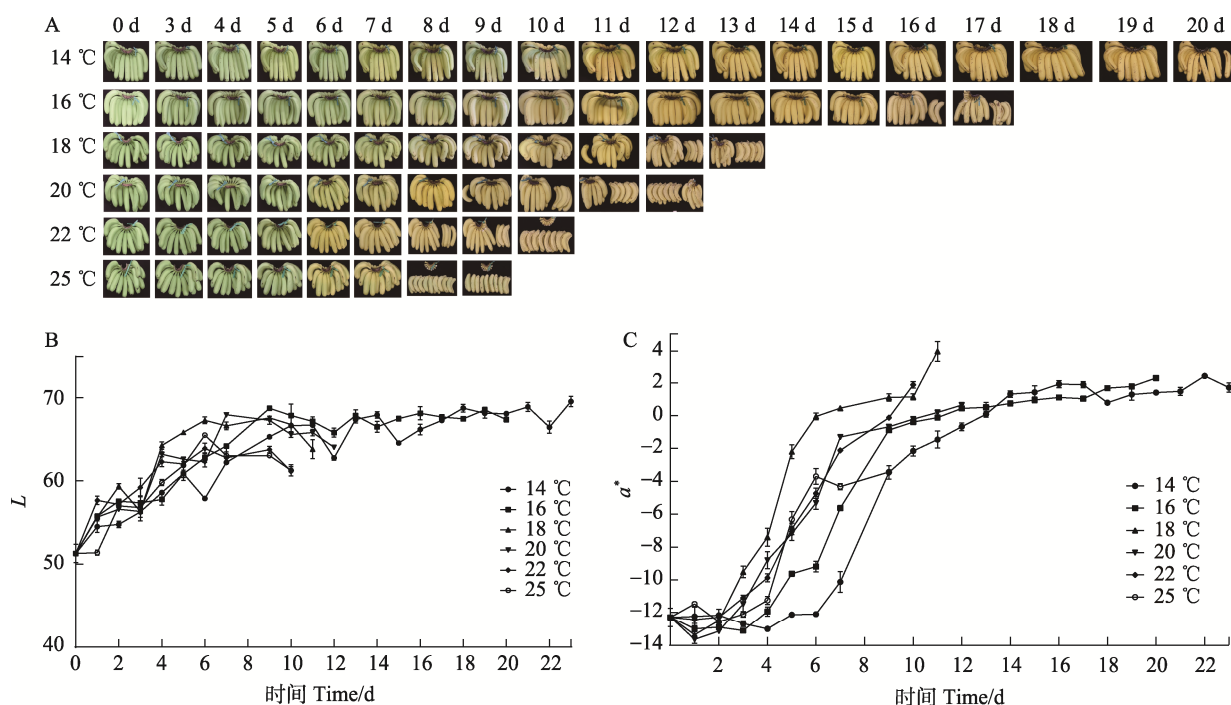


图1 不同贮藏温度对中热1号香蕉果实成熟特征的影响

Fig. 1 The effects of different temperature on the maturity characteristics of Zhongre No. 1 banana fruit

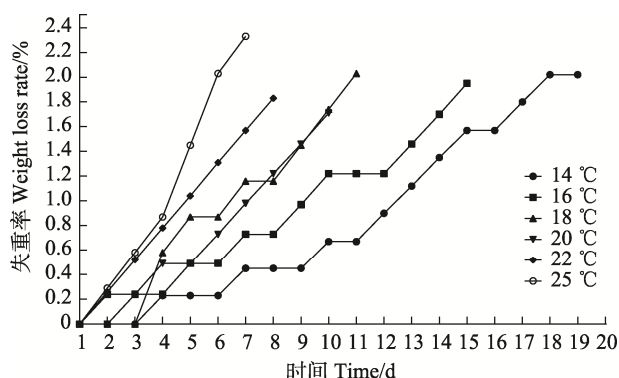


图2 不同温度对中热1号香蕉果实失重率的影响

Fig. 2 Effects of temperature on weight loss rate in Zhongre No. 1 banana fruits

每日增加0.3%以上,处理温度越低,失重率增加幅度越低,14 °C处理的果实失重率每日增加在0.2%以内。14 °C处理的果实在第11天前、16 °C处理的果实在第8天前失重率变化较为平缓,此后变化逐渐加剧;18 °C以上处理果实贮藏全程的失重率变化的剧烈程度相近。

2.3 不同贮藏温度对中热1号香蕉果实淀粉降解的影响

对不同贮藏温度的中热1号香蕉果实横截面进行I-KI染色并拍照,结果如图3A所示。果片的淀粉含量可以通过染色程度直观反映。刚采收的果实果片完全被染成深色,随着贮藏天数增加,

果片的染色程度逐渐变浅,果片未染色区域逐渐扩大。并且发现,果片的染色程度变浅及未染色区域从果片中间开始出现,并逐渐向四周扩散。在贮藏第5天前,不同温度处理的果片染色程度无明显差别;从第6天开始,贮藏天数相同时,贮藏温度越高,果片染色越浅,中间未染色区域越大。25 °C处理的果片在第9天时,果片不染色,其余贮藏温度果片在贮藏期最后1 d时,果片外圈仍有部分被染色。

测定不同温度贮藏的果实淀粉含量,结果如图3B所示。采收时含量最高,达852.52 mg/g,随着贮藏天数增加,淀粉含量逐渐降低,直至果实完全成熟。18 °C处理的果实完全成熟时的淀粉含量最高,为68.60 mg/g,其次为16、20 °C处理的果实,分别为53.19 mg/g和48.74 mg/g,14 °C处理果实的最终淀粉含量最低,为36.63 mg/g;22、25 °C处理的果实得到的结果相近,分别为37.47 mg/g和39.61 mg/g。不同温度贮藏的果实淀粉含量随天数的变化均呈线性,处理温度越高,淀粉含量降低速率越快。

2.4 不同贮藏温度对中热1号香蕉果实乙烯释放量的影响

测定不同贮藏温度的中热1号香蕉果实贮藏过程中乙烯释放量,结果如图4所示。在香蕉果

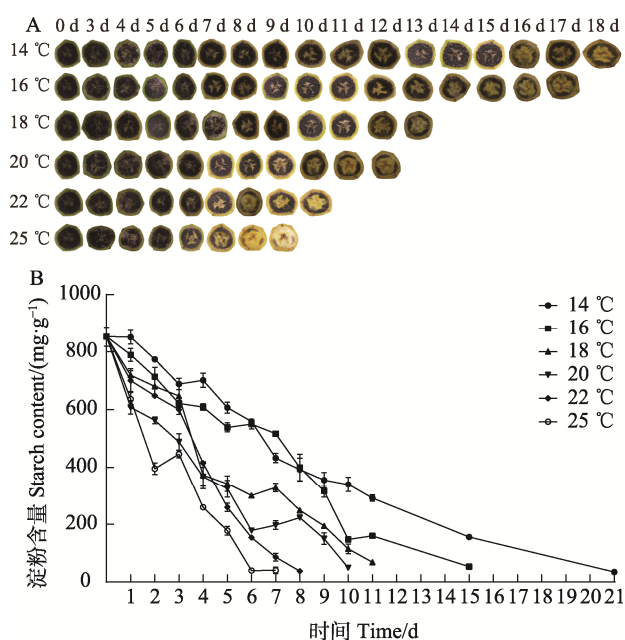


图 3 不同贮藏温度中热 1 号香蕉果实淀粉降解特征

Fig. 3 Maturity characteristics of Zhongre No. 1 banana fruit at different temperature

实贮藏过程中, 果实的乙烯释放量随贮藏天数的增加而逐渐升高。18、20、22、25 °C 处理的果实贮藏前 2 d, 乙烯释放量提升幅度较大, 随后进入一段平缓期, 之后再次急剧升高, 且乙烯释放量提升程度与贮藏温度呈正相关; 14、16 °C 处理的香蕉果实贮藏前 4 d, 乙烯释放量的提升较为平缓, 未出现明显的剧烈升高。总体来看, 贮藏温度越高, 其乙烯释放高峰出现越早, 且 22、25 °C 处理果实的乙烯释放峰值显著高于 20 °C 以下贮藏温度。

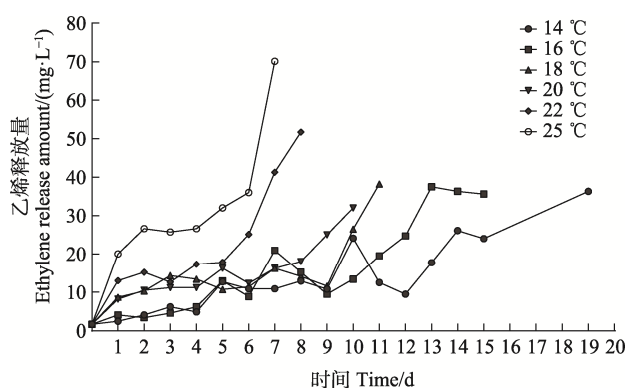


图 4 不同贮藏温度中热 1 号香蕉果实乙烯释放量变化

Fig. 4 Changes of ethylene release of Zhongre No. 1 banana fruit under different temperature

2.5 不同贮藏温度对中热 1 号香蕉果实质地的影响

测定不同贮藏温度的中热 1 号香蕉果实贮藏

过程中的硬度, 结果如图 5 所示, 果实采收时的硬度约为 33 N, 贮藏过程中, 果实硬度逐渐下降, 不同贮藏温度的果实其硬度下降程度均表现为先快后慢。果实硬度在成熟度 2 时开始下降, 在成熟度 3 时急剧下降, 在成熟度 4 时下降速度减缓, 在成熟度 5 以后稳定在 3 N 左右, 不再明显下降, 不同贮藏温度之间未出现明显差异。

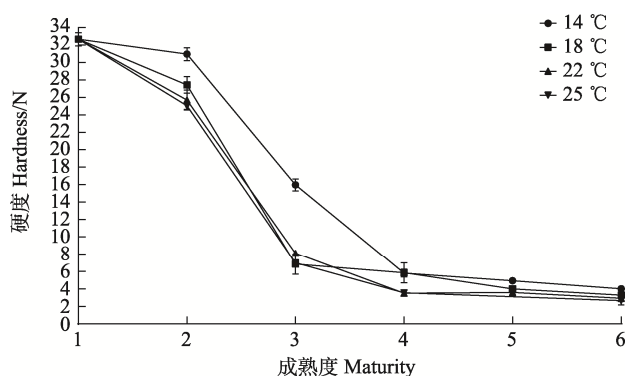


图 5 不同贮藏温度对中热 1 号香蕉果实质地的影响

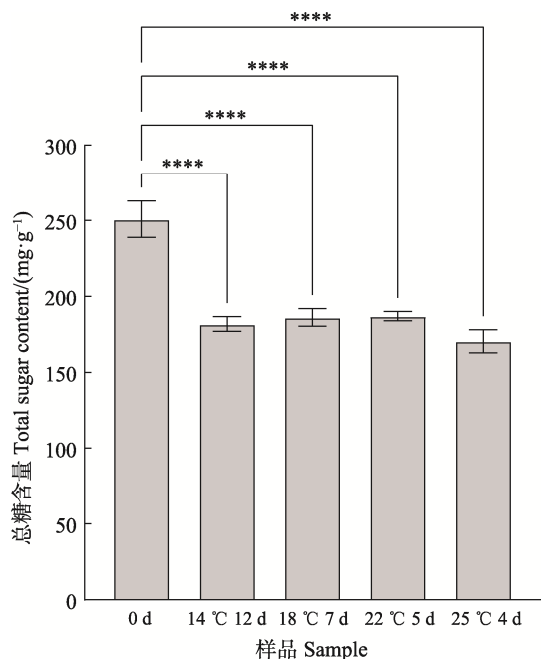
Fig. 5 Effects of different temperature on texture of Zhongre No. 1 banana fruit

2.6 不同贮藏温度对中热 1 号香蕉果实总糖含量的影响

测定中热 1 号香蕉果实采收期及不同贮藏温度至成熟度 6 时 (即 14 °C 12 d、18 °C 7 d、22 °C 5 d、25 °C 4 d) 样品的总糖含量, 结果如图 6 所示。果实采收时的平均总糖含量为 251 mg/g, 各贮藏温度下成熟度 6 时的总糖含量分别为 181、186、189、170 mg/g, 与采收期相比均有所降低, 且差异极显著 ($P < 0.0001$)。25 °C 处理的果实总糖含量降低最多, 除 25 °C 处理外, 其余贮藏温度处理的果实总糖降低值与处理温度呈负相关。

2.7 不同贮藏温度对中热 1 号香蕉果实可溶性糖含量的影响

由图 7 可知, 果实采收时所含的可溶性糖中仅检测出少量果糖 (0.09 mg/g)、葡萄糖 (0.12 mg/g) 和蔗糖 (1.01 mg/g), 各温度贮藏至成熟度 6 时, 果实内蔗糖、葡萄糖、果糖含量均显著提高, 其中蔗糖含量最高, 果糖和葡萄糖含量均低于蔗糖, 且葡萄糖含量略高于果糖, 此外还检测出少量的海藻糖和半乳糖, 除 25 °C 处理外, 其余贮藏温度的样品中还检测出少量麦芽糖。鼠李糖、木糖、棉籽糖和水苏糖在所有样品中均未检出。不同贮藏温度的样品中, 果糖和葡萄糖含量均在 35~45 mg/g 之间, 差异较小, 而蔗糖含量差异较大, 22 °C

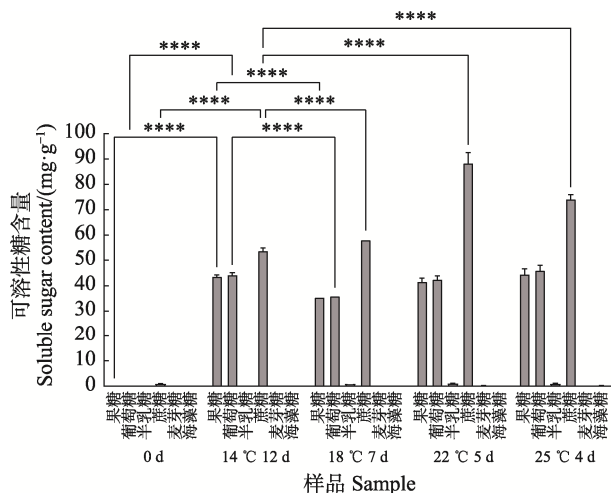


****表示处理间差异极显著 ($P < 0.0001$)。

**** indicates extremely significant difference among treatments ($P < 0.0001$).

图6 不同贮藏温度中热1号香蕉果实总糖含量

Fig. 6 Determination of total sugar in Zhongre No.1 banana fruit under different temperature



****表示处理间差异极显著 ($P < 0.0001$)。

**** indicates extremely significant difference among treatments ($P < 0.0001$).

图7 不同贮藏温度中热1号香蕉果实可溶性糖含量

Fig. 7 Determination of soluble sugar in Zhongre No.1 banana fruit under different temperature

处理的样品中蔗糖含量最高, 为 88 mg/g, 14 °C 处理的样品中蔗糖含量最低, 为 54 mg/g。

3 讨论

温度是控制香蕉果实成熟的关键因子。通常, 较高的温度能加速香蕉的成熟过程, 而低温则会

延缓香蕉成熟。本研究将中热1号香蕉果实置于不同温度的恒温箱中进行催熟贮藏, 观察不同温度下果实的贮藏特性与品质变化, 探究温度对其采后品质的影响。前人的研究表明, 香蕉果实在 13 °C 下贮藏易发生冷害^[10-11], 而在 25 °C 以上贮藏无法正常成熟^[12-13]。因此, 本研究将贮藏温度设置为 14~25 °C。在许多植物中, 热胁迫与冷胁迫均会影响乙烯的生物合成及信号通路^[14]。在适宜温度下, 果实中的乙烯合成增加, 促进果实成熟。PATHAK 等^[15]发现, 香蕉在乙烯诱导成熟过程中呈独特的双向呼吸跃变, 且乙烯的释放存在 2 个高峰。本研究中, 中热1号香蕉于 18 °C 以上贮藏初期, 果实乙烯释放量迅速上升, 随后进入平缓期, 之后再次急剧升高, 与 PATHAK 等的研究规律相符, 而果实在 16 °C 以下贮藏时, 其初始乙烯合成受到抑制。因此, 低温贮藏可延缓中热1号香蕉成熟, 并延长其货架期。但需注意, 低温贮藏下香蕉果实的乙烯结合力随贮藏温度降低和时间的延长而降低, 同时, 其冷害发生与乙烯结合力降低有关, 如温度过低或低温贮藏时间过长, 则香蕉果实对乙烯的响应能力显著降低, 导致其无法正常成熟^[16]。

香蕉果实外观是其商品价值的首要决定因素, 直接影响消费者购买意愿、市场价格及流通效率, 在高度竞争的水果市场中, 香蕉的外观品质往往比内在品质更能第一时间影响销售表现。本研究将中热1号香蕉置于不同温度的恒温箱中贮藏, 可以直接观察不同温度贮藏下果实的果皮颜色变化、果皮表面缺陷、果实脱落等果实成熟情况。消费者往往通过香蕉的果皮颜色判断果实的成熟度、新鲜度。成熟的中热1号香蕉果皮为黄色。本研究中通过对果实色差的测定, 发现中热1号香蕉采后成熟过程中果皮色差的变化主要是亮度的提高和绿色的褪去, 其果皮颜色表现为由绿转黄主要是由于绿色的褪去而非黄色的积累, 这在一定程度上支持 LIZADA^[17]的观点。25 °C 的果实在贮藏期内观察到无法完全褪绿的“青皮熟”现象, 许多研究也证实了这一点^[12-13]。14、16 °C 处理的果实果皮的亮度达到峰值后趋于不变, 18 °C 以上温度贮藏的果实的亮度达到峰值后有所下降, 20 °C 以下温度贮藏的果实的亮度峰值显著高于 22、25 °C 处理的果实, 其中, 18 °C 处理的果实果皮亮度提升最快, 并且 18 °C 处理的果实果皮的褪绿速度也快于其他温度贮藏的果

实。因此,如果想让中热 1 号香蕉果实快速成熟,短期内呈现饱满的亮黄色,18 ℃贮藏可能是相对合适的选择,但金黄色的稳定期较短,货架期短;如果想要保持果皮转黄后色泽稳定,延长货架期,14 ℃或 16 ℃贮藏表现更好。

成熟的香蕉易发生单果从果穗脱落的现象,对香蕉果实商品化产生不利影响^[18]。通常情况下,果汁缺失的香蕉与脱落的单果均难以售卖^[19]。本研究中,处理温度越高,果实越易脱落,22 ℃处理的中热 1 号香蕉在第 8 天便开始脱把,并于同日完全脱把,而 14 ℃催熟处理的果实至第 20 天才开始脱把,后者的贮藏期约为前者的 3 倍,且脱把率较低,与 PAULL^[20]的研究结果相符。一般来说,果皮出现黑色斑点果实达成熟度 7 的标志^[8]。25 ℃处理的中热 1 号香蕉果实因为“青皮熟”而无斑点,22 ℃处理果实脱把与斑点出现同时发生,20、18 ℃处理果实脱把早于斑点出现,16、14 ℃处理果实脱把晚于斑点出现,表明低温处理可使中热 1 号香蕉果实脱把晚于成熟进程,提升了果实的耐储性,有利于延长果实的货架期。

香蕉果实硬度是其商品价值的关键因素之一,硬度对香蕉商品价值的影响存在一种“矛盾”:一方面,硬度低的果实在运输和处理过程中更易受损,严重影响果实的贮藏品质,硬度较高的果实通常更耐贮藏和运输,这也是香蕉通常在绿色未成熟期采摘的原因^[21];另一方面,香蕉需软化至一定程度方可食用,适度软化能使香蕉果实获得更佳口感。本研究中,14 ℃处理的中热 1 号香蕉果实第 3 天开始迅速软化,而其余贮藏温度的果实自第 1 天起便迅速软化,这可能与果实贮藏过程中接受了乙烯的处理有关^[22]。果实软化剧烈程度与温度呈正相关,处理温度越高,软化越剧烈,但不同温度贮藏下果实的最终硬度无明显差异,均在 3 N 左右。果实的软化进程与其成熟度相关,于成熟度 2 时开始软化,于成熟度 3 时迅速软化,于成熟度 4 时软化速度变缓,于成熟度 5 以后软化不再明显,不同温度贮藏之间无明显差异。周璇的研究表明,高温高湿的复合胁迫会显著加速青香蕉的软化进程,而在相同贮藏时间下,单一高温或高湿胁迫均无法引发相近程度的软化效应^[23]。本研究中,25 ℃贮藏的果实虽然表现出青皮熟现象,但并没有伴随着异常软化,一定程度上佐证了周璇的观点^[24]。综上所述,高温贮藏可以显著加速中热 1 号香蕉的软化进程,

促使果实快速进入可食状态,但无法长期贮藏,适合果实短期快速上架或消费者自行处理。低温贮藏可以通过减缓软化,维持果实硬度延长果实的保质期,使果实拥有更长的货架期,更适合果实的商品化处理。

香蕉的风味是其商品价值的核心因素,消费者偏向于软糯香甜的香蕉。未成熟的香蕉富含淀粉,不宜食用,随着果实成熟,淀粉逐渐转化为可溶性糖,香蕉变得可食用并呈现独特的风味^[25]。不同温度条件下,香蕉中多种酶的活性发生变化,这直接影响香蕉中淀粉向可溶性糖的转化。 α -淀粉酶(AMY)和 β -淀粉酶(BMY)是常见于香蕉淀粉代谢的淀粉酶,与香蕉果肉淀粉体中的淀粉颗粒有关^[26]。研究发现,冷藏的香蕉中,低温更有利于淀粉通过 α -淀粉酶途径的降解,而非 β -淀粉酶途径的降解。由于 β -淀粉酶的作用下降,淀粉降解和可溶性糖合成的百分比降低,对香蕉果实的最终品质产生了负面影响^[26]。本研究测定不同贮藏温度的中热 1 号香蕉贮藏过程中的淀粉含量,并通过对中热 1 号香蕉横截面进行 I-KI 染色,基于淀粉遇碘产生蓝色络合物的原理,可直观观察不同温度贮藏的果实淀粉降解情况,结果表明:采收期中热 1 号香蕉果实含有大量淀粉,随着成熟度提高,淀粉从果实中心开始降解,逐渐向四周扩散。鉴于香蕉软化主要原因是淀粉降解^[27],该结果与庄军平等^[28]的研究结果相符。同时表明,中热 1 号香蕉果实贮藏温度越高,果实淀粉降解速率越快,与巴西蕉^[7]和中蕉 9 号^[29]的研究结果一致。25 ℃处理的果实在完全成熟时淀粉几乎完全降解,其余温度贮藏的果实在完全成熟时含有少量淀粉,表明高温不仅能加速淀粉降解,还能提高其降解程度。此外,本研究测定中热 1 号香蕉果实采收期和不同温度贮藏的成熟度为 6 的样品的总糖含量与可溶性糖含量,结果表明:各温度贮藏下成熟度 6 时,果实内蔗糖、葡萄糖、果糖含量显著提高,其中蔗糖含量最高,果糖和葡萄糖含量次之,且葡萄糖含量略高于果糖,另外存在少量的海藻糖、半乳糖,25 ℃处理的果实内额外含有少量麦芽糖。这与 MARRIOTT 等^[30]、ENDERSON 等^[31]的研究结果基本一致,但存在部分差异,这可能与品种差异有关。不同贮藏温度样品的果糖和葡萄糖含量差异较小,而蔗糖含量差异较大,22、25 ℃处理样品的蔗糖含量显著高于 14、18 ℃处理样品,22 ℃处理样品

的蔗糖含量最高, 14℃处理样品的蔗糖含量最低。因此, 推测中热1号香蕉在22℃贮藏时的甜度最高, 适合短期贮藏后上架销售。14、18℃处理样品果实的糖含量差异不大, 选择14℃贮藏以期获得更长的保质期。

综上所述, 14℃处理中热1号香蕉贮藏时间最久, 耐贮性强, 不易脱把, 转黄后色泽稳定, 适合长期贮藏和运输; 22℃处理的果实成熟速度快、甜度最高, 但色泽较差, 18℃处理果实在成熟较快的同时, 色泽最为金黄饱满。因此, 18℃处理更适合中热1号香蕉短期快速上架销售; 25℃处理的果实无法完全褪绿, 且极易脱把, 商品价值较低。研究存在一些局限性, 例如, 实验样本量相对产业化规模较小, 每天取样时间难以完全保持一致, 且取样过程易对果实造成机械损伤, 取样后可能产生伤乙烯, 进而影响实验结果。这些局限性导致重复实验中果实成熟进程不一致。但不同温度处理的试验条件受局限相同, 因此从探究温度对中热1号香蕉品质影响的角度, 结果仍具参考价值。

4 结论

在中热1号香蕉果实采后成熟过程中, 贮藏温度越高, 果实转色、失重、果指脱落、乙烯释放、果肉软化及淀粉降解速率均越快, 22℃处理果实的甜度最高。

14℃处理的果实贮藏时间最久, 耐贮性强, 不易脱把, 转黄后色泽稳定, 适合长期贮藏、运输。18℃处理果实在成熟较快的同时, 色泽最为金黄饱满, 适合短期快速上架。

参考文献

- [1] KAYS S J. Postharvest physiology and handling of perishable plant products[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1991.
- [2] AL-DAIRI M, PATHARE P B, AL-YAHYAI R, JAYASURIYA H, AL-ATTABI Z. Postharvest quality, technologies, and strategies to reduce losses along the supply chain of banana: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 134: 177-191.
- [3] ILYAS M B, GHAZANFAR M U, KHAN M A, KHAN C A, BHATTI M A R. Post harvest losses in apple and banana during transport and storage[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2007, 44(3): 534-539.
- [4] KADER A A. Postharvest technology of horticultural crops-An overview from farm to fork[J]. Ethiopian Journal of Applied Science and Technology, 2013(1): 1-8.
- [5] KADER A A. Postharvest technology of horticultural crops[M]. Oakland: University of California, Agriculture and Natural Resources, 2002.
- [6] 王斌, 张江周, 王金乔, 张学娟, 马翠凤, 李宝深. 香蕉气调催熟最佳温度研究[J]. 南方农业学报, 2016, 47(12): 2139-2144.
WANG B, ZHANG J Z, WANG J Q, ZHANG X J, MA C F, LI B S. Optimum temperature for banana gas ripening[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(12): 2139-2144. (in Chinese)
- [7] 苏园, 文典, 李蕾, 杜瑞英, 杜应琼. 不同催熟温度对巴西蕉品质的影响[J]. 福建农业科技, 2019(7): 7-10.
SU Y, WEN D, LI L, DU R Y, DU Y Q. Effects of different ripening temperatures on the quality of brazilian banana[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2019(7): 7-10. (in Chinese)
- [8] STOVER R H, SIMMONDS N W. Bananas[M]. New York: Wiley, 1987.
- [9] 徐昌杰, 陈文峻, 陈昆松, 张上隆. 淀粉含量测定的一种简便方法: 碘显色法[J]. 生物技术, 1998(2): 41-43.
XU C J, CHEN W J, CHEN K S, ZHANG S L. A sipmle method for determining the content of starch: iodine chromogenic[J]. Biotechnology, 1998(2): 41-43. (in Chinese)
- [10] WANG Y, CHEN J Y, JIANG Y M, LU W J. Cloning and expression analysis of phenylalanine ammonia-lyase in relation to chilling tolerance in harvested banana fruit[J]. Post-harvest Biology and Technology, 2007, 44(1): 34-41.
- [11] HASHIM N, JANUS R B, BARANYAI L, RAHMAN R A, OSMAN A, ZUDE M. Kinetic model for colour changes in bananas during the appearance of chilling injury symptoms[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5: 2952-2963.
- [12] SEYMOUR G B, THOMPSON A K, JOHN P. Inhibition of degreening in the peel of bananas ripened at tropical temperatures: I. Effect of high temperature on changes in the pulp and peel during ripening[J]. Annals of Applied Biology, 1987, 110(1): 145-151.
- [13] 李云, 钱春梅, 陆旺金, 张昭其, 庞学群. 香蕉和大蕉果实不同温度下催熟后的色泽变化[J]. 园艺学报, 2006(3): 617-620.
LI Y, QIAN C M, LU W J, ZHANG Z Q, PANG X Q. Changes of peel colour of banana and plantain fruits during ripening at different temperature[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006(3): 617-620. (in Chinese)
- [14] HUANG J, ZHAO X, BÜRGER M, CHORY J, WANG X. The role of ethylene in plant temperature stress response[J]. Trends in Plant Science, 2023, 28(7): 808-824.

- [15] PATHAK N, ASIF M H, DHAWAN P, SRIVASTAVA M A. Expression and activities of ethylene biosynthesis enzymes during ripening of banana fruits and effect of 1-MCP treatment[J]. *Plant Growth Regulation*, 2003, 40: 11-19.
- [16] JIANG Y, JOYCE D C, JIANG W, LU W. Effects of chilling temperatures on ethylene binding by banana fruit[J]. *Plant Growth Regulation*, 2004, 43: 109-115.
- [17] LIZADA C. *Mango[M]*//*Biochemistry of fruit ripening*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993: 255-271.
- [18] BALDRY J, COURSEY D G, HOWARD G E. The comparative consumer acceptability of triploid and tetraploid banana fruit[J]. *Tropical Science*, 1981, 23: 33-66.
- [19] IMSABAI W, KETSA S, VAN DOORN W G. Physiological and biochemical changes during banana ripening and finger drop[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2006, 39(2): 211-216.
- [20] PAULL R E. Ethylene, storage and ripening temperatures affect Dwarf Brazilian banana finger drop[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1996, 8(1): 65-74.
- [21] VICENTE A R, SALADIÉ M, ROSE J K C, LABAVITCH J M. The linkage between cell wall metabolism and fruit softening: looking to the future[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(8): 1435-1448.
- [22] XIAO Y, KUANG J, QI X, YE Y, WU Z X, CHEN J, LU W. A comprehensive investigation of starch degradation process and identification of a transcriptional activator Mab HLH 6 during banana fruit ripening[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2018, 16(1): 151-164.
- [23] WANG H P, ZHOU X, HU W F, HU X, MURTAZA A, WANG L F, XU X Y, PAN S Y. Mechanism of the abnormal softening of banana pulp induced by high temperature and high humidity during postharvest storage[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2024, 17(11): 3577-3587.
- [24] 周璇. 高湿高温导致香蕉异常软化的机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- ZHOU X. Mechanism of abnormal softening of bananas induced by high humidity and high temperature[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [25] LII C Y, CHANG S M, YOUNG Y L. Investigation of the physical and chemical properties of banana starches[J]. *Journal of food Science*, 1982, 47(5): 1493-1497.
- [26] PERONI-OKITA F H G, CARDOSO M B, AGOPIAN R G D, LOURO R P, NASCIMENTO J R O, PURGATTO E, TAVARES M I B, LAJOLO F M, CORDENUNSI B R. The cold storage of green bananas affects the starch degradation during ripening at higher temperature[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 96(1): 137-147.
- [27] SHIGA T M, SOARES C A, NASCIMENTO J R O, PURGATTO E, LAJOLO F M, CORDENUNSI B R. Ripening-associated changes in the amounts of starch and non-starch polysaccharides and their contributions to fruit softening in three banana cultivars[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(8): 1511-1516.
- [28] 庄军平, 李雪萍, 陈维信. 香蕉果实后熟过程中果肉软化差异的研究[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(5): 983-988.
- ZHUANG J P, LI X P, CHEN W X. Differences in banana internal and outer pulp during ripening and softening[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(5): 983-988. (in Chinese)
- [29] 马俊炜. 催熟温度影响‘中蕉 9 号’品质及相关基因表达特性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- MA J W. Effects of ripening temperature on the quality and expressions of quality-formation related genes in ‘Zhongjiao No.9’[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [30] MARRIOTT J, ROBINSON M, KARIKARI S K. Starch and sugar transformation during the ripening of plantains and bananas[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1981, 32(10): 1021-1026.
- [31] HENDERSON R W, MORTON R K, RAWLINSON W A. Oligosaccharide synthesis in the banana and its relationship to the transferase activity of invertase[J]. *Biochemical Journal*, 1959, 72(2): 340.