

低温贮藏后货架期菠萝抗氧化活性和品质分析

徐函兵¹, 耶兴元¹, 姚全胜², 涂行浩², 洪克前^{2*}

1. 信阳农林学院, 河南信阳 464000; 2. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所/海南省热带园艺产品采后生理与保鲜重点实验室/农业农村部热带果树生物学重点实验室, 广东湛江 524091

摘要: 菠萝果实富含水分, 不耐贮藏, 货架期相对较短, 严重制约菠萝鲜果销售。低温贮藏是延缓采后菠萝果实品质劣变的有效措施之一。为探讨低温贮藏后不同货架期菠萝抗氧化活性和品质的变化, 以巴厘菠萝为试材, 采用相关性分析、主成分分析等方法, 对 10 ℃ 低温贮藏、25 ℃ 货架期菠萝果实 12 个抗氧化活性和品质指标进行综合评价。结果表明: 低温贮藏后货架期菠萝苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性与总酚 (TP) 含量变化趋势一致, 可滴定酸 (TA)、维生素 C (AsA) 含量显著下降, 但过氧化氢 (H₂O₂)、可溶性固形物 (TSS) 含量无显著变化。相关性分析显示, 货架期菠萝 AsA 含量与总抗氧化能力 (TAOC) 呈显著正相关。主成分分析表明, H₂O₂、丙二醛 (MDA) 含量和超氧化物歧化酶 (SOD)、多酚氧化酶 (PPO) 活性等决定货架期菠萝抗氧化活性, TP、TA 含量等可以作为评价菠萝货架期品质的重要指标。低温贮藏 15 d 菠萝综合评价分值最大, 货架期 1 d 菠萝综合评价分值较高。因此, 菠萝低温贮藏 15~20 d, 低温贮藏后货架期 1 d, 可有效维持菠萝的抗氧化活性和品质。

关键词: 菠萝; 货架期; 抗氧化; 品质

中图分类号: S668.3 文献标志码: A

Analysis of Antioxidant Activity and Fruit Quality of Pineapples During Shelf Life Undergoing Low Temperature Storage

XU Hanbing¹, YE Xingyuan¹, YAO Quansheng², TU Xinghao², HONG Keqian^{2*}

1. Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Henan 464000, China; 2. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Hainan Provincial Key Laboratory for Postharvest Physiology and Technology of Tropical Horticultural Products / Key Laboratory of Tropical Fruit Biology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang, Guangdong 524091, China

Abstract: Pineapple fruit is rich in water, not suitable for storage, and has a relatively short shelf life, which seriously restricts the sales of fresh pineapple fruit. Low temperature storage is one of the effective measures to delay the quality deterioration of pineapple fruits after harvesting. To investigate the changes in antioxidant activity and quality of pineapples fruits at different shelf periods after low temperature storage, principal component analysis (PCA) and correlation analysis methods were used to comprehensively evaluate twelve antioxidant activity and quality parameters of pineapple fruits storage at 10 ℃ and shelf life at 25 ℃. The results indicated that the trend of phenylalanine ammonia lyase (PAL) activity and total phenolics (TP) content of fruits changes during the shelf life after low-temperature storage was consistent, with a significant decrease in titratable acidity (TA) and vitamin C (AsA) content, but no significant change in hydrogen peroxide (H₂O₂) and total soluble solids (TSS) content. Correlation analysis showed that the shelf life AsA content was significantly positively correlation with TAOC. PCA showed that the content of H₂O₂, malondialdehyde (MDA), and the activities of superoxide dismutase (SOD) and polyphenol oxidase (PPO) exhibited the determined antioxidant activity of pineapple fruits, while TP and TA content acted as important parameters for evaluating pineapple fruits during shelf life. The comprehensive evaluation score of pineapple fruits storage at low temperature for fifteen

收稿日期 2025-03-04; 接受日期 2025-04-11

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32460790); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (No. 2025A1515012724)。

作者简介 徐函兵 (1970—), 男, 副教授, 研究方向: 植物营养生理。*通信作者 (Corresponding author): 洪克前 (HONG Keqian)
E-mail: hkq0825@126.com。

days showed the highest, and the comprehensive evaluation score of pineapple fruits with one day shelf life showed relatively high. Therefore, storing pineapples at low temperatures for 15–20 days followed by a shelf life of 1 day can effectively maintain their antioxidant activity and quality.

Keywords: pineapple; shelf life; antioxidant; quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.08.020

菠萝 (*Ananas comosus* L. Merrill) 是世界三大热带水果之一。菠萝果实富含水分, 采后生理代谢旺盛, 不耐贮藏, 货架期相对较短, 严重制约菠萝鲜果销售。已有研究表明多种措施可延缓采后果实品质劣变, 5 mmol/L 阿魏酸浸泡金鹏 218 番果实能够提高番茄维生素 C (AsA) 和番茄红素含量^[1]; 壳聚糖 (800×卡多赞) 浸泡纽荷尔脐橙果实能维持脐橙果肉较高的可溶性固形物 (TSS)、可滴定酸 (TA)、AsA、总酚 (TP) 含量^[2]; 金魁猕猴桃果实经 0.1 mmol/L 茉莉酸甲酯熏蒸后 25 °C 贮藏, 发现果实 TSS 含量相对较高, TA 含量下降较慢, TP 含量积累^[3]; 0.1% 乙醇熏蒸处理采后蓝莓可减缓果实中 TSS 的下降并提高 TP 含量^[4]; 西州密 25 号哈密瓜经 0.3 g/L 水杨酸浸泡, 可以延缓哈密瓜贮藏果实 TSS 和 TA 含量下降^[5]。但低温仍然是当前贮藏果实的有效措施之一, 低温贮藏延缓了红江橙 AsA、TSS 含量及果实硬度的降低^[6], 与 20 °C 常温贮藏相比, 软枣猕猴桃猕枣 1 号 1.5 °C 贮藏果实软化较慢, 腐烂率较低^[7]。当观测指标较多时, 研究者通常利用主成分分析评价贮藏期与货架期果实品质, 如在低温下, 利用主成分分析发现妃子笑、桂味、糯米糍和淮枝 4 个荔枝品种中, 妃子笑和桂味的果实贮藏品质指标更好^[8]。

已有研究对菠萝的贮藏条件和效果进行了多方面的探讨。就包装材料而言, 0.05 mm 聚氯乙烯薄膜能有效降低失重率, 同时维持可溶性总糖含量^[9]。气调贮藏显著优于常温和普通冷藏, 贮藏 15 d 后感官品质与新鲜菠萝无显著差异, 失重率仅为 4.49%^[10]。甲酸乙酯熏蒸 (30~90 mg/L) 可抑制呼吸强度和失重率, 但高浓度 (120 mg/L) 会导致果实劣变^[11]。氯化钙浸泡 (1%) 通过提高抗氧化性和降低酚类代谢抑制黑心病, 同时延缓 AsA 和可溶性糖的下降^[12]。抗坏血酸处理 (0.2%) 能有效抑制黑心病, 保持果实硬度和营养成分, 效果优于 0.4% 浓度^[13]。由此可见, 气调贮藏和适当化学处理可保持菠萝品质。

本课题组发现 4 °C 贮藏菠萝果实可能产生冷

害, 加剧货架期果实品质下降, 10 °C 贮藏能够保持货架期品质^[14]。就品质指标而言, 与 25 °C 相比, 10 °C 贮藏可以减缓 AsA 和 TA 下降速率, 10 °C 贮藏菠萝 TSS 保持相对稳定, 25 °C 贮藏 TSS 有所下降。但就抗氧化酶活性而言, 过氧化物酶 (POD) 活性不受贮藏温度的影响, 多酚氧化酶 (PPO) 活性随着贮藏温度的升高而升高^[15]。

鉴于 10 °C 贮藏能够较好地保持货架期品质^[14], 本研究以巴厘菠萝 (*Ananas comosus* cv. Comte de Paris) 果实为试材, 研究 10 °C 低温贮藏后, 25 °C 货架期果实超氧化物歧化酶 (SOD)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、过氧化氢酶 (CAT)、PPO、超氧阴离子 (OFR)、过氧化氢 (H₂O₂)、丙二醛 (MDA)、总抗氧化能力 (TAOC) 等抗氧化指标以及 TSS、TA、TP 和 AsA 含量等品质指标的变化, 通过对以上抗氧化活性和品质指标的显著性分析、相关性分析和主成分分析探讨菠萝果实 10 °C 贮藏时间对货架期抗氧化活性和品质的影响, 以期对菠萝果实仓储期和货架期销售方案的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菠萝品种为巴厘 (*Ananas comosus* cv. Comte de Paris), 采收绿熟、无机械损伤、无病虫害、大小相近的夏季果 (7 月果) 100 个, 采用施保功 (500 mg/L) 对果实表面杀菌, 然后用双蒸水冲洗果实。果实晾干后装入聚乙烯塑料 (0.04 mm) 袋中, 放入培养箱 (10 °C、相对湿度为 90%~95%) 中贮藏, 取出贮藏果实置于室温 (25±1) °C、相对湿度为 60%~80% 的环境中 (记为货架期), 分别于不同货架期随机选取 3 个果实, 果肉切成小块, 液氮速冻后, 置于 -80 °C 保存备用。所有指标均重复测定 3 次。

1.2 方法

1.2.1 品质指标测定 采用手持折光仪测定可溶性固形物 (TSS) 含量, 单位以 Brix 表示。可滴定酸 (TA) 含量测定采用酸碱滴定法, 参照张志良等^[16]的方法进行, 结果以 mmol/100 g 表示; 维生素 C (AsA) 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定

法, 参照赵晓梅等^[17]的方法进行, 结果以 mg/100 g 表示。

1.2.2 抗氧化能力指标测定 CAT、SOD、PAL、PPO、TAOC、OFR、H₂O₂、MDA 和 TP 等测定采用苏州科铭生物技术有限公司试剂盒, 具体方法详见操作手册。CAT、SOD、PAL、PPO 和 TAOC 酶活性均以 U/g 表示, OFR 含量以 μmol/g 表示, H₂O₂ 含量以 nmol/(min·g)表示, MDA 含量以 nmol/g 表示, TP 含量以 mg/g 表示。

1.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据整理, 采用 SPSS 20 软件进行数据主成分分析。

2 结果与分析

2.1 低温贮藏和货架期菠萝抗氧化活性分析

果实抗氧化活性是抗氧化酶和非酶抗氧化物质共同作用的结果, 不同的环境条件下, 植物采

取不同的策略, 不同类型抗氧化酶协同清除活性氧^[18-21]。数据分析表明, 随着低温贮藏时间的延长, 菠萝果实 SOD 活性、MDA 含量升高, 低温贮藏 15、20 d 时 SOD 活性分别是对照的 189.58%、329.73%。低温贮藏期间 PPO 活性呈下降趋势, 但贮藏 0、5、10、15 d 时 PPO 活性无显著差异。CAT 活性和 TAOC 波动较大, 贮藏 15 d 时 CAT 活性和 TAOC 均显著高于对照 (表 1)。同时低温贮藏对 PAL 活性和 OFR、H₂O₂ 含量无显著影响。如表 2 所示, 菠萝果实低温贮藏 10 d 后, 随着货架期延长, SOD 活性和 TAOC 均显著下降, PAL 活性显著上升, 货架期 4 d 时 PAL 活性是货架期 1 d 的 199.02%。而 PPO 活性和 H₂O₂ 无显著变化。表 2 显示低温贮藏 15、20 d 时, 货架期菠萝果实 PAL 活性、OFR、H₂O₂ 无显著变化, 但 PPO、CAT 活性均显著下降。可见货架期和低温贮藏对菠萝果实 H₂O₂ 影响不显著。

表 1 低温贮藏菠萝果实抗氧化活性分析
Tab. 1 Analysis of pineapple fruits antioxidant activity stored at low temperature

贮藏时间 Storage time/d	CAT /(U·g ⁻¹)	SOD /(U·g ⁻¹)	PAL /(U·g ⁻¹)	PPO /(U·g ⁻¹)	OFR /(μmol·g ⁻¹)	H ₂ O ₂ /(nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	MDA /(nmol·g ⁻¹)	TAOC /(U·g ⁻¹)
0(CK)	3.39±0.00 ^{bc}	17.56±0.76 ^c	5.57±0.39 ^a	22.70±0.69 ^a	0.048±0.005 ^a	0.22±0.02 ^a	3.61±0.08 ^b	64.81±1.17 ^c
5	3.62±0.20 ^b	16.36±0.67 ^c	5.25±0.70 ^a	22.60±0.35 ^a	0.051±0.009 ^a	0.23±0.07 ^a	3.53±0.04 ^{bc}	105.60±3.29 ^a
10	2.83±0.39 ^{cd}	17.75±1.09 ^c	5.05±1.14 ^a	22.30±0.69 ^a	0.045±0.005 ^a	0.23±0.09 ^a	3.23±0.15 ^c	72.81±0.41 ^b
15	4.29±0.20 ^a	33.29±6.15 ^b	4.53±0.60 ^a	22.00±0.17 ^a	0.053±0.010 ^a	0.32±0.02 ^a	4.30±0.11 ^a	102.81±7.47 ^a
20	2.49±0.20 ^d	57.90±4.42 ^a	5.45±1.08 ^a	16.00±0.62 ^b	0.045±0.005 ^a	0.29±0.03 ^a	4.00±0.13 ^a	73.35±0.41 ^b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference (P<0.05).

表 2 货架期菠萝果实抗氧化活性分析
Tab. 2 Analysis of pineapple fruits antioxidant activity during shelf life

贮藏时间 Storage time/d	货架期 Shelf time/d	CAT /(U·g ⁻¹)	SOD /(U·g ⁻¹)	PAL /(U·g ⁻¹)	PPO /(U·g ⁻¹)	OFR /(μmol·g ⁻¹)	H ₂ O ₂ /(nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	MDA /(nmol·g ⁻¹)	TAOC /(U·g ⁻¹)
10	1.0	3.39±0.90 ^{cd}	46.82±1.50 ^{bc}	4.07±0.90 ^{cde}	21.80±0.46 ^{bcd}	0.056±0.005 ^{ab}	0.24±0.09 ^c	4.04±0.11 ^{abc}	111.71±1.94 ^a
	2.0	2.94±0.20 ^d	47.00±0.83 ^{bc}	4.70±1.24 ^{bcd}	20.10±0.30 ^{cd}	0.048±0.005 ^b	0.32±0.08 ^{bc}	4.39±0.22 ^a	108.20±1.08 ^{ab}
	3.0	3.84±0.20 ^{bc}	29.21±1.61 ^d	6.06±0.62 ^b	18.40±0.17 ^d	0.068±0.017 ^a	0.31±0.04 ^{bc}	3.78±0.04 ^{bc}	96.98±1.12 ^c
	4.0	4.07±0.34 ^b	28.27±0.84 ^d	8.10±0.18 ^a	21.00±0.60 ^{bcd}	0.059±0.009 ^{ab}	0.34±0.05 ^{bc}	4.34±0.15 ^a	61.85±1.17 ^f
15	1.0	4.07±0.34 ^b	51.69±3.69 ^{ab}	5.45±0.98 ^{bc}	22.50±1.31 ^{bc}	0.056±0.005 ^{ab}	0.29±0.03 ^{bc}	4.17±0.17 ^{ab}	79.10±0.97 ^e
	2.0	2.83±0.20 ^d	53.22±0.18 ^a	4.82±0.85 ^{bcd}	18.50±0.46 ^d	0.056±0.010 ^{ab}	0.33±0.03 ^{bc}	3.70±0.09 ^c	95.09±0.62 ^c
20	1.0	5.54±0.20 ^a	41.91±1.65 ^c	3.75±0.85 ^e	24.30±0.30 ^a	0.053±0.005 ^b	0.53±0.05 ^a	4.21±0.16 ^a	103.17±0.95 ^b
	1.5	2.83±0.20 ^d	49.07±3.69 ^{ab}	2.88±0.88 ^e	17.40±0.30 ^e	0.053±0.005 ^b	0.40±0.05 ^{ab}	4.13±0.08 ^{ab}	83.77±1.12 ^d

注: 同列不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference (P<0.05).

2.2 低温贮藏和货架期菠萝品质分析

多酚和维生素 C 属于非酶抗氧化物质，但研究表明，多酚和维生素 C 作为果实风味物质常用于评价水果品质^[18-20, 22]，因此，本研究将多酚、维生素 C 与可溶性固形物、可滴定酸作为品质指标进行分析。如表 3 所示，随着低温贮藏时间延长，TA 含量显著升高 ($P<0.05$)，低温贮藏 20 d 时 TA 含量是对照的 168.42%。低温贮藏期间 TP 含量波动上升，最大值出现在贮藏 15 d。表 4 显示，菠萝低温贮藏 10 d 后随着货架期延长 TP 含量显著上升，TA 含量显著下降 ($P<0.05$)，低温贮藏 15、20 d 时货架期菠萝果实 TP 含量均显著降低 ($P<0.05$) (表 4)。数据分析表明，低温贮藏和货架期菠萝 TSS 无显著差异，AsA 含量呈下降趋势。

2.3 低温贮藏及货架期菠萝抗氧化活性和品质的相关性分析

水果抗氧化活性影响细胞膜系统完整性，进而影响水果品质，因此抗氧化活性指标、品质指标及抗氧化活性指标和品质指标之间均可能具有相关性。菠萝抗氧化活性和品质指标相关性分

表 3 低温贮藏菠萝果实品质分析
Tab. 3 Analysis of pineapple fruits quality stored at low temperature

贮藏时间 Storage time/d	TP /(mg·g ⁻¹)	AsA/ [mg· (100 g) ⁻¹]	TSS /Brix	TA /[mmol· (100 g) ⁻¹]
0(CK)	0.20±0.00 ^d	13.83±0.29 ^c	12.43±1.03 ^a	9.50±0.87 ^c
5	0.23±0.01 ^b	17.33±0.29 ^a	13.67±0.50 ^a	14.00±0.43 ^b
10	0.21±0.00 ^c	15.67±0.58 ^b	13.80±0.60 ^a	14.00±0.43 ^b
15	0.25±0.01 ^a	12.67±0.29 ^d	13.27±0.75 ^a	14.85±0.26 ^b
20	0.23±0.00 ^b	11.33±0.29 ^e	14.13±0.23 ^a	16.00±0.43 ^a

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

析结果显示，低温贮藏菠萝 PPO 活性与 SOD 活性呈显著负相关(表 5)。货架期 AsA 含量与 TAOC 呈显著正相关($P<0.05$)，与 TP 含量呈负相关(表 6)，推测货架期菠萝 TAOC 中非酶抗氧化物质 AsA 比 TP 贡献更大。货架期 PPO 活性与 CAT 活性呈显著正相关(表 6)。由于相关性分析过程中 PPO 活性与 SOD、CAT 活性等指标间有信息重叠，为准确评价低温贮藏后货架期菠萝抗氧化活性和品质，需进一步对各指标进行主成分分析。

表 4 货架期菠萝果实品质分析
Tab. 4 Analysis of pineapple fruits quality during shelf life

贮藏时间 Storage time/d	货架期 Shelf time/d	TP /(mg·g ⁻¹)	AsA /[mg·(100 g) ⁻¹]	TSS /Brix	TA /[mmol·(100 g) ⁻¹]
10	1.0	0.23±0.00 ^e	15.50±0.50 ^a	13.50±0.99 ^a	17.75±1.15 ^a
	2.0	0.24±0.00 ^d	15.33±0.29 ^a	14.37±0.83 ^a	15.00±0.00 ^b
	3.0	0.25±0.01 ^c	8.83±0.29 ^e	14.57±0.81 ^a	14.00±0.43 ^c
	4.0	0.27±0.00 ^b	4.17±0.58 ^e	14.43±0.81 ^a	14.00±0.43 ^c
15	1.0	0.30±0.00 ^a	8.83±0.29 ^e	13.53±0.40 ^a	15.40±0.38 ^b
	2.0	0.26±0.00 ^c	2.33±0.29 ^f	13.37±0.12 ^a	15.00±0.00 ^b
20	1.0	0.30±0.01 ^a	11.33±0.29 ^b	13.43±0.64 ^a	17.50±0.87 ^a
	1.5	0.27±0.00 ^b	7.83±0.29 ^d	13.50±0.17 ^a	15.00±0.00 ^b

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.4 低温贮藏和货架期菠萝果实抗氧化活性和品质的主成分分析和综合评价

2.4.1 菠萝抗氧化活性和品质的主成分分析 对低温贮藏和货架期菠萝抗氧化活性和品质指标进行主成分分析，结果(表 7)显示，前 4 个主成分(特征值>1)累计贡献率为 81.710%，说明该 4 个主成分反映了总体信息的绝大部分信息。各载荷表明，TP、H₂O₂、MDA、TA、SOD 主要决定第 1 主成分，说明 TP、H₂O₂、MDA、TA、SOD

在低温贮藏期和货架期菠萝果实抗氧化活性和品质评价中的作用极为重要，因此其可作为第 1 主成分代表指标。决定第 2 主成分的主要是 PPO、AsA。第 3 主成分决定指标主要是 CAT、PAL。第 4 主成分的代表指标 TSS。
2.4.2 菠萝抗氧化活性和品质的主成分综合评价 以主成分贡献率为权重，计算菠萝抗氧化和品质指标的主成分得分(F)和主成分综合分值(D)，并依据主成分综合分值将菠萝抗氧化活性和品质

表 5 低温贮藏菠萝抗氧化活性和品质的相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of antioxidant activity and quality of pineapple fruits in low temperature storage

指标 Index	CAT	SOD	PAL	PPO	OFR	H ₂ O ₂	MDA	TAOC	TP	AsA	TSS	TA
CAT	1.000											
SOD	-0.375	1.000										
PAL	-0.649	0.042	1.000									
PPO	0.627	-0.948*	-0.300	1.000								
OFR	0.982**	-0.231	-0.633	0.488	1.000							
H ₂ O ₂	0.325	0.689	-0.651	-0.431	0.420	1.000						
MDA	0.433	0.663	-0.429	-0.406	0.547	0.911*	1.000					
TAOC	0.712	-0.115	-0.633	0.274	0.785	0.370	0.361	1.000				
TP	0.499	0.461	-0.699	-0.238	0.622	0.837	0.769	0.796	1.000			
AsA	0.161	-0.834	0.027	0.699	0.087	-0.709	-0.743	0.334	-0.269	1.000		
TSS	-0.501	0.513	-0.110	-0.601	-0.398	0.248	-0.014	0.198	0.399	-0.015	1.000	
TA	-0.165	0.637	-0.434	-0.584	-0.042	0.626	0.379	0.433	0.737	-0.231	0.901*	1.000

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 6 货架期菠萝抗氧化活性和品质的相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis of antioxidant activity and quality of pineapple fruits during shelf life

指标 Index	CAT	SOD	PAL	PPO	OFR	H ₂ O ₂	MDA	TAOC	TP	AsA	TSS	TA
CAT	1.000											
SOD	-0.396	1.000										
PAL	0.165	-0.686	1.000									
PPO	0.796*	-0.007	0.050	1.000								
OFR	0.161	-0.656	0.532	-0.237	1.000							
H ₂ O ₂	0.580	-0.084	-0.320	0.269	-0.269	1.000						
MDA	0.248	-0.095	0.099	0.460	-0.586	0.210	1.000					
TAOC	-0.079	0.329	-0.610	0.108	-0.251	-0.004	-0.224	1.000				
TP	0.650	0.083	0.007	0.465	-0.082	0.594	0.210	-0.480	1.000			
AsA	0.081	0.136	-0.422	0.378	-0.370	-0.115	0.396	0.709*	-0.359	1.000		
TSS	-0.042	-0.771*	0.678	-0.244	0.407	-0.231	0.216	-0.190	-0.365	0.047	1.000	
TA	0.374	0.396	-0.598	0.659	-0.396	0.220	0.096	0.601	0.059	0.585	-0.655	1.000

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

降序排列（表 8）显示，低温贮藏菠萝抗氧化活性和品质的综合评价排名依次为：15、5、20、10、0 d。货架期菠萝抗氧化活性和品质综合评价分值较高的是：货架期 1 d（贮藏 20 d）、货架期 1 d（贮藏 15 d）、货架期 4 d（贮藏 10 d）货架期 3 d（贮藏 10 d）。

3 讨论

现代农业涉及生产、仓储、物流、销售等诸多环节，仓储期和货架期品质对菠萝销售具有重

要意义，而菠萝抗氧化能力是影响菠萝品质的重要因素之一。已有研究表明，低温贮藏可以提高西番莲^[23]、芒果^[24]、苹果^[25]、龙眼^[26]、鲜切菠萝^[27]等果实的抗氧化能力和品质。

SOD 和 CAT 作为主要抗氧化酶，SOD 能催化体内过量的 O₂生成 H₂O₂，而 CAT 催化 H₂O₂还原成 H₂O 和 O₂。本研究中 CAT 在低温贮藏和货架期均波动较大，推测 CAT 在低温贮藏和货架期均有响应，但 SOD 活性在低温贮藏 0~10 d 时无显著变化，而低温贮藏 15~20 d 时 SOD 活性显

表 7 菠萝抗氧化活性和品质的主成分分析
Tab. 7 Principal component analysis of pineapple fruits antioxidant activity and quality

指标 Index	主成分因子 Principal component factor			
	1	2	3	4
TP	0.888	0.036	0.272	-0.169
H ₂ O ₂	0.816	0.144	0.090	-0.252
MDA	0.751	-0.026	0.019	-0.011
TA	0.730	0.193	-0.406	0.273
SOD	0.668	-0.247	-0.577	-0.212
OFR	0.512	-0.243	0.476	0.297
CAT	0.490	0.528	0.662	0.030
TAOC	0.374	0.547	-0.350	0.495
TSS	0.292	-0.526	-0.010	0.703
PPO	-0.125	0.778	0.521	0.003
PAL	-0.234	-0.555	0.655	0.270
AsA	-0.502	0.645	-0.273	0.372
特征值	4.048	2.364	2.142	1.251
方差贡献率/%	33.733	19.701	17.850	10.426
累计贡献率/%	33.733	53.435	71.284	81.710

表 8 菠萝抗氧化活性和品质的主成分分值
(*F*) 和主成分综合分值 (*D*)
Tab. 8 Principal component scores (*F*) and comprehensive scores (*D*) of pineapple fruits antioxidant activity and quality

贮藏时间 Storage time/d	货架期 Shelf time/d	分值 Score				
		<i>F</i> ₁	<i>F</i> ₂	<i>F</i> ₃	<i>F</i> ₄	<i>D</i>
20	1.0	3.332	2.777	0.932	-0.646	2.167
15	1.0	1.468	-0.051	0.926	-0.674	0.710
15	0	0.583	1.439	0.315	-0.065	0.648
10	4.0	0.832	-2.312	2.876	0.303	0.453
10	3.0	0.607	-1.524	1.253	1.793	0.386
10	1.0	0.367	1.328	-1.414	1.121	0.306
10	2.0	0.389	0.126	-1.598	1.123	-0.015
20	1.5	1.338	-0.673	-1.572	-1.475	-0.141
5	0	-2.092	1.430	0.241	1.295	-0.301
15	2.0	0.768	-1.372	-0.767	-1.039	-0.314
20	0	-0.309	-2.077	-2.188	-0.175	-1.129
10	0	-3.291	0.327	-0.241	0.251	-1.301
0	0	-3.993	0.583	1.236	-1.813	-1.469

著升高。因此，低温贮藏 15~20 d 期间菠萝果实可能主要通过提高 SOD 活性缓解氧化胁迫。

通常 PAL 参与酚类化合物的生物合成，本研究中 PAL 在菠萝低温贮藏期间无显著差异，但在货架期间活性显著变化，且货架期 TP 含量变化趋势与货架期 PAL 活性变化趋势一致，与荔枝^[18]果皮总酚含量和 PAL 活性变化趋势相似，推测

PAL 可能参与货架期菠萝 TP 的生物合成。

菠萝低温贮藏 10 d 后货架期品质指标差异显著性分析表明，TP 和 AsA 变化趋势相反，而此时 AsA 含量变化趋势与 TAOC 活性变化趋势一致，同时菠萝抗氧化活性和品质指标相关性分析结果显示，货架期 AsA 与 TAOC 呈显著正相关，与 TP 呈负相关。AsA 作为非酶抗氧化剂，可直接清除 H₂O₂等 ROS，抑制 ROS 对菠萝果实细胞的破坏，使菠萝货架期延长^[28]。低温贮藏期间和货架期 PPO 活性呈下降趋势，推测 AsA 通过抑制 PPO 活性，减少酚类物质氧化褐变，从而保持菠萝色泽和风味，这与鲜食核桃仁^[29]的结果相似。AsA 也可以与 SOD、CAT 等协同作用，缓解果实氧化胁迫^[30]。可见，AsA 通过酶促和非酶促途径，提升菠萝果实的抗氧化能力，延长贮藏期和货架期，并维持品质。

主成分分析法是水果品质评价方法之一^[20-21, 31]。本研究将菠萝 12 个抗氧化活性和品质指标进行主成分分析，结果表明，前 4 个主成分累计贡献率为 81.710%，反映了总体信息的大部分信息。各特征向量表明 H₂O₂、MDA 和 SOD、PAL、PPO、CAT 等抗氧化酶活性是菠萝货架期抗氧化能力的重要决定因素，而 TP、TA 可以作为评价菠萝货架期品质的重要指标。TA 作为评价菠萝货架期的重要品质指标与葡萄的货架期品质变化结果相似^[32]。主成分综合评价显示，低温贮藏菠萝抗氧化活性和品质的综合评价排名依次为 15、5、20、10、0 d。货架期菠萝抗氧化活性和品质综合评价分值较高的是：货架期 1 d（贮藏 20 d）、货架期 1 d（贮藏 15 d）、货架期 4 d（贮藏 10 d）、货架期 3 d（贮藏 10 d）。

菠萝低温贮藏 15~20 d 时 SOD 活性显著升高，且 TAOC 显著高于对照，但此时 MDA 含量也显著高于低温贮藏 0~10 d，MDA 是脂质过氧化终产物，反映了有机体在氧化胁迫下膜脂的损伤程度，其含量升高可能意味着菠萝抗氧化能力的下降，显然抗氧化活性指标对抗氧化能力解释不一致可能干扰本研究对低温贮藏期间菠萝抗氧化能力的判断，为准确评价低温贮藏及货架期菠萝抗氧化活性和品质，对指标进行了主成分分析。主成分综合评价分值显示，就低温贮藏时间而言，贮藏 15 d 较为适宜（综合得分最高），延长贮藏时间（20 d）和缩短贮藏时间（5~10 d）菠萝抗氧化活性和品质综合评价分值均下降。糖酸比

(TSS/TA) 是衡量菠萝风味的重要指标, 低温贮藏 15 d 和 20 d 的糖酸比分别为 0.89 和 0.88, 比较接近, 因此菠萝低温贮藏适宜时间为 15~20 d。同时, 货架期主成分综合评价分值较高的处理为 1 d 货架期果实, 显然, 对 1 d 货架期与菠萝销售而言偏短, 本研究所述货架期 1 d 是主成分综合评价筛选的较佳结果, 即与其他货架期相比, 1 d 货架期菠萝品质较好, 但并不能排除其他货架期菠萝仍具有销售价值。

综上所述, 菠萝 10 °C 低温贮藏及 25 °C 货架期适宜时间分别为低温贮藏 15~20 d, 货架期 1 d。本研究以巴厘菠萝为试材, 研究结论虽然对其他菠萝品种低温贮藏后货架期有借鉴意义, 但不同菠萝品种低温贮藏对货架期的影响尚需要进一步验证。

参考文献

- [1] 胡斌, 潘洁, 陈丽, 郑小林, 李博强. 阿魏酸处理对番茄采后果实品质和青霉病害的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 14-18, 24.
HU B, PAN J, CHEN L, ZHENG X L, LI B Q. Effect of ferulic acid treatment on postharvest quality and blue mold in tomato fruit[J]. Storage and Process, 2019, 19(1): 14-18, 24. (in Chinese)
- [2] 邓礼艳, 郑劲捷, 林河通, 陈艺晖, 林毅雄, 林育钊, 林艺芬. 新型液态壳聚糖处理对纽荷尔脐橙果实贮藏品质和耐贮性的影响[J]. 热带作物学报, 2023, 44(7): 1435-1444.
DENG L Y, ZHENG S J, LIN H T, CHEN Y H, LIN Y X, LIN Y Z, LIN Y F. Influences of a novel liquid chitosan formulation treatment on the storage quality and storability of harvested newhall navel orange fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(7): 1435-1444. (in Chinese)
- [3] 盘柳依, 赵显阳, 陈明, 付永琦, 向妙莲, 陈金印. 外源茉莉酸甲酯处理对采后猕猴桃果实品质和抗氧化酶活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(9): 190-196.
PAN L Y, ZHAO X Y, CHEN M, FU Y Q, XIANG M L, CHEN J Y. Effects of exogenous methyl jasmonate on fruit qualities and antioxidases activities of postharvest kiwifruits[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(9): 190-196. (in Chinese)
- [4] 姬亚茹, 周福慧, 姜爱丽, 顾思彤, 胡文忠. 乙醇熏蒸处理对采后蓝莓果实品质的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(13): 85-92.
JI Y R, ZHOU F H, JIANG A L, GU S T, HU W Z. Effects of ethanol fumigation treatments on the quality of postharvest blueberry fruits[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(13): 85-92. (in Chinese)
- [5] 耿新丽, 张翠环, 张银欢, 姚军, 廖新福. 水杨酸处理对采后哈密瓜果实贮藏品质的影响[J]. 北方园艺, 2017(8): 136-139.
GENG X L, ZHANG C H, ZHANG Y H, YAO J, LIAO X F. Effect of salicylic acid treatment on hami melon fruit storage quality[J]. Northern Horticulture, 2017(8): 136-139. (in Chinese)
- [6] 姚艳丽, 毛丽君, 姚希猛, 贺军军, 罗萍. 不同贮藏温度对不同砧木红江橙果实采后品质的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(2): 123-129.
YAO Y L, MAO L J, YAO X M, HE J J, LUO P. Effects of different storage temperature on the quality of different rootstocks Hongjiangcheng fruit[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(2): 123-129. (in Chinese)
- [7] 黄文俊, 冉欣雨, 王周倩, 钟彩虹. 不同贮藏温度对软枣猕猴桃‘猕枣 1 号’果实品质和贮藏性的影响[J]. 植物科学学报, 2022, 40(5): 695-704.
HUANG W J, RAN X Y, WANG Z Q, ZHONG C H. Effects of different storage temperature on fruit quality and storability of *Actinidia arguta* (Sieb. & Zucc.) Planch. ex Miq. ‘Mizao 1’[J]. Plant Science Journal, 2022, 40(5): 695-704. (in Chinese)
- [8] 王银红, 张珮, 江靖, 李高阳, 朱向荣. 四个荔枝品种采后低温贮藏品质指标差异分析及评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 288-293, 299.
WANG Y H, ZHANG P, JIANG J, LI G Y, ZHU X R. Analysis and evaluation on the differences of indexes of postharvest quality in four litchi cultivars during low-temperature storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(22): 288-293, 299. (in Chinese)
- [9] 徐函兵, 马克群, 张鲁斌, 弓德强, 洪克前. 包装对菠萝黑心病和品质的影响[J]. 热带作物学报, 2014, 35(11): 2303-2306.
XU H B, MA K Q, ZHANG L B, GONG D Q, HONG K Q. Influence of packing on quality changes and internal browning developments of pineapple fruit during storage[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(11): 2303-2306. (in Chinese)
- [10] 谢宇, 丁力行, 黄桂颖, 陈嘉澍, 沈向阳, 梁石麟. 不同贮藏方式对卡因菠萝品质的影响[J]. 制冷, 2024, 43(6): 50-55.
XIE Y, DING L X, HUANG G Y, CHEN J S, SHEN X Y, LIANG S L. Effect of different storage methods on quality of caine pineapple[J]. Refrigeration, 2024, 43(6): 50-55. (in Chinese)
- [11] 王毅, 刘涛, 李丽, 张凡华, 王跃进, 韩巨才. 甲酸乙酯熏蒸对菠萝贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2015, 40(3): 40-44.

- WANG Y, LIU T, LI L, ZHANG F H, WANG Y J, HAN J C. Effects of ethyl formate fumigation on postharvest quality of pineapple[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(3): 40-44. (in Chinese)
- [12] 谷会, 朱世江, 侯晓婉, 贾志伟, 张鲁斌. 氯化钙处理对菠萝采后黑心病及贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 161-167.
- GU H, ZHU S J, HOU X W, JIA Z W, ZHANG L B. Effect of calcium chloride treatment on internal browning and storage quality of pineapple after harvest[J]. Food Science, 2020, 41(9): 161-167. (in Chinese)
- [13] 侯晓婉, 鹿志伟, 谷会, 贾志伟, 张鲁斌. 外源抗坏血酸处理对采后菠萝黑心病发生和果实品质的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(10): 2014-2020.
- HOU X W, LU Z W, GU H, JIA Z W, ZHANG L B. Effects of exogenous ascorbic acid treatment on the occurrence of blackheart and fruit quality of postharvest pineapple[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(10): 2014-2020. (in Chinese)
- [14] 张鲁斌, 贾志伟, 谷会, 弓德强, 洪克前. 低温贮藏对货架期菠萝黑心病发生和果实品质维持的影响[J]. 果树学报, 2013, 30(4): 675-680.
- ZHANG L B, JIA Z W, GU H, GONG D Q, HONG K Q. Effect of low temperature storage on pineapple blackheart and fruit quality during shelf-life[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(4): 675-680. (in Chinese)
- [15] HONG K Q, XU H B, WANG J N, ZHANG L B, HU H G, JIA Z W, GU H, HE Q G, GONG D Q. Quality changes and internal browning developments of summer pineapple fruit during storage at different temperatures[J]. Scientia Horticulturae, 2013(151): 68-74.
- [16] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 262-264.
- ZHANG Z L, QU W J, LI X F. Guidelines for plant physiology experiments (Fourth Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 262-264. (in Chinese)
- [17] 赵晓梅, 江英, 吴玉鹏, 刘宽, 张志强. 果蔬中VC含量测定方法的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(3): 197-199.
- ZHAO X M, JIANG Y, WU Y P, LIU K, ZHANG Z Q. Assay research on VC in fruit and vegetable[J]. Food Science, 2006, 27(3): 197-199. (in Chinese)
- [18] 喻文涛, 曲姗姗, 李萌萌, 王光, 朱世江. 果实生长发育后期喷施蔗糖溶液对井岗红糯荔枝采后品质的影响[J]. 热带作物学报, 2023, 44(4): 799-808.
- YU W T, QU S S, LI M M, WANG G, ZHU S J. Effect of pre-harvest sucrose solution spray at the latter stage of fruit development on quality of litchi fruit during storage[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(4): 799-808. (in Chinese)
- Chinese)
- [19] 罗震宇, 张洁茹, 杨雪珍, 向妙莲, 陈金印, 陈明. 1-甲基环丙烯对“金艳”猕猴桃采后品质和保鲜的影响[J]. 中国南方果树, 2023, 52(2): 101-107, 114.
- LUO Z Y, ZHANG J R, YANG X Z, XIANG M L, CHEN J Y, CHEN M. Effects of 1-methylcyclopropene on postharvest quality and preservation of Jinyan kiwifruit[J]. South China Fruits, 2023, 52(2): 101-107, 114. (in Chinese)
- [20] 李昱昕, 吉宁, 王瑞, 刘仁婵, 聂华丽, 张妮, 刘梦琦, 陶秋运. 不同自发气调袋对玛瑙红樱桃贮藏品质的影响分析[J]. 包装工程, 2024, 45(15): 106-115.
- LI Y X, JI N, WANG R, LIU R C, NIE H L, ZHANG N, LIU M Q, TAO Q Y. Analysis on effects of different spontaneous modified atmosphere packaging bags on storage quality of Manaohong cherries[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(15): 106-115. (in Chinese)
- [21] 曾祥阳, 何云, 洪青梅, 李洪立, 张玄兵, 李琼, 胡文斌. 外源褪黑素对火龙果果实采后保鲜的影响[J]. 热带作物学报, 2025, 46(2): 420-429.
- ZENG X Y, HE Y, HONG Q M, LI H L, ZHANG X B, LI Q, HU W B. Effect of exogenous melatonin on the postharvest preservation of pitaya[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(2): 420-429. (in Chinese)
- [22] 林育钊, 冯梦琪, 陈洪彬, 蒋璇靓, 郑金水, 吴锦雯. 氧化白藜芦醇处理对黄皮果实贮藏特性和采后品质的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(4): 804-812.
- LIN Y Z, FENG M F, CHEN H B, JIANG X J, ZHENG J S, WU J W. Effects of oxyresveratrol treatment on the storage behavior and postharvest quality of wampee fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(4): 804-812. (in Chinese)
- [23] 巴良杰, 张丽敏, 蔡国俊, 彭熙, 李江阔, 张鹏, 王瑞. 低温对西番莲采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(15): 49-55.
- BA L J, ZHANG L M, CAI G J, PENG X, LI J K, ZHANG P, WANG R. Effects of low-temperature on storage quality of passion fruit[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(15): 49-55. (in Chinese)
- [24] 陈丽, 朱丽婵, 张鲁斌, 贾志伟, 洪克前. 低温贮藏期对芒果果实抗氧化能力和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(34): 134-138.
- CHEN L, ZHU L C, ZHANG L B, JIA Z W, HONG K Q. The effects of low temperature duration on mango fruit antioxidant capacity and quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(34): 134-138. (in Chinese)
- [25] 王志华, 贾朝爽, 王文辉, 佟伟, 姜云斌. 低温贮藏对‘金红’苹果能量代谢和品质的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(12): 2277-2289.

- WANG Z H, JIA C S, WANG W H, TONG W, JIANG Y B. Effects of low temperature storage on energy metabolism, related physiology and quality in 'Jinhong' apple fruit[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(12): 2277-2289. (in Chinese)
- [26] 陈锦, 林毅雄, 林育钊, 刘竞运, 林河通, 林艺芬. 低温贮藏对‘松风本’龙眼果实品质和耐贮性的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(11): 2314-2321.
- CHEN J, LIN Y X, LIN Y Z, LIU J Y, LIN H T, LIN Y F. Effects of low temperature storage on quality and storability of 'Songfengben' longan fruit[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(11): 2314-2321. (in Chinese)
- [27] 方宗壮, 何艾, 窦志浩, 段宙位, 王世萍, 谢辉. 不同气调包装结合低温处理对鲜切菠萝贮藏品质的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(4): 102-107.
- FANG Z Z, HE A, DOU Z H, DUAN Z W, WANG S P, XIE H. Effect of different modified atmosphere packaging treatments with low temperature on storage quality of fresh-cut pineapple[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 39(4): 102-107. (in Chinese)
- [28] 侯晓婉, 鹿志伟, 张鲁斌, 贾志伟, 谷会, 洪克前. 外源抗坏血酸对采后菠萝黑心病发生及抗氧化性能的影响[J]. *果树学报*, 2018, 35(9): 1105-1116.
- HOU X W, LU Z W, ZHANG L B, JIA Z W, GU H, HONG K Q. Effect of exogenous ascorbic acid on blackheart occurrence and anti-oxidation activity in postharvest pineapple[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(9): 1105-1116. (in Chinese)
- [29] 刘朝斌, 李书影, 叶妞, 唐燕, 曹永新, 马惠玲. 鲜食核桃仁抑制褐变与脱色方法及货架期保鲜效应[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 232-241.
- LIU C B, LI S Y, YE N, TANG Y, CAO Y X, MA H L. Browning inhibition and decolorization of fresh walnut kernels and their effect on browning-related enzyme activity, antioxidant properties and quality attributes during cold storage[J]. *Food Science*, 2022, 43(9): 232-241. (in Chinese)
- [30] 熊思国, 史君彦, 麻蕊, 张颖, 蒋旭, 郭树欣, 左进华, 袁树枝, 岳晓珍, 姜爱丽, 王清. 1-甲基环丙烯缓释贴纸对模拟运输期间完熟期番茄果实品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(8): 31-41.
- XIONG S G, SHI J Y, MA R, ZHANG Y, JIANG X, GUO S X, ZUO J H, YUAN S Z, YUE X Z, JIANG A L, WANG Q. Effect of 1-methylcyclopropene slow-release stickers on quality of full-ripe tomato fruit during simulation transport[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(8): 31-41. (in Chinese)
- [31] 董琼, 李世民, 高尚杰, 李玉新, 段华超, 郑鑫华, 姚先富, 字强. 不同种源树番茄果实品质比较及综合分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(4): 266-273.
- DONG Q, LI S M, GAO S J, LI Y X, DUAN H C, ZHENG X H, YAO X F, ZI Q. Comparison and comprehensive analysis the quality of *Cyphomandra betacea* from different provenance[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(4): 266-273. (in Chinese)
- [32] 郭丹, 石英, 孙乃波. 不同保鲜剂对葡萄冷藏及货架期品质的影响[J]. *北方果树*, 2024(2): 10-13, 17.
- GUO D, SHI Y, SUN N B. The effect of different preservatives on the quality of grape during cold storage and shelf life[J]. *Northern Fruits*, 2024(2): 10-13, 17. (in Chinese)