

不同贮藏方式对澳洲坚果鲜果品质的影响

付镓榕, 魏元苗, 徐文婷, 马尚玄, 胡小静, 王昱文, 黄克昌, 郭刚军, 贺熙勇

Effects of Different Storage Methods on Fresh Macadamia Nut Quality

FU Jiarong, WEI Yuanmiao, XU Wenting, MA Shangxuan, HU Xiaojing, WANG Yuwen, HUANG Kechang, GUO Gangjun, and HE Xiyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030164>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于主成分分析和聚类分析的烘烤类澳洲坚果果仁综合品质评价

Comprehensive Quality Evaluation of Roasted Kernels in Macadamia Nuts Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2023, 44(18): 331–341 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100124>

响应面法优化澳洲坚果真空油炸工艺及品质分析

Optimization of Vacuum Frying Process and Quality Analysis of Macadamia Kernels by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2024, 45(5): 197–204 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050079>

基于主成分分析法分析不同采收期对李果实贮藏品质的影响

Analysis of the Effects of Different Harvesting Periods on Storage Quality of Plum Fruit Based on Principal Component Analysis

食品工业科技. 2024, 45(16): 272–281 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090093>

基于主成分分析与聚类分析的软枣猕猴桃果品质综合评价

Comprehensive Evaluation of Fruit Quality of *Actinidia arguta* Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2024, 45(1): 247–257 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020245>

不同分子量澳洲坚果多肽制备工艺与抗氧化活性

Preparation Technology and Antioxidant Activities of Different Molecular Weight Macadamia Nut Polypeptides

食品工业科技. 2023, 44(20): 414–421 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120169>

基于主成分分析和聚类分析的榴莲品质综合评价

Comprehensive Evaluation of Durian Quality Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2023, 44(7): 278–286 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050098>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

付稼榕, 魏元苗, 徐文婷, 等. 不同贮藏方式对澳洲坚果鲜果品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 285–295. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030164

FU Jiarong, WEI Yuanmiao, XU Wenting, et al. Effects of Different Storage Methods on Fresh Macadamia Nut Quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 285–295. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030164

· 贮运保鲜 ·

不同贮藏方式对澳洲坚果鲜果品质的影响

付稼榕^{1,2,3}, 魏元苗^{1,2,3}, 徐文婷^{1,2,3}, 马尚玄^{1,2,3}, 胡小静⁴, 王昱文⁴, 黄克昌^{1,2,3}, 郭刚军^{1,2,3,*}, 贺熙勇^{1,2,3,*}

(1. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100;

2. 云南省澳洲坚果农业工程研究中心, 云南景洪 666100;

3. 云南省木本油料技术创新中心, 云南景洪 666100;

4. 文山学院三七医药学院, 云南文山 663099)

摘要: 为探究贮藏方式对澳洲坚果鲜果品质的影响, 采用田间堆放、室内堆放、室内堆放 3 种贮藏方式进行为期 70 d 的贮藏试验, 贮藏期间监测环境及果堆温度、果皮含水量、裂果率、霉果率及其壳果的含水量、色泽, 果仁含水量、缺陷果率、丙二醛含量、总酚含量、总糖含量、酸价、过氧化值、碘值、DPPH 自由基清除能力的变化, 并对其进行相关性与主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)。结果表明, 室内堆放贮藏的果皮、带壳果、果仁含水量均会先降低后趋于稳定, 室内堆放及田间堆放的果皮、带壳果、果仁含水量无规律性变化; 室内堆放、室内堆放、田间堆放的青皮霉果率达到 100% 的贮藏时间分别为 30、40、60 d。贮藏 70 d 时, 室内堆放、田间堆放、室内堆放的果仁缺陷果率分别为 23.33%、20.67%、49.33%; 丙二醛含量分别为 1.03、1.18、1.01 mg/kg; 酸价为 114.30、105.70、119.53 μg/g, 过氧化值为 135.88、94.92、126.90 μg/g, 碘值为 681.74、658.67、656.88 mg/g; 总酚含量为 1.43、1.54、1.69 mg/g, 总糖含量为 199.12、201.04、200.14 mg/g; DPPH 自由基清除率为 96.10%、97.77%、99.50%。相关性分析得出缺陷果率、总酚、总糖、丙二醛、过氧化值、酸价两两之间均呈显著正相关 ($P<0.05$), 缺陷果率与 DPPH 自由基清除率之间呈显著正相关 ($P<0.05$), 碘值与总酚、总糖、丙二醛、过氧化值、酸价、缺陷果率之间均呈显著负相关 ($P<0.05$), 主成分分析 PC1 和 PC2 的贡献率分别为 87.7%、4.7%, 得出 3 种贮藏方式贮藏 10 d 的品质差异较小, 贮藏 10 d 以上时, 应采用室内堆放。结合不同贮藏方式缺陷果率变化得出贮藏方式优劣顺序为室内堆放、田间堆放、室内堆放。研究结果为澳洲坚果鲜果的保质、减损提供了理论参考。

关键词: 澳洲坚果, 鲜果, 贮藏方式, 品质, 相关性分析, 主成分分析

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)05-0285-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030164

本文网刊:



Effects of Different Storage Methods on Fresh Macadamia Nut Quality

FU Jiarong^{1,2,3}, WEI Yuanmiao^{1,2,3}, XU Wenting^{1,2,3}, MA Shangxuan^{1,2,3}, HU Xiaojing⁴, WANG Yuwen⁴,
HUANG Kechang^{1,2,3}, GUO Gangjun^{1,2,3,*}, HE Xiyong^{1,2,3,*}

(1. Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Macadamia Agricultural Engineering Research Center, Jinghong 666100, China;

3. Yunnan Technology Innovation Center of Woody Oil, Jinghong 666100, China;

4. College of Notoginseng Medicine and Pharmacy, Wenshan University, Wenshan 663099, China)

Abstract: The fresh macadamia nuts were stored by 3 storage methods: field spreading storage, indoor spreading storage, and indoor stacking storage for 70 days. Differences in environment temperature, pile temperature, moisture content,

收稿日期: 2024-03-14

基金项目: 云南省重大科技专项计划 (202202AE090006); 云南省创新引导与科技型企业培育计划 (202404BP090014); 云南省热带作物科技创新体系建设专项 (RF2025-15); 云南省科技人才和平台计划项目 (202405AD350060); “兴滇英才支持计划”项目 (2022-0068); 西双版纳州“雨林英才支持计划”项目; 科技人才与平台计划“云南省科技副总项目”; 云南省郭刚军专家基层科研工作站。

作者简介: 付稼榕 (1995-), 男, 本科, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: jr9510@126.com。

* 通信作者: 郭刚军 (1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 食品加工和植物中天然产物提取分离与功能, E-mail: guogangjun2001@126.com。

贺熙勇 (1973-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 澳洲坚果种质资源、品种选育、栽培技术和产业经济研究, E-mail: hedao0691@163.com。

cracking rate, mold rate, nut-in-shell moisture content and color, kernel moisture content, defective kernel rate, malondialdehyde content, total phenol content, total sugar content, acid value, peroxide value, iodine value, and DPPH radical scavenging ability were monitored during storage, and correlation and principal component analyses were performed. During storage, the water content of nuts in indoor spreading storage initially decreased, then stabilized. By contrast, water content of nuts in indoor stacking and field spreading storage did not undergo consistent change. During the storage period, the moldy fruit rate reached 100% after 30 d of indoor stacking, 40 d of indoor spreading, and 60 d of field spreading. The macadamia nut kernel defect ratio at day 70 of storage was 23.33% for indoor spreading, 20.67% for field spreading, and 49.33% for indoor stacking. The respective malondialdehyde contents were 1.03, 1.18 and 1.01 mg/kg; acid values were 114.30, 105.70 and 119.53 $\mu\text{g/g}$; peroxide values were 135.88, 94.92 and 126.90 $\mu\text{g/g}$; iodine values were 681.74, 658.67 and 656.88 mg/g; total phenol contents were 1.43, 1.54 and 1.69 mg/g; and total sugar contents were 199.12, 201.04 and 200.14 mg/g; DPPH radical scavenging rates were 96.10%, 97.77% and 99.50%. Correlation analysis showed significant positive pairwise correlations ($P<0.05$) between kernel defect ratio, total phenol, total sugar, malondialdehyde, peroxide value, and acid value. Defective nut rate and DPPH radical scavenging rate were also significantly positively correlated ($P<0.05$). The iodine value was significantly negatively correlated with total phenol, total sugar, malondialdehyde, peroxide, acid value, and defective nut rates ($P<0.05$). The contribution rates of PC1 and PC2 in PCA were 87.7% and 4.7%, respectively, and the quality difference between 3 storage methods after 10 days was small. Indoor spreading should be used for storage for more than 10 days. Based on the changes in defective nut rates of different storage methods, the order of storage methods was indoor spreading, field spreading, and indoor stacking. This study provides a methodological reference for quality preservation and loss reduction in fresh macadamia nuts.

Key words: macadamia nut; fresh fruit; storage method; quality; correlation analysis; principal component analysis

澳洲坚果(*Macadamia* spp.)为山龙眼科澳洲坚果属的常绿乔木果树,其果实为绿色球形的串生蓇葖果,由果皮、种壳和种仁3部分构成,食用部分为种仁,别称夏威夷果、澳洲核桃等,是一种珍贵的食用干果,被誉为“干果皇后”“世界坚果之王”,具有很高的经济价值^[1-2]。2020年末我国澳洲坚果种植面积为26.61万hm²,云南省澳洲坚果种植面积为23.53万hm²,产量(壳果,含水量10%)为7.50万t^[1]。

澳洲坚果采收后应及时进行初加工,以避免因鲜果加工不及时而引起品质变化^[2-4]。捡拾落果的采收方式是在坚果成熟后自然落地,间隔15~30 d甚至30 d以上分批捡拾,在鲜果落地至捡拾加工阶段鲜果散落在田间;集中采收是坚果成熟时,采用木棍、竹竿或用采果钩进行一次性采收。捡拾落果的采收方式在鲜果落地至捡拾阶段鲜果散落在田间以摊放的方式贮藏,集中采收的采收方式避免了在田间摊放贮藏,但可能会因初加工厂处理能力不足需要对鲜果进行贮藏^[5]。澳洲坚果鲜果在贮藏期间,果皮的水分含量高,堆积贮藏时容易发热变黑并影响果壳的色泽^[2],果仁中含有大量的不饱和脂肪酸,极易氧化酸败而影响其食用品质^[6-8]。目前,有关澳洲坚果采收及采后处理对其品质的影响研究报道相对较少。GAMA等^[9]研究了澳洲坚果延迟采收对保质期的影响;WALTON等^[10-11]研究了澳洲坚果初加工及带壳果高水分贮藏对果仁品质的影响;LIU等^[12]研究了澳洲坚果长期贮藏风味成分变化。有关澳洲坚果鲜果在贮藏期间品质变化的研究还鲜见报道,有必要结合产业现状对澳洲坚果鲜果贮藏期间外观、果仁品质的影响展开研究,以得到澳洲坚果鲜果品质的变化规律对生产提供指导。

为使澳洲坚果鲜果在初加工前能得到较好的保存,本文对澳洲坚果鲜果不同贮藏方式下品质随时间的变化进行了研究。鉴于目前澳洲坚果采摘分批捡拾、鲜果采用室内堆放或摊放的保存形式,本文选取A16品种的鲜果作为试验材料,研究了田间摊放、室内摊放、室内堆放三种贮藏方式下果皮、果壳、果仁的品质变化,以期得到不同贮藏方式下的澳洲坚果品质变化规律,以促进澳洲坚果鲜果贮后的保质减损。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

A16澳洲坚果鲜果 采自云南省热带作物科学研究所澳洲坚果试验基地,挑选果皮无虫蛀、病害、开裂、黑斑、发霉、损伤的澳洲坚果鲜果备用;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、芦丁标准品、葡萄糖标准品、没食子酸 美国Sigma公司;乙二胺四乙酸二钠、石油醚(30~60 °C沸程)、福林酚、氢氧化钠、三氯乙酸、2-硫代巴比妥酸、苯酚、硫酸、盐酸、无水碳酸钠、无水乙醇等试剂均为分析纯 国药集团化学试剂有限公司。

AF-800型脱皮机 云南奥福实业有限公司;ME204E型电子分析天平 梅特勒-托利多仪器有限公司;DLSB-5L/20A型低温冷却液循环泵 郑州长城科工贸有限公司;BGZ-70电热恒温鼓风干燥箱、HHS型电热恒温水浴锅 上海博迅实业有限公司;T-UV1810型紫外分光光度计 上海佑科仪器仪表有限公司;TGL-16C型离心机 上海安亭科学仪器厂;114B型粉碎机 浙江瑞安市永历制药机械有限公司;RC-4HC温湿度记录仪 江苏精创电气股份有限公司;NS800型色差仪 广东三恩时智能科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计 将澳洲坚果鲜果以室内摊放 (ISP)、田间摊放 (FSP)、室内堆放 (IST) 三种方式进行贮藏, 贮藏期间使用 RC-4HC 温湿度记录仪每 6 h 记录一次环境及果堆内部的温度变化, 贮藏试验共进行 70 d, 每 10 d 取样 2 kg。果样测定果皮、壳果、果仁的含水量及果皮的霉变率、裂果率, 然后使用脱皮机进行脱青皮处理, 脱青皮后参照徐文婷等^[13]的方法干燥至果仁含水量 1.5% 左右, 测定果壳色泽、果仁缺陷果率、果仁丙二醛含量; 果仁粉碎至能通过 20 目筛后用石油醚浸提 12~14 h 后过滤, 滤液经装有无水硫酸钠的漏斗过滤除去水分, 室温静置挥干石油醚后测定酸价、过氧化值和碘值, 滤渣参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中油脂的测定》中索氏抽提的方法除去残留油脂后测定总酚、总糖含量、DPPH 自由基清除率。

1.2.2 澳洲坚果鲜果贮藏及取样方式 室内摊放 (ISP): 在干燥通风的室内地面直接进行摊放, 摆放高度约为 5 cm; 田间摊放 (FSP): 为最大程度模拟落果, 将果样在 10 年树龄的坚果树树干至树冠滴水线区间进行单层摊放, 摆放高度约为 5 cm; 室内堆放 (IST): 在干燥通风的室内地面直接进行堆放, 为保证每次取样均从果堆内部取样, 最下层以散装鲜果铺垫 (厚度>10 cm), 将样品使用尼龙网袋以 2 kg 为一袋打包后放置放于果堆内部, 上层再覆盖散装鲜果 (厚度>10 cm), 堆放高度约为 50 cm。三种贮藏方式的样品量均为 50 kg, 采用随机抽样的方式取样。

1.2.3 含水量的测定 按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行测定。

1.2.4 澳洲坚果青皮果缺陷的测定 将不同贮藏方式的澳洲坚果鲜果进行青皮霉果率、青皮裂果率的测定, 测定方法如下:

青皮霉果率: 随机取样约 100 个, 将果样置于清洁、干燥的白瓷盘中, 目测检验青皮外观, 存在果皮霉变、发黑的为霉果, 样品的霉果率 (X_1) 以霉果的个数比 (%) 表示, 按式(1)计算:

$$X_1 = \frac{n_1}{n} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: X_1 —青皮霉果率, %; n_1 —霉果数, 个; n —样品总数, 个。

青皮裂果率: 随机取样约 100 个, 将果样置于清洁、干燥的白瓷盘中, 目测检验青皮外观, 存在明显开裂的为裂果, 样品的裂果率 (X_2) 以裂果的个数比 (%) 表示, 按式(2)计算:

$$X_2 = \frac{n_2}{n} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: X_2 —青皮裂果率, %; n_2 —裂果数, 个; n —样品总数, 个。

1.2.5 果壳色泽的测定 参照 LEE 等^[14]的方法进行测定。使用色差仪沿带壳果种脐线进行 3 个点位

的色泽测定, 每个样品随机测定 30 个带壳果, 其中 L^* 表示颜色亮度, 数值越小表明亮度越低, 反之则表示亮度越高; a^* 表示红绿色差, $a^* < 0$ 表明其颜色接近绿色程度, $a^* > 0$ 表明其绿色变淡或颜色接近红色程度; b^* 表示黄蓝色差, $b^* > 0$ 表明其颜色接近黄色程度, $b^* < 0$ 表明其接近蓝色程度; h^* 值表示色相角。

1.2.6 果仁缺陷率的测定 果仁缺陷率: 带壳果随机取样约 50 颗, 将带壳果破壳检查果仁状态, 果仁存在虫蛀、发芽、霉变情况的果仁为缺陷果。样品的果仁缺陷率 (X_3) 以缺陷果的个数比 (%) 表示, 按式(3)计算:

$$X_3 = \frac{n_3}{n} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: X_3 —果仁缺陷率, %; n_3 —缺陷果数, 个; n —样品总数, 个。

1.2.7 丙二醛的测定 按照 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》进行测定。

1.2.8 酸价、过氧化值、碘值的测定 酸价的测定: 按照 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》第三法热乙醇指示剂滴定法进行测定。

过氧化值的测定: 按照 GB 5009.227-2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》第一法滴定法进行测定。

碘值的测定: 按照 GB/T 5532-2022《动植物油脂碘值的测定》进行测定。

1.2.9 总酚的测定 称取 5.00 g 研磨充分的脱脂澳洲坚果粕粉, 加入 40 mL 60% 乙醇超声提取 (60 °C, 45 kHz, 30 min), 将超声提取后的样品溶液 4000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 将沉淀物加入 25 mL 60% 乙醇重复提取一次合并上清液, 用 60% 乙醇定容至 50 mL, 作为待测液备用。

参照 SEYREKOGLU 等^[15]的方法以没食子酸为标样绘制总酚标准曲线, 得到没食子酸标准溶液的浓度 C (mg/mL) 与吸光度 A 的回归方程为: $A = 11.621C + 0.0072$, 决定系数 $R^2 = 0.9999$ 。将待测液稀释 10 倍后取 1 mL 于 10 mL 容量瓶中, 加入 1 mL 福林酚试剂, 2 mL 的 5% Na_2CO_3 , 用蒸馏水定容至 10 mL, 摆匀, 40 °C 水浴 60 min, 于 760 nm 波长处测定其吸光值, 对照标准曲线得出稀释液中总酚含量, 根据式(4)计算样品中的总酚含量。

$$X = \frac{C \times V \times N}{M} \quad \text{式 (4)}$$

式中: X —试样中总酚含量, mg/g; N —样品提取液稀释倍数; C —样液对应的没食子酸浓度, mg/mL; V —提取液总体积, mL; M —样品质量, g。

1.2.10 总糖的测定 取 1.00 g 充分研磨的脱脂坚果粕粉于 250 mL 锥形瓶中, 加入 25 mL 蒸馏水, 10 mL 浓盐酸振荡摇匀至形成均匀的悬浊液, 在沸水浴中冷凝回流提取 1 h, 冷却后过滤并用蒸馏水洗涤滤渣, 合并滤液及洗液, 定容至 250 mL, 取 5 mL 稀

释至 100 mL, 作为待测液备用。

参考唐小闲等^[16]的方法以葡萄糖为标样绘制标准曲线, 得到葡萄糖浓度 C(μg/mL)与吸光度 A 的回归方程 $A=0.0129C+0.0298$, 决定系数 $R^2=0.9996$ 。取 2 mL 待测液于 25 mL 具塞试管中, 依次加入 5% 的苯酚溶液 1 mL, 再加入 5 mL 浓硫酸混匀, 静置 5 min, 在 60 ℃ 水浴 20 min, 冷却至室温, 于 490 nm 处测其吸光度, 对照标准曲线得出待测液中总糖含量, 根据式(5)计算样品中的总糖含量。

$$X = \frac{C \times V \times N}{M} \times 1000 \quad \text{式 (5)}$$

式中: X—试样中总糖含量, mg/g; N—样品提取液稀释倍数; C—样液对应的葡萄糖浓度, μg/mL; V—提取液总体积, mL; M—样品质量, g; 1000—换算系数。

1.2.11 DPPH 自由基清除能力测定 称取 5.00 g 研磨充分的脱脂澳洲坚果粕粉, 加入 50 mL 95% 乙醇超声提取 30 min, 将超声提取后的样品溶液以 4000 r/min 离心 10 min, 收集上清液制得待测液。

取 2 mL 待测液加入 2 mL DPPH 溶液 (0.2 mmol/L, 用 95% 乙醇配制) 中, 混匀后室温下避光反应 30 min, 在 517 nm 下测定反应体系吸光度值^[13]。样品对 DPPH 自由基的清除率按公式(6)计算。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中: A_1 —待测液与 DPPH 溶液的吸光度值; A_2 —待测液与 95% 乙醇的吸光度值; A_0 —水与 DPPH 溶液的吸光度值。

1.3 数据处理

实验数据用 Microsoft Excel 2019 进行数据录入初步整理后, 采用 SPSS 25.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和主成分分析, 组间差异用多重比较分析(LSD), 结果用平均值±标准差 (mean±SD) 表示; 采用 Origin 2021 进行皮尔森法 (Pearson's) 进行相关性分析 ($P<0.05$ 为显著相关性)、主成分分析并作图。

利用 SPSS25.0 软件对澳洲坚果各贮藏方式的指标进行主成分分析, 首先对各项指标进行标准化处理, 根据主成分分析降维思想, 通过最大方差法计算出主成分的载荷矩阵, 根据式(7)计算各主成分因子得分 F_i , 将前 2 个主成分因子的得分作为 x 轴和 y 轴, 在二维坐标系内得到各样品的主成分得分标准化值分布图^[17]。

$$F_i = \sum P_{ij}x_j \quad \text{式 (7)}$$

式中: F_i —第 i 个主成分的得分; P_{ij} —载荷矩阵中第 i 个主成分的第 j 个指标的特征向量; x_j —样品第 j 个指标的标准化数值。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间温度变化

贮藏期间监测了环境及堆放果堆内部的温度变化, 如图 1 所示。贮藏 0~25 d 的室内环境温度在 25~27 ℃ 之间, 25 d 后降低至 20~24 ℃ 之间; 田间环境昼夜温差较大最高达到 31 ℃, 最低仅为 15 ℃。室内堆放贮藏的果堆内部温度在实验前期明显高于环境温度, 最高温度达到 32.5 ℃, 温度波动较小; 当贮藏 20 d 后, 果堆内部温度与环境温度差约为 2 ℃, 这是由于新鲜带皮坚果含水量高, 在贮藏期间果皮水分蒸发和呼吸作用强, 且果堆内部通风较差使产生的二氧化碳、热能和水分淤积在果堆中, 致使果堆内部温度升高, 当贮藏一段时间后大量的果皮腐烂呼吸作用减弱, 果堆内部与室内环境的温度差减小。

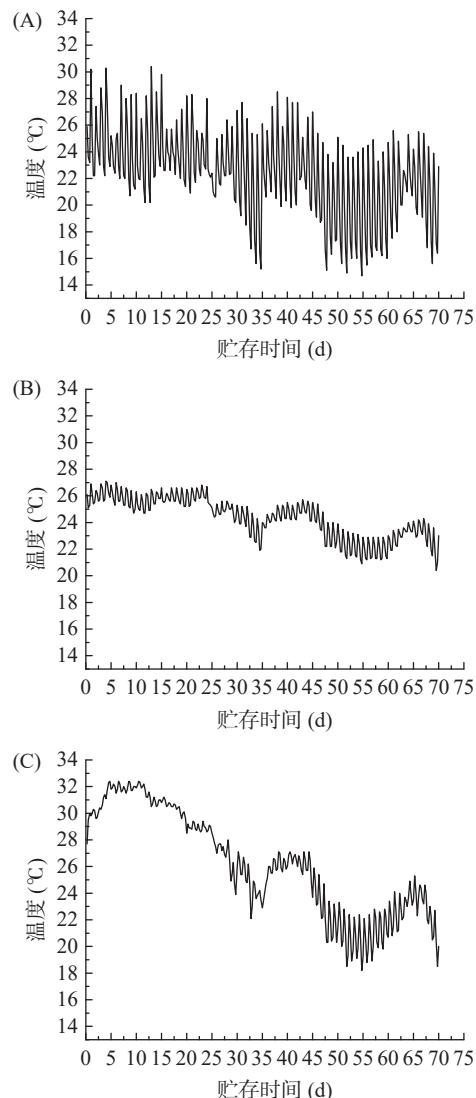


图 1 贮藏期间田间环境(A)、室内环境(B)、果堆(C)温度变化

Fig.1 Temperature fluctuations of field environment (A), indoor environment (B) and fruit pile (C) during storage

2.2 贮藏方式对贮藏期澳洲坚果鲜果含水量的影响

贮藏期间监测含水量变化, 当贮藏 30 d 后三种贮藏方式的果皮完全霉变或腐烂, 结束对果皮的含水

表 1 贮藏方式对澳洲坚果的果皮、带壳果、果仁含水量的影响(%)

Table 1 Effects of storage method on the moisture contents of macadamia pericarp, in-shell nut and kernel (%)

时间(d)	室内堆放			田间堆放			室内堆放		
	果皮	带壳果	果仁	果皮	带壳果	果仁	果皮	带壳果	果仁
0	73.20±0.20 ^{Aa}	23.99±0.79 ^{Aa}	22.88±0.19 ^{Aa}	73.20±0.20 ^{Ba}	23.99±0.79 ^{Aa}	22.88±0.19 ^{BCda}	73.20±0.20 ^{Aa}	23.99±0.79 ^{ABa}	22.88±0.19 ^{CDa}
10	67.80±1.18 ^{Bb}	21.50±0.67 ^{Ba}	20.51±0.90 ^{Bc}	69.89±0.32 ^{Da}	22.42±0.58 ^{Ba}	25.40±0.21 ^{Aa}	70.69±0.54 ^{Ba}	22.56±0.70 ^{Ba}	22.35±0.56 ^{Bb}
20	56.86±1.24 ^{Cb}	20.17±0.80 ^{Cb}	17.89±0.91 ^{CB}	72.50±0.38 ^{Ca}	22.52±0.86 ^{Ba}	23.56±0.47 ^{BCa}	72.15±0.67 ^{Aa}	23.06±0.83 ^{Ba}	24.06±0.65 ^{Ba}
30	24.13±0.77 ^{De}	15.29±0.29 ^{Db}	9.78±0.16 ^{De}	75.97±0.34 ^{Aa}	23.24±0.39 ^{Ba}	21.96±0.21 ^{DEb}	68.31±1.10 ^{Cb}	23.13±0.46 ^{Ba}	23.35±0.29 ^{BCa}
40	—	12.40±0.52 ^{Ec}	5.21±0.05 ^{Ec}	—	21.86±0.87 ^{Bb}	21.86±1.55 ^{DEb}	—	23.75±1.08 ^{ABa}	23.89±0.25 ^{Ba}
50	—	9.68±0.33 ^{Fb}	4.49±0.18 ^{EFc}	—	22.86±0.97 ^{ABa}	21.05±0.80 ^{Fb}	—	23.89±0.6 ^{ABa}	23.46±0.39 ^{BCa}
60	—	9.41±0.35 ^{Fc}	3.94±0.16 ^{Fc}	—	22.22±0.78 ^{Bb}	22.39±0.11 ^{CDb}	—	23.77±0.46 ^{ABa}	26.59±0.49 ^{Aa}
70	—	9.35±0.12 ^{Fc}	3.66±0.08 ^{Fb}	—	23.05±0.72 ^{ABb}	23.76±0.40 ^{Ba}	—	24.65±0.83 ^{Aa}	24.05±0.91 ^{Ba}

注:—表示未检测;不同大写字母表示不同贮藏时间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同贮藏方式差异显著($P<0.05$),表2、表3同。

量检测,结果如表1所示。从表1可以看出,在贮藏期30 d时,室内堆放的澳洲坚果鲜果在贮藏期间其果皮含水量降低了49.07%,在50~70 d贮藏期,室内堆放澳洲坚果的带壳果、果仁含水量分别降低至9.00%、3.50%附近,并趋于稳定,表明在该贮藏条件下带壳果、果仁已接近平衡水分;田间堆放贮藏的果皮、带壳果、果仁含水量波动较大,无规律性变化;室内堆放贮藏的果皮含水量稍有下降,带壳果含水量在贮藏期间出现上升的情况,相较于初始值最大增幅为1.66%,果仁含水量在22.35%~26.59%间波动。出现上述情况的原因可能是室内堆放贮藏的澳洲坚果鲜果果皮含水量因室内温湿度稳定,果皮的水分得以均匀而缓慢的蒸发;田间堆放受露水、降雨、土壤等条件的影响使果皮含水量出现大幅波动的情况;室内堆放贮藏果堆内部较高的温湿度为果胶分解、糖分代谢提供了适宜的环境,释放出了更多的水分,且空气流通较慢减少了水分蒸发,水分积累在果仁中,致使带壳果、果仁含水量升高^[18]。结果表明,在澳洲坚果鲜果的贮藏过程中,贮藏方式对含水量有着显著的影响,采用室内通风干燥的贮藏环境能够使水分逐渐降低,从而有助于减缓澳洲坚果的新陈代谢速度,延长其贮藏时间。

2.3 贮藏方式对贮藏期澳洲坚果鲜果品质的影响

果皮含水量下降会导致果皮开裂,当澳洲坚果长期处于温暖潮湿的环境中时,果皮会出现腐烂和霉变,进而影响带壳果的品质^[3]。采用不同的贮藏方式,随着贮藏时间的延长,青皮裂果率、青皮霉果率变化如图2所示。

由图2(A)可知,三种贮藏方式下,澳洲坚果鲜果的裂果率随着贮藏时间的延长而升高,不同贮藏方式之间的裂果率存在显著性差异($P<0.05$)。室内堆放贮藏的裂果率升高最快,贮藏0~40 d的裂果率具有显著性差异($P<0.05$),40 d裂果率达到99.05%,在随后的贮藏期内裂果率无显著性变化($P>0.05$);田间堆放的裂果率总体呈匀速增加的趋势,20 d与30 d的裂果率无显著性差异($P>0.05$);室内堆放总体呈现缓慢增长的趋势。在贮藏期70 d时,室内堆放、田间堆放、室内堆放澳洲坚果果皮的裂果率分别为

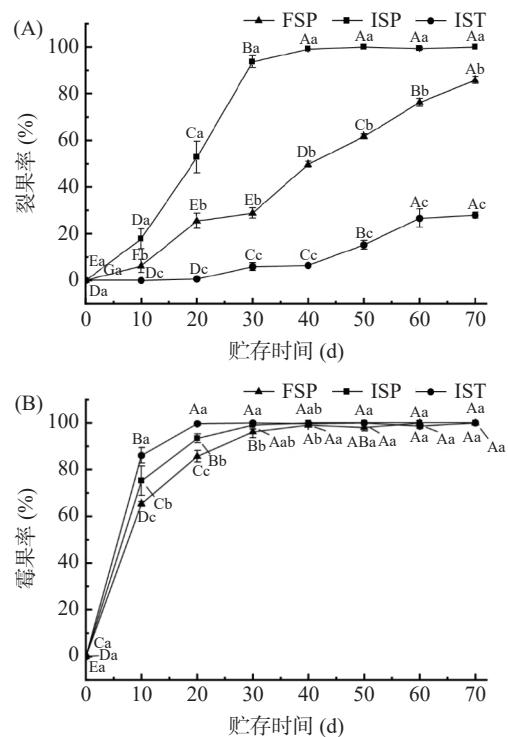


图2 澳洲坚果鲜果贮藏期间果皮裂果率(A)、霉果率(B)的变化

Fig.2 Variation in the rates of pericarps cracking (A) and moldy fruit (B) during the storage period of fresh macadamia nut

注:不同大写字母表示不同贮藏时间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同贮藏方式差异显著($P<0.05$),图3~图9同。

100%、85.58%、26.42%,进一步表明室内堆放贮藏的澳洲坚果鲜果果皮水分持续降低。

由图2(B)可知,三种贮藏方式的澳洲坚果鲜果的霉果率随着贮藏时间的延长而快速增加,在10~30 d贮藏期不同贮藏方式的霉果率差异性显著($P<0.05$),室内堆放在贮藏20 d达到99.68%,室内堆放30 d达到99.07%,田间堆放40 d达到99.04%;室内堆放、室内堆放、田间堆放的青皮霉果率达到100%的贮藏时间为30、40、60 d。其中,室内堆放贮藏的霉果率升高最快,田间堆放贮藏的霉果率上升较慢,这可能是由于室内堆放空气流通慢,果堆内部温湿度高利于微生物的繁殖,易导致果皮发霉,降雨和夜间气温下降有助于减缓田间堆放样品中微

表2 不同贮藏方式及时间对果壳色泽的影响

Table 2 Effects of different storage method and duration on the chromatic properties of macadamia shell

时间(d)	室内摊放				田间摊放				室内堆放			
	L^*	a^*	b^*	h°	L^*	a^*	b^*	h°	L^*	a^*	b^*	h°
0	46.07 \pm 1.75 ^{Aa}	10.63 \pm 0.56 ^{Aa}	18.21 \pm 0.92 ^{Aa}	59.68 \pm 1.11 ^{Ba}	46.07 \pm 1.75 ^{Aa}	10.63 \pm 0.56 ^{Aa}	18.21 \pm 0.92 ^{Aa}	59.68 \pm 1.11 ^{Ca}	46.07 \pm 1.75 ^{Aa}	10.63 \pm 0.56 ^{Aa}	18.21 \pm 0.92 ^{Aa}	59.68 \pm 1.11 ^{Ba}
10	45.69 \pm 1.31 ^{Aa}	9.16 \pm 0.49 ^{ABa}	17.34 \pm 1.14 ^{Aa}	62.25 \pm 0.65 ^{Aa}	46.50 \pm 1.26 ^{Aa}	9.50 \pm 0.51 ^{ABa}	17.73 \pm 0.99 ^{Aa}	61.90 \pm 0.58 ^{ABa}	45.71 \pm 1.96 ^{Aa}	8.86 \pm 0.61 ^{Ba}	16.92 \pm 1.08 ^{ABa}	62.47 \pm 0.49 ^{Aa}
20	45.68 \pm 0.85 ^{Aa}	9.00 \pm 0.78 ^{ABa}	17.15 \pm 1.20 ^{Aa}	62.37 \pm 0.66 ^{Aa}	44.71 \pm 1.19 ^{Aa}	8.90 \pm 0.73 ^{Ba}	16.74 \pm 1.27 ^{Aa}	62.08 \pm 0.70 ^{ABa}	44.19 \pm 0.58 ^{Aa}	7.93 \pm 0.60 ^{BCa}	15.56 \pm 1.14 ^{BCa}	63.05 \pm 0.39 ^{Aa}
30	45.63 \pm 1.41 ^{Aa}	9.15 \pm 1.00 ^{ABa}	17.49 \pm 1.85 ^{Aa}	62.46 \pm 0.31 ^{Aa}	45.13 \pm 1.57 ^{Aa}	8.55 \pm 0.90 ^{Ba}	16.46 \pm 1.77 ^{Aa}	62.62 \pm 0.37 ^{ABa}	43.79 \pm 1.29 ^{Aa}	7.97 \pm 0.40 ^{BCa}	15.46 \pm 0.84 ^{BCa}	62.73 \pm 0.61 ^{Aa}
40	44.86 \pm 1.56 ^{Aa}	9.38 \pm 1.07 ^{ABa}	17.37 \pm 1.88 ^{Aa}	61.77 \pm 0.63 ^{Aa}	44.67 \pm 1.51 ^{Aa}	9.05 \pm 0.72 ^{ABa}	16.83 \pm 1.30 ^{Aa}	61.74 \pm 0.44 ^{Ba}	43.86 \pm 0.76 ^{Aa}	7.71 \pm 0.51 ^{Cb}	14.98 \pm 0.88 ^{Ca}	62.83 \pm 0.63 ^{Aa}
50	45.16 \pm 1.10 ^{Aa}	9.37 \pm 0.90 ^{ABa}	17.47 \pm 1.44 ^{Aa}	61.91 \pm 0.68 ^{Ab}	45.24 \pm 1.73 ^{Aa}	9.22 \pm 0.78 ^{Ba}	17.09 \pm 1.36 ^{Aa}	61.72 \pm 0.30 ^{Bb}	43.73 \pm 1.51 ^{Aa}	7.88 \pm 0.63 ^{BCa}	15.33 \pm 1.27 ^{BCa}	62.86 \pm 0.17 ^{Aa}
60	45.86 \pm 1.14 ^{Aa}	9.44 \pm 0.96 ^{ABa}	17.57 \pm 1.62 ^{Aa}	61.86 \pm 0.32 ^{Ab}	46.20 \pm 1.10 ^{Aa}	8.41 \pm 0.77 ^{Ba}	16.37 \pm 1.33 ^{Aa}	62.93 \pm 0.46 ^{Aa}	44.59 \pm 0.67 ^{Aa}	8.19 \pm 0.43 ^{BCa}	15.82 \pm 0.75 ^{BCa}	62.70 \pm 0.26 ^{Aa}
70	43.51 \pm 1.17 ^{Aa}	8.77 \pm 0.85 ^{Ba}	16.23 \pm 1.53 ^{Aa}	61.81 \pm 0.28 ^{Aa}	45.09 \pm 1.31 ^{Aa}	9.03 \pm 0.60 ^{Ba}	16.89 \pm 1.20 ^{Aa}	61.90 \pm 0.51 ^{Ab}	44.00 \pm 0.76 ^{Aa}	8.28 \pm 0.18 ^{BCa}	15.83 \pm 0.59 ^{BCa}	62.46 \pm 0.38 ^{Aa}

生物的生长速度,从而减少霉变的发生。结果表明,室内摊放有助于水分蒸发,一定程度上延缓了果皮霉变,同时降低水分含量有利于延长贮藏时间。

2.4 澳洲坚果鲜果贮藏方式对其果壳色泽的影响

色泽是评价商品壳果外观品质的重要指标,澳洲坚果鲜果在贮藏过程中果壳色泽的变化如表2所示。从表2可以看出澳洲坚果鲜果经过贮藏,其果壳的 L^* 、 a^* 、 b^* 参数均有降低,表明其色泽变暗、加深,贮藏10 d后趋于稳定,贮藏会对果壳颜色产生影响^[19];室内堆放的 L^* 、 a^* 、 b^* 值降低幅度最大,分别降低2.51、2.92、3.13;不同贮藏方式之间的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 h° 均无显著性差异($P>0.05$)。这可能是贮藏期间果皮中的多酚、单宁等物质被果壳吸收,多酚、单宁等物质被氧化致使果壳褐化^[20-21]。

2.5 澳洲坚果鲜果不同贮藏方式与时间对其果仁品质的影响

2.5.1 不同贮藏方式与时间对缺陷果率的影响 在澳洲坚果产业中虫蛀、发芽、色斑、皱缩、褐变、霉变、渗油等情况均视为缺陷果,缺陷果占比直接关系着原料的品质,进而影响澳洲坚果产品的品质与价值^[22]。由图3可知,随着贮藏时间的延长缺陷果率呈上升趋势。在20 d的贮藏期内,三种贮藏方式的

缺陷果率无显著性差异($P>0.05$);贮藏20 d后,室内堆放贮藏的缺陷果率快速增加,缺陷果率显著高于室内摊放、田间摊放两种贮藏方式($P<0.05$),室内摊放与田间摊放无显著性差异($P>0.05$)。贮藏结束后,室内堆放、室内摊放、田间摊放的缺陷果率分别为49.33%、23.33%、20.67%。在坚果的贮藏过程中,缺陷果率的上升可能归因于多种生物学因素,包括坚果的自发萌芽、微生物的侵袭性感染以及害虫虫卵的孵化等^[5,23]。进一步的研究表明,采用堆放贮藏的方法对澳洲坚果的鲜果进行保存,能有效降低这些生物学因素的不良影响,从而显著减少缺陷果的发生率。

2.5.2 不同贮藏方式与时间对果仁丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物,其含量是评价细胞膜结构损伤程度的指标之一,可反映细胞膜氧化受损情况以及细胞膜的完整性^[24-25]。由图4可知,丙二醛含量随着贮藏时间的延长而增加,在贮藏期10 d时,三种贮藏方式的丙二醛含量无显著性差异($P>0.05$);室内堆放、室内摊放、田间摊放的丙二醛含量与初始值出现显著差异($P<0.05$)的时间分别为20、40、30 d,贮藏前期室内堆放的丙二醛含量增加较快;经70 d的贮藏,田间摊放的丙二醛含量最大为1.18 mg/kg,显著高于室内贮藏($P<0.05$),而室内

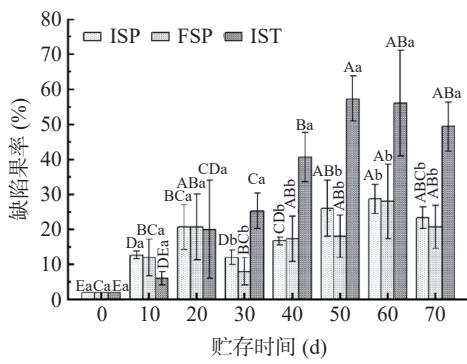


图3 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁缺陷果率的变化

Fig.3 Variations of macadamia nut kernel defect ratio during storage

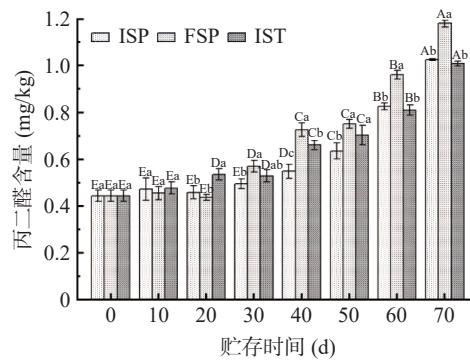


图4 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁丙二醛含量的变化

Fig.4 Changes of malondialdehyde content of macadamia nut kernel during storage

摊放、室内堆放的丙二醛含量无显著性差异($P>0.05$), 分别为 1.03、1.01 mg/kg。三种贮藏方式中田间摊放贮藏的丙二醛含量增加最大, 这可能是由于田间摊放夜间温度较低, 温度降低会使细胞膜膜质受损, 且田间温度反复大幅波动进一步加剧膜质受损程度^[26]。

2.5.3 不同贮藏方式与时间对果仁酸价的影响 酸价(AV)是衡量脂质水解酸败程度的参数, 能直接反映油脂中游离脂肪酸的含量、油脂降解程度, 是评价澳洲坚果贮藏品质的一项重要指标^[27]。不饱和脂肪酸受到环境因素(光照、氧气、水分、金属离子等)的影响, 可被氧化生成低分子脂肪酸, 导致酸价和过氧化值升高^[28-29]。贮藏期间的酸价如图 5 所示, 在贮藏期内酸价均随澳洲坚果鲜果贮藏时间的延长而增加。在贮藏期 10 d 时, 室内摊放贮藏的酸价显著低于田间摊放、室内堆放($P<0.05$)。在后续的贮藏实验中, 室内堆放贮藏的酸价在所有观测时间点上均明显高于其他贮藏方式。贮藏 70 d 后酸价由低至高依次为田间摊放(105.70 μg/g)、室内堆放(114.30 μg/g)、室内堆放(119.53 μg/g), 均符合 GB 19300-2014《食品安全国家标准 坚果与籽类食品》规定的安全范围, 室内堆放、室内堆放之间无显著性差异($P>0.05$)。这可能是因为田间摊放的夜间温度较低, 减缓了澳洲坚果果仁中油脂酸价的升高, 与郭刚军等^[8]在对澳洲坚果产品进行贮藏得出的低温可以有效防止澳洲坚果果仁中油脂酸价的升高结果相符。

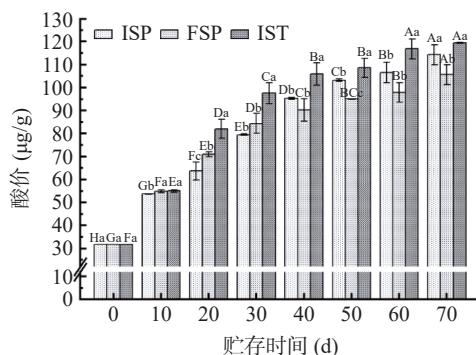


图 5 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁酸价的变化
Fig.5 Changes of acid value of macadamia nut kernel during storage

2.5.4 不同贮藏方式与时间对果仁过氧化值的影响

贮藏期间果仁的过氧化值如图 6 所示, 在贮藏期内过氧化值均随澳洲坚果鲜果贮藏时间的延长而增加。在贮藏期 10 d 时, 田间摊放的过氧化值无显著性增加($P>0.05$); 贮藏期在 30 d 内, 三种贮藏方式的过氧化值缓慢增长且差距较小, 在贮藏期 30 d 时, 室内堆放贮藏的过氧化值分别比田间摊放、室内堆放高 2.72、2.47 μg/g; 贮藏 30 d 后, 过氧化值增速改变, 室内堆放贮藏的过氧化值快速增加, 高于室内堆放、田间摊放。贮藏结束时室内堆放、田间摊放、室内堆放贮藏的澳洲坚果鲜果其果仁过氧化值分别为

135.88、94.92、126.90 μg/g, 均符合 GB 19300-2014《食品安全国家标准 坚果与籽类食品》规定的安全范围。这可能是由于贮藏期 30 d 内堆放贮藏的果堆内部温度高使过氧化值升高较快, 30 d 后果皮腐烂呼吸作用减弱, 果堆内部的温度降低, 果仁内部油脂氧化速度减慢; 贮藏 30 d 后, 室内堆放贮藏的鲜果由于含水量降低使果壳产生裂纹加速了果仁与空气接触, 致使脂肪氧化速度加快。澳洲坚果中不饱和脂肪酸含量高, 在贮藏过程中易受环境条件影响而发生氧化反应产生过氧化物, 使得过氧化值升高^[30]。

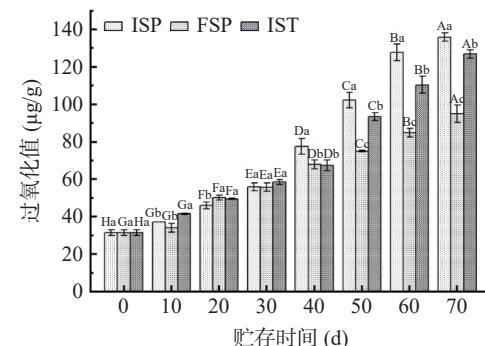


图 6 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁过氧化值的变化
Fig.6 Changes of peroxide value of macadamia nut kernel during storage

2.5.5 不同贮藏方式与时间对果仁碘值的影响 碘值是油脂的重要特征之一, 碘值越高表明其不饱和脂肪酸含量越多, 可以根据碘值鉴定油脂的不饱和程度^[8]。澳洲坚果鲜果不同贮藏方式下碘值的变化如图 7 所示。由图 7 可知, 在 70 d 的贮藏期内三种贮藏方式的碘值变化规律相似, 均随澳洲坚果鲜果贮藏时间的延长而降低, 说明在澳洲坚果鲜果贮藏过程中不饱和的脂肪酸发生氧化^[31-32]。田间摊放和室内堆放贮藏的澳洲坚果鲜果其果仁碘值下降幅度最大, 三种方式贮藏 70 d 的碘值无显著性差异($P>0.05$), 室内堆放、田间摊放、室内堆放的碘值分别为 681.74、658.67、656.88 mg/g。室内堆放贮藏的澳洲坚果鲜果其果仁碘值在贮藏期内呈匀速下降, 且在贮藏期间碘值均高于田间摊放、室内堆放两种贮藏方式, 这可能是由于与田间摊放及室内堆放两种贮藏方式相比,

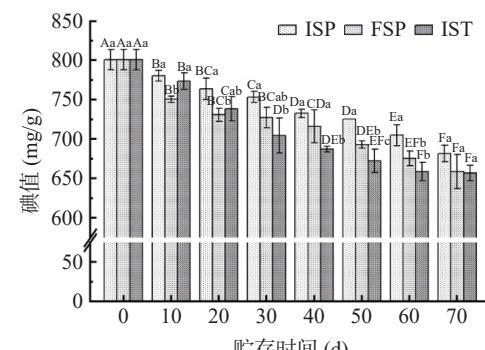


图 7 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁碘值的变化
Fig.7 Changes of iodine values of macadamia nut kernel during storage

室内堆放不受太阳照射,环境温度稳定且较低,从而降低了不饱和脂肪酸氧化的速度,于江等^[32]在研究不同贮藏温度对干核桃贮藏品质的影响中得出低温有利于延缓碘值的降低。

2.5.6 不同贮藏方式与时间对果仁总酚含量的影响

酚类化合物作为果蔬次生代谢产物,是果蔬中的抗氧化和营养物质,其含量能反映抗氧化能力^[33]。澳洲坚果鲜果在不同贮藏方式下其果仁的总酚含量随贮藏时间的变化如图8所示。由图8可知,在贮藏期间,各贮藏方式的澳洲坚果鲜果其果仁总酚含量整体呈上升的趋势。在贮藏20 d内室内堆放贮藏的澳洲坚果鲜果果仁的总酚含量增长速度相对较缓,20 d后快速增加,贮藏结束时其含量从初始的0.89 mg/g显著增加至1.69 mg/g($P<0.05$),为三种贮藏方式中增加量最大,其次为田间堆放增加至1.54 mg/g,最后为室内堆放增加至1.43 mg/g。这可能是由于果堆内部的高温环境或田间堆放阳光直射导致高温,加速了总酚含量的增长,HAN等^[34]的研究结果表明较高的贮藏温度可能通过提高活性氧代谢水平来增加酚类的积累;此外,SRICHAMNONG等^[35]的研究中发现澳洲坚果中美拉德反应会导致其内部总酚含量的增加,而WARREN等^[36]分析蛋白粉货架稳定性中发现20 °C的贮藏温度下会发生美拉德反应,说明在本次贮藏试验中澳洲坚果内部可能发生了美拉德反应导致总酚含量的增加。

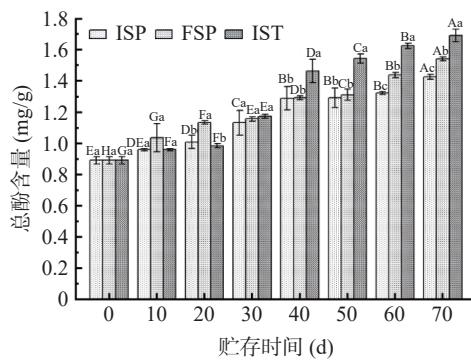


图8 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁总酚含量的变化

Fig.8 Changes of total phenol content of macadamia nut kernel during storage

2.5.7 不同贮藏方式与时间对果仁总糖含量的影响

由图9可知,澳洲坚果鲜果在贮藏过程中总糖含量随着贮藏时间的延长而增加,不同贮藏方式在不同贮藏时间的总糖含量增速不同。室内堆放0~10、30~50 d的贮藏期总糖含量显著($P<0.05$)增加,田间堆放10~50 d的贮藏期总糖含量显著($P<0.05$)增加,室内堆放10~20、40~60 d的贮藏期总糖含量显著($P<0.05$)增加;贮藏70 d三种贮藏方式的总糖含量均增加约60 mg/g且无显著性差异($P>0.05$),出现这种情况的原因可能是贮藏期间由于淀粉、酸在酶的作用下转化为糖^[37~39],致使总糖含量升高,且受环境因素的影响导致不同时期的增长速度不同。

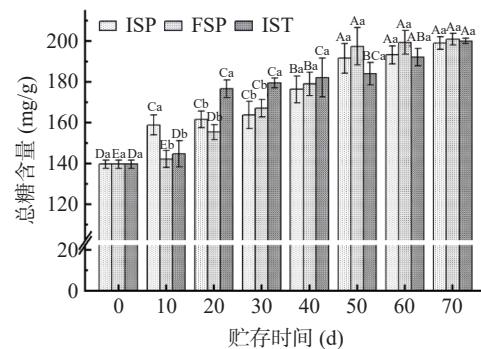


图9 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁总糖含量的变化

Fig.9 Changes of total sugar content of macadamia nut kernel during storage

2.5.8 不同贮藏方式与时间对果仁DPPH自由基清除能力的影响 DPPH自由基清除率通常用来评价样品的抗氧化能力^[40]。不同贮藏方式与时间的澳洲坚果鲜果其果仁的DPPH自由基清除能力如表3所示,由表3可知,未经贮藏的澳洲坚果鲜果其果仁的DPPH自由基清除率为97.26%,表明坚果中含有较高的抗氧化活性物质,DPPH自由基清除能力较强。室内堆放贮藏30 d,DPPH自由基清除率达到最大值98.40%,在后续贮藏中呈现下降的趋势,这可能是因为贮藏前期含水量高且室内温度稳定,果仁内部代谢产生了抗氧化物质,后期含水量降低,抗氧化物质更容易与氧气接触而氧化,致使DPPH清除能力降低。室内堆放在贮藏期间其DPPH自由基清除率呈持续升高的趋势,贮藏结束后,DPPH自由基清除率为99.50%,这可能是由于含水量高且果堆内部温度较高,内部代谢产生了一些多糖、酚类等抗氧化物质使DPPH自由基清除率升高^[34, 39]。田间堆放贮藏的DPPH自由基清除率在贮藏期间无显著性变化($P>0.05$),这可能是由于果仁内部含水量较为稳定,且放置环境荫凉,故对其DPPH自由基清除率影响较小。采用室内堆放虽然使DPPH自由基清除率升高,同时也使内部成分被代谢降解;室内堆放、田间堆放的DPPH自由基清除率与初始值相比无显著性变化($P>0.05$),故可选择堆放的方式对澳洲坚果鲜果进行贮藏。

表3 澳洲坚果鲜果贮藏期间果仁DPPH自由基清除率的变化(%)

Table 3 Changes of DPPH radical scavenging rate of macadamia nut kernel during storage (%)

时间(d)	室内堆放	田间堆放	室内堆放
0	97.26±0.22 ^{ABCa}	97.26±0.22 ^{Aa}	97.26±0.22 ^{BCa}
10	97.44±1.14 ^{ABCa}	97.38±0.38 ^{Aa}	97.12±0.40 ^{Ca}
20	97.82±0.70 ^{Ab}	97.70±0.25 ^{Aa}	97.53±1.33 ^{BCa}
30	98.40±0.77 ^{Aa}	98.32±1.29 ^{Aa}	97.73±0.18 ^{BCa}
40	96.10±0.71 ^{Ca}	98.08±1.49 ^{Aa}	97.75±1.43 ^{BCa}
50	97.35±1.11 ^{ABCa}	98.19±1.15 ^{Aa}	97.92±1.25 ^{BCa}
60	96.31±0.68 ^{BCb}	97.63±1.08 ^{Aab}	98.83±0.48 ^{ABa}
70	96.10±0.89 ^{Cc}	97.77±1.01 ^{Ab}	99.50±0.27 ^{Aa}

2.6 相关性及主成分分析

2.6.1 澳洲坚果鲜果指标间的相关性分析 用皮尔森法(Pearson's)对贮藏期间澳洲坚果鲜果的缺陷果率、总酚含量、总糖含量、丙二醛含量、酸价、过氧化值、碘值和DPPH自由基清除能力之间的相关性进行分析(图10)。由图10可知,总酚、总糖、丙二醛、过氧化值、酸价、碘值、缺陷果率两两之间均呈显著相关($P<0.05$),其中碘值与各指标之间为负相关,其余指标之间均为正相关,是因为碘值代表不饱和脂肪酸含量,不饱和脂肪酸含量在贮藏过程中被氧化而降低^[30],与其它指标的变化趋势相反。DPPH自由基清除率仅与缺陷果率呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.245,可能是由于缺陷果率与贮藏期成正比,贮藏期越长总酚、总糖等抗氧化物质因活性氧代谢^[33-34]、酶的作用^[37]而升高,进而对DPPH自由基清除率产生影响。表明澳洲坚果各指标之间存在相关性,缺陷果率与果仁的品质密切相关,选择适宜的贮藏方式有利于降低缺陷果率同时保证澳洲坚果的原料品质。

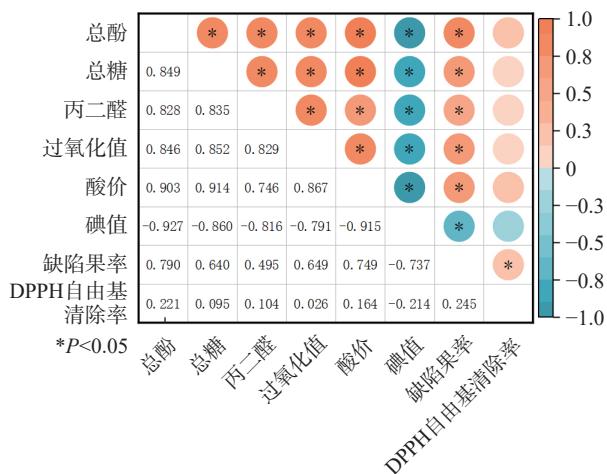


图 10 澳洲坚果鲜果不同贮藏方式品质指标之间的相关性热力图

Fig.10 Correlation heat map of quality indexes of fresh macadamia nuts from different storage methods

2.6.2 澳洲坚果鲜果贮藏指标的主成分分析 主成分分析(PCA)是一种多变量分析方法,是利用降维的方法把多个指标转化为少数几个综合指标^[41]。对贮藏样品的成分进行KMO和Bartlett检验,KMO统计值为0.798,Bartlett球度检验统计量为640.362,显著性为0.000,可知原有变量适合做主成分分析^[42]。为了更好地了解本研究中澳洲坚果鲜果指标参数的关联性,以及在70 d的贮藏期间品质变化情况,对澳洲坚果成分的数据进行了主成分分析,将分析结果进行可视化处理得到图11。可以用2个主成分进行解释,PC1和PC2的贡献率分别为87.7%、4.7%,第一主成分中的总酚、丙二醛、过氧化值、酸价、总糖、碘值具有较大载荷因子,载荷值分别为0.953、0.898、0.922、0.953、0.945、-0.946;第二主成分中丙二醛具有较大的载荷因子,载荷值为0.398。

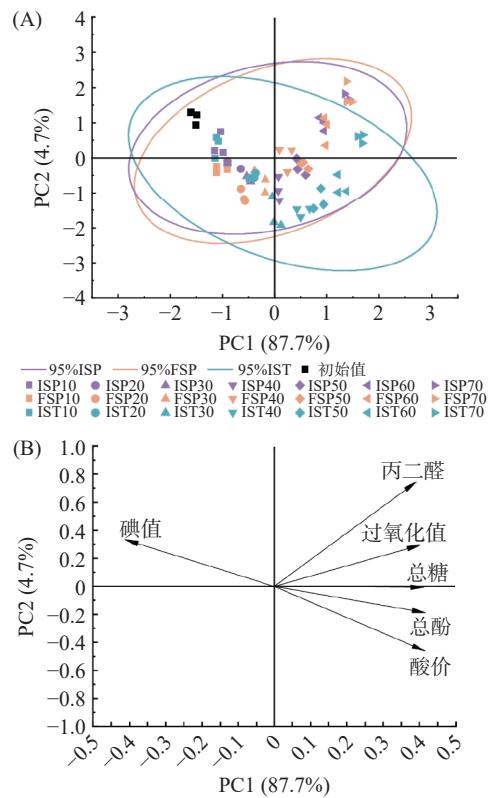


图 11 澳洲坚果 PCA 图

Fig.11 PCA diagram of macadamia nuts

注: A: 样品分值图; B: 指标载荷图。

由图11(A)可知,主成分1的得分越高,代表其果仁的品质越差,澳洲坚果鲜果三种贮藏方式对坚果品质的影响具有差异性,澳洲坚果鲜果在室内摊放与田间摊放对品质的影响相似度较高;在贮藏期间,随着贮藏时间延长样品的得分位置由第二象限先向第三象限移动再向第一、第四象限移动,这是由于过氧化值、酸价、丙二醛等含量增加的原因引起;室内摊放的移动速度略缓于田间摊放、室内堆放,结合图11(B)、图7(碘值变化)、图8(总酚变化)、图9(总糖变化)的变化趋势,分析原因可能是室内摊放在三种贮藏方式中碘值降幅最小,总酚增幅最小,丙二醛、酸价、总酚、总糖含量的增幅在三种贮藏方式中较小而使室内摊放的得分位置移动速度略缓;三种方式贮藏10 d的品质差异较小,当贮藏10~30 d时,室内摊放贮藏的品质优于田间摊放、室内堆放;贮藏30 d以上室内摊放与田间摊放差异较小,室内摊放略优于田间摊放,室内堆放的样品得分位置在摊放贮藏下方,结合图5(酸价)分析可知这是由于室内堆放酸价高于摊放贮藏导致的。由图11(B)可知,总糖、总酚、酸价、丙二醛、过氧化值之间呈现正相关关系,与碘值呈负相关,与相关性分析结果相同。综上所述,贮藏10 d内三种方式差异较小,贮藏10 d以上时,应采用室内摊放。

3 结论

本文通过研究不同贮藏方式对澳洲坚果鲜果品质及理化指标的影响,得出采用摊放贮藏可减少缺陷

果的发生以降低贮藏损耗,三种贮藏方式缺陷果率、丙二醛、总酚、总糖、酸价、过氧化值均随贮藏时间延长呈上升趋势,碘值呈下降趋势,贮藏70 d后其果仁的过氧化值、酸价指标均在GB 19300-2014《食品安全国家标准 坚果与籽类食品》规定的安全范围,但贮藏时间越短越有利于保证澳洲坚果的品质。相关性分析得出澳洲坚果缺陷果率与果仁的品质密切相关,主成分分析得出三种贮藏方式贮藏10 d的品质差异较小,参考贮藏期间缺陷果率的变化情况,采用摊放贮藏的方式有利于降低澳洲坚果鲜果的贮藏损耗,贮藏方式的优劣顺序为室内摊放、田间摊放、室内堆放。本研究旨在为澳洲坚果种植和初加工提供理论支持与参考,提供不同贮藏方式下澳洲坚果品质变化规律,以期指导生产中澳洲坚果鲜果贮藏方式及澳洲坚果采收期落果的捡拾周期。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 贺熙勇,聂艳丽,吴霞,等.云南澳洲坚果产业高质量发展的建议[J].中国南方果树,2022,51(4):205-210. [HE X Y, NIE Y L, WU X, et al. Suggestions of macadamia industry for high-quality development in Yunnan Province[J]. South China Fruits, 2022, 51 (4): 205-210.]

[2] 陈朝银,杨薇,赵声兰,等.澳洲坚果初加工工艺和设备现状研究[J].食品与发酵科技,2021,57(5):104-112. [CHEN C Y, YANG W, ZHAO S L, et al. Study on primary processing technology and equipment status of macadamia[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2021, 57(5): 104-112.]

[3] 赵丹,姜家泰,刘云飞,等.澳洲坚果分品种加工工艺的研究[J].江西农业学报,2021,33(4):86-90,97. [ZHAO D, JIANG J T, LIU Y F, et al. Study on processing technology of macadamia nut according to different varieties[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(4): 86-90,97.]

[4] DOMÍNGUEZ I L, AZUARA E, VERNON-CARTER E J, et al. Thermodynamic analysis of the effect of water activity on the stability of macadamia nut[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81 (3): 566-571.

[5] 何凤平,韩树权,范建新,等.澳洲坚果采收和贮藏及相关产品加工研究进展[J].现代农业科技,2019(3):222-224,230. [HE F P, HAN S Q, FAN J X, et al. Research progress on harvesting, preservation and processing of related products of macadamia ternifolia[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(3): 222-224,230.]

[6] BUTHELEZI N M D, MAGWAZA L S, TESFAY S Z. Postharvest pre-storage processing improves antioxidants, nutritional and sensory quality of macadamia nuts[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 251: 197-208.

[7] YANG J, LIU R H, HALIM L. Antioxidant and antiproliferative activities of common edible nut seeds[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 1-8.

[8] 郭刚军,马尚玄,徐荣,等.不同贮藏条件下3种市售澳洲坚果产品品质及脂肪酸变化[J].经济林研究,2021,39(2):35-45. [GUO G J, MA S X, XU R, et al. Quality and fatty acid changes of three kinds of merchant macadamia nut products under different storage conditions[J]. Non-wood Forest Research, 2021, 39(2): 35-45.]

[9] GAMA T, WALLACE H M, TRUEMAN S J, et al. Late-dropping macadamia nuts have reduced shelf life[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 268: 109378.

[10] WALTON D A, RANDALL B W, LE LAGADEC M D, et al. Maintaining high moisture content of macadamia nuts-in-shell during storage induces brown centres in raw kernels[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(12): 2953-2958.

[11] WALTON D A, WALLACE H M. Quality changes in macadamia kernel between harvest and farm-gate[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(3): 480-484.

[12] LIU Y Y, FAN L P, LI J W. Flavor and compositional analysis of macadamia nuts during long-term storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5): e16540.

[13] 徐文婷,付镓榕,马尚玄,等.不同包装处理、贮藏温度的澳洲坚果果仁贮藏品质研究及其货架期预测[J].食品科学,2024,45(16):232-243. [XU W T, FU J R, MA S X, et al. Storage quality and shelf life prediction of macadamia nut kernel under different packing treatments and storage temperatures[J]. Food Science, 2024, 45(16): 232-243.]

[14] LEE M H, KIM S S, CHO C W, et al. Quality and characteristics of ginseng seed oil treated using different extraction methods [J]. Journal of Ginseng Research, 2013, 37(4): 468.

[15] SEYREKOGLU F, TEMIZ H, ESER F, et al. Comparison of the antioxidant activities and major constituents of three *Hypericum* species (*H. perforatum*, *H. scabrum* and *H. origanifolium*) from Turkey[J]. South African Journal of Botany, 2022, 146: 723-727.

[16] 唐小闲,陈海荣,任爱清,等.不同干燥方法对三华李片干燥特性及营养成分的影响[J].食品研究与开发,2022,43(24):42-50. [TANG X X, CHEN H R, REN A Q, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and nutrient quality of Sanhua plum slices[J]. Food Research and Development, 2022, 43(24): 42-50.]

[17] 杜佳霖,董睿,李辛琲,等.茉莉酸甲酯和酵母提取物对白鲜试管无菌苗生长和药用成分含量的影响[J].核农学报,2024,38(2):355-363. [DU J L, DONG R, LI X B, et al. Effect of methyl jasmonate and yeast extract on the growth and medicinal component content of *Dictamnus* test-tube aseptic seedlings[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(2): 355-363.]

[18] 任维维,梁宗瑶,刘婧,等.采收期对富平尖柿贮藏过程中生理生化特性的影响[J].果树学报,2021,38(6):986-994. [REN W W, LIANG Z Y, LIU J, et al. Effects of harvest dates on physiological and biochemical properties of Fuping Jianshi (*Diospyros kaki* Thunb.) in storage process[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38 (6): 986-994.]

[19] 孙鹏程.阿克苏地区‘温185’核桃种仁种皮褐化原因调查与分析[D].阿拉尔:塔里木大学,2022. [SUN P C. Investigation and analysis of the causes of seed coat browning of 'Wen185' walnut seed kernels in Aksu region[D]. Alaer: Tarim University, 2022.]

[20] ZHU Y Y, LÜ J M, GU Y, et al. Mixed fermentation of Chinese bayberry pomace using yeast, lactic acid bacteria and acetic acid bacteria: Effects on color, phenolics and antioxidant ingredients[J]. LWT, 2022, 163: 113503.

[21] ZHANG Z W, LI J Y, FAN L P. Evaluation of the composition of Chinese bayberry wine and its effects on the color changes during storage[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 451-457.

[22] 付镓榕,马尚玄,黄克昌,等.含水量对澳洲坚果带壳果浮选

效果的影响[J]. 热带农业科技, 2021, 44(1): 13–16. [FU J R, MA S X, HUANG K C, et al. Effect of different water content on macadamia nut-in-shell flotation [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2021, 44(1): 13–16.]

[23] 罗萍. 澳洲坚果落果种子萌发力研究[J]. 华南热带农业大学学报, 2000(3): 9–12, 47. [LUO P. Study on seed germination of macadamia nut drop fruit [J]. Journal of Tropical Biology, 2000(3): 9–12, 47.]

[24] ZHAO H D, LIU B D, ZHANG W L, et al. Enhancement of quality and antioxidant metabolism of sweet cherry fruit by near-freezing temperature storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 147: 113–122.

[25] JANNATIZADEH A, AGHDAM M S, FARMANI B, et al. β -Aminobutyric acid treatment confers decay tolerance in strawberry fruit by warranting sufficient cellular energy providing[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240: 249–257.

[26] 刘晓柱, 李银凤. 低温处理对平菇贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(8): 67–73. [LIU X Z, LI Y F. Effect of low-temperature treatment on storage quality of *Pleurotus ostreatus* fruit bodies [J]. Food Research and Development, 2023, 44(8): 67–73.]

[27] XU T T, LI J, FAN Y W, et al. Comparison of oxidative stability among edible oils under continuous frying conditions[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(7): 1478–1490.

[28] 杨媛媛, 王锐, 张有林. 贮藏条件对冷榨精炼核桃油脂氧化酸败的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(1): 159–164. [YANG Y Y, WANG R, ZHANG Y L. Effects of storage conditions on the oxidative rancidity of cold-pressed walnut oil [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(1): 159–164.]

[29] GHARIBZAHEDI S M T, MOUSAVI S M, HAMEDI M, et al. Evaluation of physicochemical properties and antioxidant activities of Persian walnut oil obtained by several extraction methods [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 45: 133–140.

[30] RABADÁN A, ÁLVAREZ-ORTÍ M, PARDO J E, et al. Storage stability and composition changes of three cold-pressed nut oils under refrigeration and room temperature conditions[J]. Food Chemistry, 2018, 259: 31–35.

[31] SOARES S, LIMA M J, ROCHA F R. A spot test for iodine value determination in biodiesel based on digital images exploiting a smartphone[J]. Microchemical Journal, 2017, 133: 195–199.

[32] 于江, 颖敏华, 吴小华, 等. 不同贮藏温度对干核桃贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(3): 26–33. [YU J, XIE M H, WU X H, et al. Effects of different storage tempera-
tures on storage quality and antioxidant activity of dry walnut [J]. Storage and Process, 2020, 20(3): 26–33.]

[33] MDITSHWA A, MAGWAZA L S, TESFAY S Z, et al. Postharvest factors affecting vitamin C content of citrus fruits: A review[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 218: 95–104.

[34] HAN C, LI J, JIN P, et al. The effect of temperature on phenolic content in wounded carrots[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 116–123.

[35] SRICHAMNONG W, SRZEDNICKI G. Internal discoloration of various varieties of macadamia nuts as influenced by enzymatic browning and Maillard reaction[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 192: 180–186.

[36] WARREN D, SHOWMAN C, ROSE A, et al. Storage stability and consumer acceptance of soluble protein powders derived from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Future Foods, 2022, 5: 100148.

[37] ZHANG J, LI G H, HUANG Q Y, et al. Effects of culm carbohydrate partitioning on basal stem strength in a high-yielding rice population[J]. The Crop Journal, 2017, 5(6): 478–487.

[38] JURCZYK B, RAPACZ M, POCIECHA E, et al. Changes in carbohydrates triggered by low temperature waterlogging modify photosynthetic acclimation to cold in *Festuca pratensis*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 122: 60–67.

[39] 刘晨霞, 孔凡俊, 柳洪入, 等. ϵ -聚赖氨酸对金瓜贮藏期间质构品质及保鲜效果的研究[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(8): 7–14, 20. [LIU C X, KONG F J, LIU H R, et al. Research of ϵ -polylysine on the texture quality and preservation effect of marrow squash (*Cucurbita pepo* L. var. *Medullosa* Alef.) during storage [J]. Storage and Process, 2023, 23(8): 7–14, 20.]

[40] WU H, ZHU J X, DIAO W C, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction and antioxidant activity of polysaccharides from pumpkin (*Cucurbita moschata*) [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 314–324.

[41] MELUCCI D, BENDINI A, TESINI F, et al. Rapid direct analysis to discriminate geographic origin of extra virgin olive oils by flash gas chromatography electronic nose and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2016, 204: 263–273.

[42] 于二汝, 袁婷婷, 杨航, 等. 14 份紫叶紫苏叶片营养综合评价及精油型分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 311–319. [YU E R, YUAN T T, YANG H, et al. Comprehensive nutritional evaluation and essential oil typeanalysis of 14 purple *Perilla frutescens* lines [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 311–319.]