果 树 学 报 2026,43(3):635-648
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250379

不同贮藏温度对澳洲坚果鲜果品质及代谢变化的影响

陆敬伊[1,2,3],李 娅[1,2#],帅希祥[1,2],张 明[1,2],吴振先[3*],杜丽清[1,2],邓 旭[1,2*]

([1]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,广东湛江 524091;
[2]农业农村部热带果树生物学重点实验室,广东湛江 524091;[3]华南农业大学园艺学院,广州 510640)

摘 要:【目的】探究不同贮藏温度对澳洲坚果鲜果品质及代谢变化的影响,明确贮藏温度对果实生理代谢的作用机制,从而为延长鲜果货架期并保持其采后品质提供理论依据。**【方法】**以青皮果和带壳果为试验材料,通过测定25 ℃、4 ℃、−18 ℃条件下果仁的主要品质指标和生理指标,探究不同贮藏温度对澳洲坚果鲜果品质、能量代谢、活性氧代谢的影响。**【结果】**低温贮藏能在一定程度上保持果实的品质。4 ℃贮藏的新鲜青皮果果仁和壳果果仁色差值低于−18 ℃和25 ℃。与−18 ℃和25 ℃相比,4 ℃可以维持较高的水分含量,稳定的营养品质(粗脂肪含量和蛋白含量)以及高水平的能量代谢。4 ℃贮藏抑制了多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性,维持了超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)的高活性,且丙二醛(MDA)含量较低。**【结论】**澳洲坚果鲜果贮藏的最优温度为4 ℃,此温度下鲜果的品质最佳。

关键词:澳洲坚果鲜果; 贮藏保鲜; 温度; 采后品质; 能量代谢; 活性氧代谢

中图分类号:S664.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)03-0635-14

Effect of different storage temperatures on the quality and metabolic changes of fresh macadamia nuts

LU Jingyi[1,2,3], LI Ya[1,2#], SHUAI Xixiang[1,2], ZHANG Ming[1,2], WU Zhenxian[3*], DU Liqing[1,2], DENG Xu[1,2*]

([1]South Subtropical Crop Research Institute, China Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Hainan Province for Postharvest Physiology and Technology of Tropical Horticultural Products, Zhanjiang 524091, Guangdong, China; [2]Key Laboratory of Tropical Fruit Biology, Ministry of Agriculture & Rural Affairs, Zhanjiang 524091, Guangdong, China; [3]College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract:【Objective】This study aimed to explore the effects of different storage temperatures on the quality and metabolic changes of fresh macadamia (*Macadamia* spp.) nuts, elucidating the mechanisms by which storage temperature influences the physiological metabolism of the nuts, thereby providing a theoretical basis for extending the shelf life of fresh macadamia nuts and maintaining its post-harvest quality.【Methods】In this experiment, fresh green-peel kernels (XQ) and shelled kernels (XK) were used as the main test materials, which were packaged in PE bags and stored under different temperatures (25 ℃, 4 ℃, −18 ℃), and divided into 6 groups: 25XQ, 4XQ, −18XQ, 25XK, 4XK, −18XK, and samples were taken after 0, 7, 14, 21, 28, 35, and 42 days of storage. The moisture content, protein content, crude fat content, color difference, energy metabolism level, polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) enzyme activities, and malondialdehyde (MDA) content were determined. Experimental data were collected and collated by Microsoft Excel 2016, graphed with Origin 2022, and one-way analysis of variance (ANOVA) was performed with SPSS 27.0 software ($P<0.05$).【Results】The results showed that 4 ℃ was the optimal temperature for preserving the moisture content, crude fat content, and protein content of fresh macadamia kernels. On

收稿日期:2025-07-02 **接受日期:**2025-09-01

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630062025001;1630062025014);国家重点研发计划资助(2023YFD2200705)

作者简介:陆敬伊,女,在读硕士研究生,研究方向果品保鲜与贮藏,E-mail:994867476@qq.com。#为共同第一作者。

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:litchi2008@126.com;E-mail:denxu@163.com

day 0, the kernels exhibited a relatively high initial moisture content (approximately 23.43%), with crude fat and protein contents of about 59.34% and 6.13%, respectively. When stored at room temperature (25 ℃), the crude fat content of 25XQ ranged from 58.80% to 61.73%, while its protein content varied between 6.04% and 6.38%. For 25XK, the crude fat content ranged from 59.34% to 72.15%, and the protein content ranged from 6.13% to 7.45%. In contrast, under 4 ℃ storage, the crude fat and protein contents ranged from 59.34% to 62.05% and 6.13% to 6.41%, respectively. Similarly, 4XK maintained crude fat content between 59.34% and 64.34%, and protein content between 6.13% and 6.65%. Meanwhile, 4 ℃ proved to be a more effective method for preserving the color of both XQ and XK kernels. The color difference (ΔE) of −18XQ was significantly higher than those of 25XQ and 4XQ ($P<0.05$), indicating greater changes in appearance color under −18 ℃ compared with storage at 25 ℃ and 4 ℃. Similarly, the ΔE value of 25XK was significantly higher than those of 4XK and −18XK ($P<0.05$). Storage at 4 ℃ enabled better preservation of the energy metabolism in both XQ and XK kernels. Compared with those stored at 25 ℃ and −18 ℃, the ATP content, ADP content, and energy charge of kernels kept at 4 ℃ consistently maintained at relatively higher levels. The treatment of storage at 4 ℃ and −18 ℃ reduced POD activity in macadamia, significantly inhibiting the degradation of hydroperoxides derived from unsaturated fatty acids and thereby decreasing the formation of off-flavors. Besides, 4 ℃ significantly reduced the PPO activity and delayed the browning of macadamias. Furthermore, 4 ℃ was more helpful to maintain the activity of SOD and CAT. The SOD and CAT activities of 4XQ and 4XK were significantly higher than those of 25XQ, 25XK, −18XQ and −18XK ($P<0.05$). The synergistic action of SOD and CAT efficiently eliminated reactive oxygen species (ROS), reduced oxidative damage to the membrane system. Storage at 4 ℃ effectively delayed the rate of MDA generation by maintaining higher activities of SOD and CAT.【Conclusions】Storage at 4 ℃ could effectively maintain the moisture content of the macadamia, inhibit the increase of color difference values, and sustain a high energy charge state, thus ensuring the ATP-dependent repair mechanisms. Additionally, 4 ℃ could maintain quality by reducing the activities of PPO/POD, sustaining high activities of SOD/CAT, and ensuring a stable energy supply. Therefore, 4 ℃ seems to be the optimal storage temperature for fresh macadamia nuts.

Key words: Fresh macadamia nuts; Storage and preservation; Temperature; Postharvest quality; Energy metabolism; Reactive oxygen metabolism

澳洲坚果(*Macadamia* spp.)为山龙眼科(Proteaceae)澳洲坚果属(*Macadamia* F. Muell)常绿乔木果树,又名夏威夷果、昆士兰坚果、澳洲胡桃,原产于澳大利亚昆士兰州东南部和新南威尔州北部沿海的亚热带雨林地区[1]。澳洲坚果果仁脂肪含量高达70%~80%,不饱和脂肪酸的比例约占77.23%,富含生育酚、生育三烯酚、植物甾醇和角鲨烯等活性成分,且不含胆固醇[2]。

澳洲坚果采收后应尽快进行初步加工,以避免引起鲜果的品质变化。新鲜澳洲坚果果皮含水量为35%~45%,果仁含水量为23%~25%,且含有大量易氧化酸败的不饱和脂肪酸[3],因此不耐贮存。青皮果长时间堆放在一起,因呼吸作用增强导致温度和湿度升高。在高温高湿环境下,坚果容易发生霉变、腐烂和品质劣变[3]。

澳洲坚果鲜果常用的贮存方法包括普通室内贮藏和低温贮藏,且在贮存过程中应避免果实吸潮,以防变质。付镓榕等[4]研究了田间摊放、室内摊放和室内堆放3种贮藏方式对澳洲坚果鲜果品质的影响,结果表明室内摊放贮藏最能有效保持果实品质、降低缺陷果率,是推荐的贮藏方式。张丞等[5]研究了在冷藏和室温条件下五倍子单宁对澳洲坚果鲜食果仁保鲜效果的影响,结果表明五倍子单宁能有效降低包装内氧气含量,抑制果仁油脂氧化酸败与霉菌生长,显著延长保鲜期并维持果仁鲜食口感。郭刚军等[6]将带壳的鲜食澳洲坚果开口,通过微波灭酶处

理、纳他霉素溶液浸泡等方法延长保鲜贮藏时间，但所用鲜食坚果须先将果仁水分含量干燥至6%~12%。王文林等[7]将脱青皮的新鲜带壳澳洲坚果在壳聚糖、β-环糊精、肉桂精油和甘油等混合复配保鲜剂中浸泡后，真空预冷存放在聚乙烯薄膜袋中可贮藏6个月以上。付镓榕等[8]研究了不同温湿度贮藏对澳洲坚果鲜果品质的影响，发现35 ℃（相对湿度80%）条件下水分损失最快、贮藏裂果率最高，而30 ℃时霉果率最高；付镓榕还构建了反向传播（BP）神经网络预测模型，具有高预测精度，可实现澳洲坚果品质的快速预测。目前，有关澳洲坚果鲜果在贮藏期间品质变化的研究已有报道，然而贮藏温度对果实生理代谢的作用机制尚不明确。因此，结合澳洲坚果鲜果采后的品质变化，研究在不同温度条件下鲜果能量代谢与活性氧代谢的变化，为延长鲜果货架期并保持其采后品质提供理论依据。

本研究以新鲜澳洲坚果的青皮果和带壳果为试材，研究在25 ℃、4 ℃和−18 ℃贮藏温度条件下，色泽，水分含量，能量代谢，多酚氧化酶（PPO）、过氧化物酶（POD）、超氧化物歧化酶（SOD）和过氧化氢酶（CAT）活性，以及丙二醛（MDA）含量的变化规律，以期确定适宜的贮藏温度，为新鲜澳洲坚果产品的贮藏和品质调控提供参考。

1　材料和方法

1.1　材料

试验于2024年9—10月在湛江中国热带农业科学院南亚热带作物研究所进行，新鲜带青皮澳洲坚果产自广西玉林。成熟果实采收后于室温下运输，在2 d内运回实验室，未进行其他处理。

1.2　试验设计

选择无病虫害、腐烂、机械损伤的新鲜澳洲坚果青皮果（XQ），使用脱皮机进行脱青皮处理后，获得带壳果（XK），分别对XQ和XK使用PE袋进行包装。青皮果每袋约1.2 kg，带壳果每袋约0.7 kg，并置于不同温度（25 ℃、4 ℃、−18 ℃）下贮藏，共分为6组：25XQ、4XQ、−18XQ、25XK、4XK、−18XK，在贮藏第0、7、14、21、28、35、42天分别取样，每次取样于每种贮藏条件下各取3袋，即3次重复。从各袋的每个果实中取部分果仁，混合均匀后，立即使用液氮速冻。一部分用于测定水分、粗脂肪、蛋白质含量和色泽，另一部分置于−80 ℃超低温冰箱保存，用于分析酶活性、MDA含量和能量水平。所有理化指标的测定至少进行3次及以上生物学重复。

1.3　试验方法

1.3.1　水分含量测定　参考张权[9]方法，略作修改。采用梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司HC103卤素水分测定仪测定，将新鲜澳洲坚果果仁粉碎后称取3.00 g置于水分测定仪托盘，待水分烘干结束，记录结果读数（单位：%）。

1.3.2　粗脂肪含量测定　参照GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》[10]，采用索氏提取法，使用上海洪纪仪器设备有限公司SZF-06A索氏提取器进行测定。

1.3.3　蛋白质含量测定　参考Zhang等[11]的方法，略作修改。称取0.2 g果实样品于消化管中，加入两粒凯氏定氮高效催化片，再加入10 mL浓硫酸，消化约2.5 h。使用海能未来技术集团股份有限公司K1160全自动凯氏定氮仪，通过仪器自带的加液系统向接收瓶中加入盐酸标准滴定液，当颜色发生变化时即可停止滴定。蛋白质含量（M）计算公式：

$$M/\% = \frac{0.014 \times c \times (V_1 - V_2) \times F}{m} \times 100 。$$

式中：c表示盐酸标准滴定液浓度，单位为$mol \cdot L^{-1}$；V_1和V_2分别表示试液和空白试剂消耗盐酸标准滴定液的体积，单位为mL；m表示试样质量，单位为g；F表示氮换算为蛋白质的系数。

1.3.4　色差测定　使用深圳市三恩时科技有限公司NS800分光测色仪测定果仁中心的色泽，记录样品的L^*（亮度）、a^*（红绿）、b^*（黄蓝）。总色差（ΔE）计算公式：

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_{实验} - L^*_0)^2 + (a^*_{实验} - a^*_0)^2 + (b^*_{实验} - b^*_0)^2} 。$$

式中：L^*_0、a^*_0、b^*_0表示新鲜果仁0 d时的色度值；$L^*_{实验}$、$a^*_{实验}$、$b^*_{实验}$表示贮藏各取样时间点测定的色度值。

1.3.5　三磷酸腺苷（ATP）、二磷酸腺苷（ADP）、一磷酸腺苷（AMP）含量测定和能荷（EC）水平的变化　ATP、ADP、AMP采用北京索莱宝科技有限公司的试剂盒，使用帝肯（上海）贸易有限公司Spark 10m酶联免疫分析仪进行测定。

能荷（EC）计算公式：

$$EC = \frac{C_{ATP} + 0.5 \times C_{ADP}}{C_{ATP} + C_{ADP} + C_{AMP}} 。$$

式中：C_{ATP}表示ATP含量，C_{ADP}表示ADP含量，

C_{AMP}表示AMP含量。

1.3.6 PPO、POD、SOD、CAT活性测定 PPO、POD、CAT活性采用北京索莱宝科技有限公司的试剂盒进行测定；SOD活性采用北京索莱宝科技有限公司WST-1法活性测定试剂盒，使用帝肯（上海）贸易有限公司Spark 10m酶联免疫分析仪进行测定。

1.3.7 MDA含量测定 MDA含量采用北京索莱宝科技有限公司的试剂盒，使用帝肯（上海）贸易有限公司Spark 10m酶联免疫分析仪进行测定。

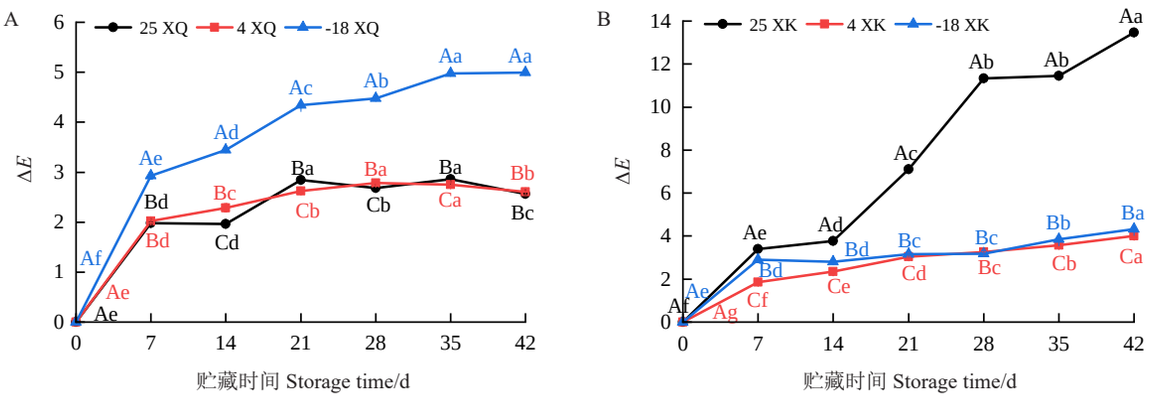
1.4 数据分析

使用Microsoft Excel 2016软件进行数据收集整理，采用Origin 2022软件进行图表绘制，采用SPSS 27.0软件进行单因素方差分析（ANOVA）（当$P<0.05$时，认为差异具有统计学意义）。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁色差值的影响

果实褐变主要包括非酶褐变和酶促褐变两种类型。前者由非酶因素引发的化学反应导致，后者则是组织内的酚类物质在酶（如PPO）作用下氧化，进而引起组织变色[12]。果仁褐变的机制还涉及细胞氧化还原代谢失调以及细胞结构的破坏[13]。本试验发现，贮藏过程会导致澳洲坚果果仁发生褐变，并反映为各处理组的ΔE值均随着贮藏时间的延长而持续上升（图1）。



不同大写字母表示同一天数下不同贮藏温度之间存在显著差异（$P<0.05$）。不同小写字母表示同一温度下不同贮藏天数之间存在显著差异（$P<0.05$）。下同。

Different capital letters indicate significant difference between the different temperature at the same storage days ($P<0.05$). Different small letters indicate significant difference between the different storage days at the same temperature ($P<0.05$). The same below.

图1 不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁（A）和带壳果果仁（B）色差值的影响

Fig. 1 Effect of different storage temperatures on the color difference of fresh green-peel kernels (A) and shelled kernels (B)

−18XQ的ΔE值显著高于25XQ和4XQ贮藏组（$P<0.05$）（图1-A），这与图2中XQ的果仁颜色变化一致。−18 ℃冻藏下的XQ果仁颜色随着贮藏时间的延长而逐渐加深，变化幅度大于25 ℃和4 ℃贮藏组。冻藏不能使鲜核桃种仁维持较低的ΔE值，这可能是由于果实能量亏损时，活性氧积累增加，细胞膜损伤，代谢紊乱，从而加速了果实冷害的发生，使得果仁ΔE值变大[13]。25XK的ΔE值显著高于4XK和−18XK贮藏组（$P<0.05$）（图1-B），与图3中XK的果仁颜色变化一致。这可能是由于XK果壳具有有序的微孔结构[15]，因此相较于4 ℃和−18 ℃，在25 ℃贮藏下的XK呼吸和衰老等活动增快，导致深色聚合物积累增多[16]。另外，整个贮藏期间25XK的水分含量呈下降趋势（图4-B）。失水导致细胞膜透性增加，使脂质更易接触氧气，从而加剧氧化变黄。随着贮藏时间的延长，25XK果仁失水皱缩且颜色逐渐加深（图3）。

25XQ的ΔE值低于25XK贮藏组（图1），这可能是因为XQ青皮的保护，果仁的贮藏环境空气较少，呼吸、衰老等活动受到抑制，深色聚合物积累减少。以上结果表明，在贮藏过程中，−18 ℃并不能更好地保持XQ果仁的颜色；而壳果因为自身的结构特点，不适合在25 ℃下贮藏；4 ℃能够更好地保持XQ和XK果仁的色泽品质。

2.2 不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁水分含量的影响

水分含量是影响澳洲坚果贮藏品质的关键因

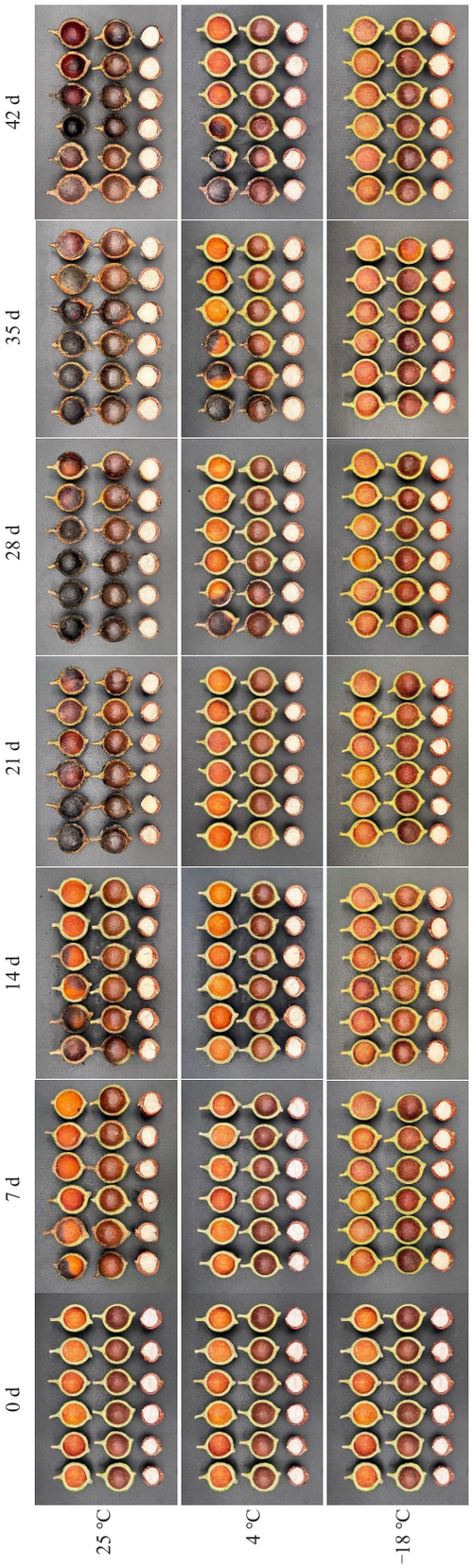


图 2　不同贮藏温度下新鲜青皮果果仁的变化

Fig. 2　Changes in fresh kernels of green-peel at different storage temperatures

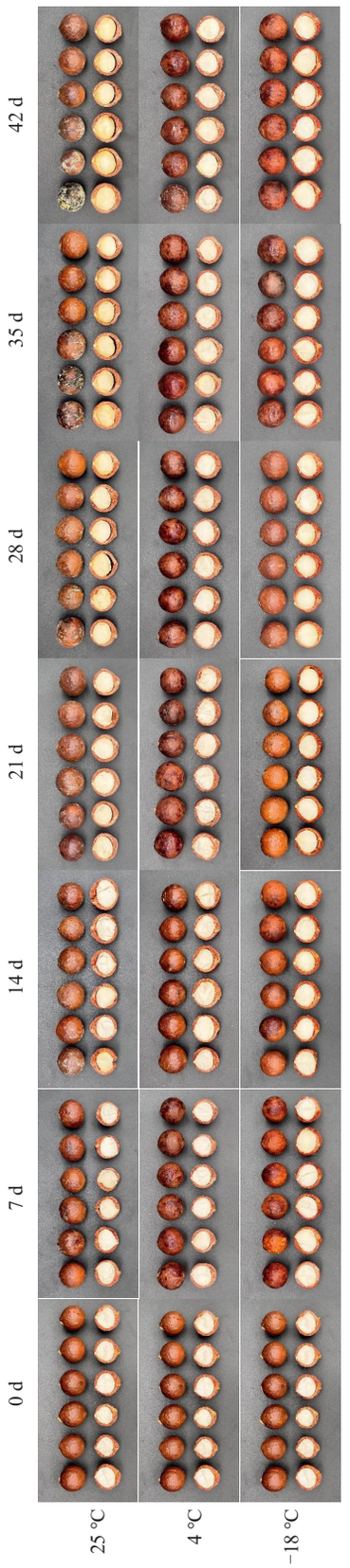


图 3　不同贮藏温度下新鲜壳果果仁的变化

Fig. 3　Changes in fresh kernels of shelled at different storage temperatures

素。由于自身的生理活动以及贮藏环境的影响，果实水分含量发生变化，从而影响其外观和品质。0 d果仁具有较高的初始含水量（约23.43%），在贮藏前期（0~7 d），6组果仁水分含量均呈下降趋势（图4）。这是由于前期果实呼吸作用较强，环境温度变化诱导果皮角质层发生分子结构解聚或晶体排列紊乱，导致表皮屏障功能弱化，进而加剧非气孔性蒸腾失水过程[17-18]。

在贮藏过程中，果仁水分含量易受多重因素影响。25XQ在贮藏28 d后，水分含量高于4XQ和−18XQ。25 ℃时青皮果果皮组织的水分蒸腾与呼吸代谢活动较为旺盛，加之果堆内部空气流通不畅，导致二氧化碳、热量及水分在密闭空间内不断积聚，这种环境变化引发贮藏体系的温度升高。经过一定周期后，由于局部高温高湿条件的持续作用，使得果皮中的水分透过果壳进入内部，导致25XQ果仁水分含量上升。−18XQ在贮藏28 d后，水分含量显著低于25XQ和4XQ（$P<0.05$）。罗树楠等[19]研究表明鲜核桃在冻藏时随着内部水分自然流失和生化反应的进行，失重率不断增加，这与本试验中观察到的澳洲坚果水分变化趋势一致（图4-A）。

25XK的水分含量在整个贮藏期间呈下降趋势，贮藏21 d后显著低于4XK和−18XK贮藏组（$P<0.05$）（图4-B）。这可能是因为果壳具有有序的微孔结构[15]，使得在常温下，果仁因水分蒸腾与呼吸代谢活动产生的水分透过果壳蒸发。而低温（4 ℃和−18 ℃）低氧的贮藏环境可以减缓呼吸、衰老等反应速率，并抑制微生物对水分的利用，从而减少水分流失。总体而言，4 ℃可以更好地维持澳洲坚果鲜果的水分含量。

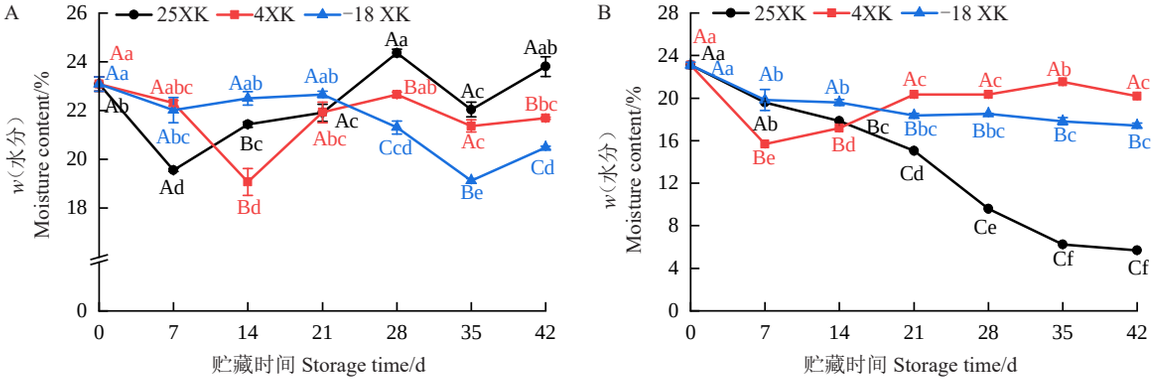


图4 不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁（A）和带壳果果仁（B）水分含量的影响

Fig. 4 Effects of different storage temperatures on the moisture content of fresh green-peel kernels (A) and shelled kernels (B)

2.3 不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁粗脂肪含量和蛋白质含量的影响

随着贮藏时间的延长，新鲜澳洲坚果果仁的粗脂肪和蛋白质含量发生显著变化，这主要与水分含量的变化有关。当水分含量降低时，新鲜果实的干物质比例（包括脂肪、蛋白质等）相对升高，反之，其他干物质的比例会相对降低。25XQ的粗脂肪含量为58.80%~61.73%，蛋白质含量为6.04%~6.38%；25XK的粗脂肪含量为59.34%~72.15%，蛋白质含量为6.13%~7.45%。由于具有高蛋白含量且处于高温高湿环境，新鲜澳洲坚果易被微生物利用导致腐败变质。在4 ℃贮藏时，4XQ的粗脂肪含量为59.34%~62.05%，蛋白质含量为6.13%~6.41%；4XK的粗脂肪含量为59.34%~64.34%，蛋白质含量为6.13%~6.65%，粗脂肪和蛋白质含量变化范围小，较好地维持了新鲜澳洲坚果的营养品质（图5）。

2.4 不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁ATP、ADP、AMP含量和能荷水平的影响

ATP、ADP、AMP在代谢活动中扮演着重要角色，是植物生理、代谢以及能量状态的重要指标[20]。呼吸链是植物细胞产生活性氧的主要场所，当细胞能量供应不足时，呼吸途径可能发生变化或呼吸链受损，从而导致活性氧（ROS）大量生成。ROS会攻击膜系统，导致膜透性不断增加，破坏细胞的区室化，最终引发果实褐变和腐烂[21-22]。

与25 ℃、−18 ℃相比，4XQ、4XK的ATP、ADP含量和能荷始终维持在相对较高的水平（图6，图7）。

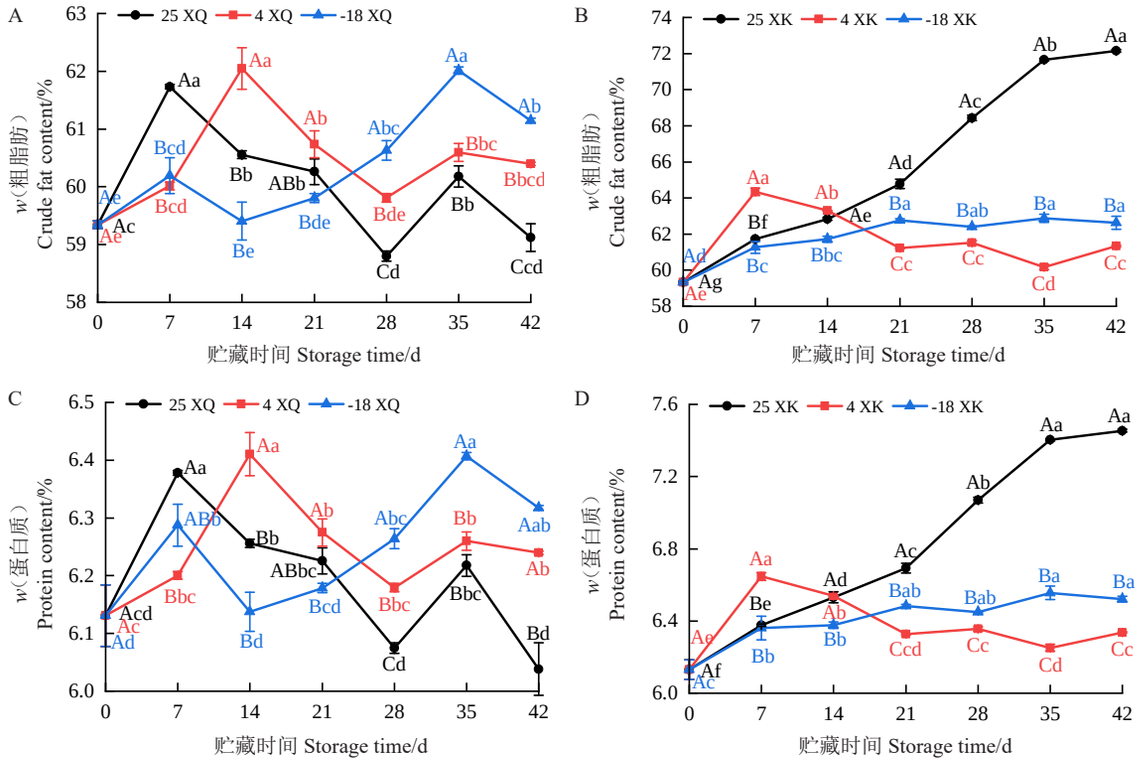


图 5　不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁粗脂肪含量（A）和蛋白质含量（C）和带壳果果仁粗脂肪含量（B）和蛋白质含量（D）的影响

Fig. 5　Effect of different storage temperatures on crude fat content (A) and protein content (C) of fresh green-peel kernels and crude fat content (B) and protein content (D) of shelled kernels

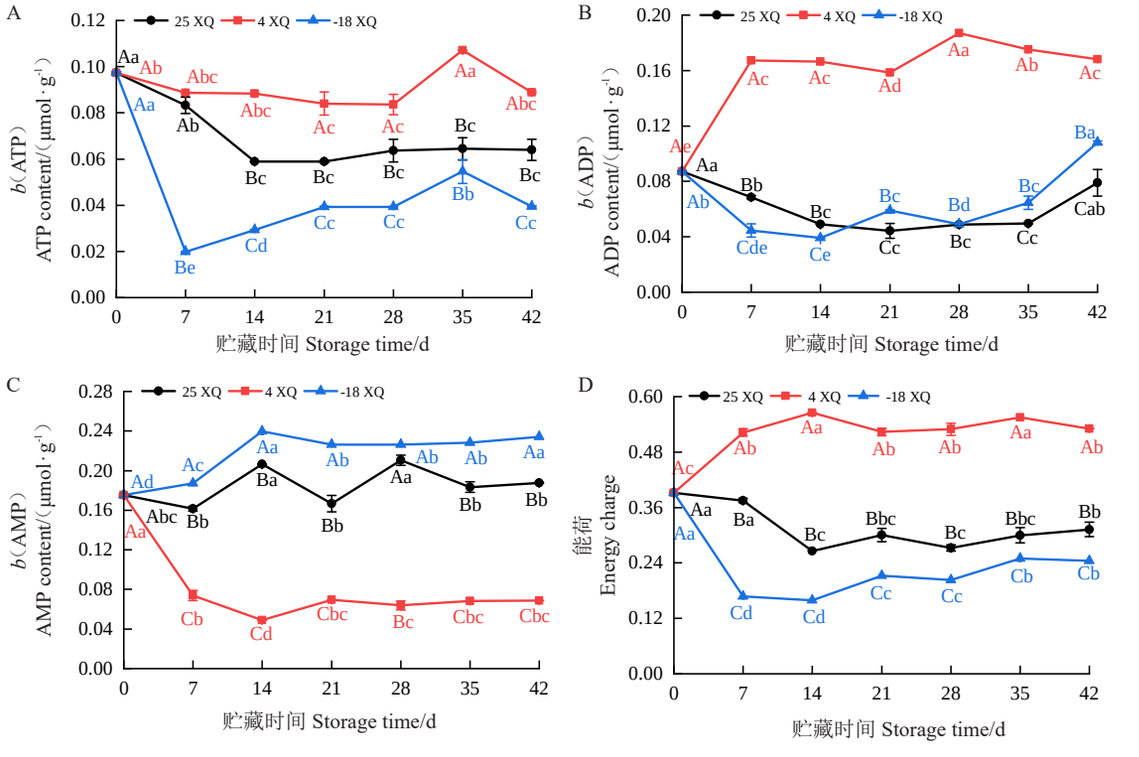


图 6　不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁 ATP（A）、ADP（B）、AMP 含量（C）和能荷（D）的影响

Fig. 6　Effects of different storage temperatures on the contents of ATP (A), ADP (B), AMP (C) and energy charge (D) levels of fresh green-peel kernels

AMP保持在较低水平，表明细胞处于能量充足的状态，而高能量状态可以降低果实在低温贮藏中冷害发生的风险[23]。与25 ℃、4 ℃相比，−18XQ、−18XK的ATP、ADP含量和能荷维持在较低水平。同时，二者AMP含量总体保持在较高水平，但−18XK的AMP含量存在较大波动（图6，图7）。研究表明，果实采后由于可用能量供应不足或细胞内能量生成速率降低，加速果实的衰老和褐变[23-24]，从而导致色泽等感官品质的下降，这可能也是导致−18XQ果仁Δ*E*值较高的主要因素（图3-A）。

采后新鲜澳洲坚果的ATP含量整体呈下降趋势（图6，图7），这是由于脱离了母体营养供应，呼吸作用紊乱，共同导致ATP合成减少。保持采后果实中ATP含量和能量代谢稳态是维持其正常生理活动及

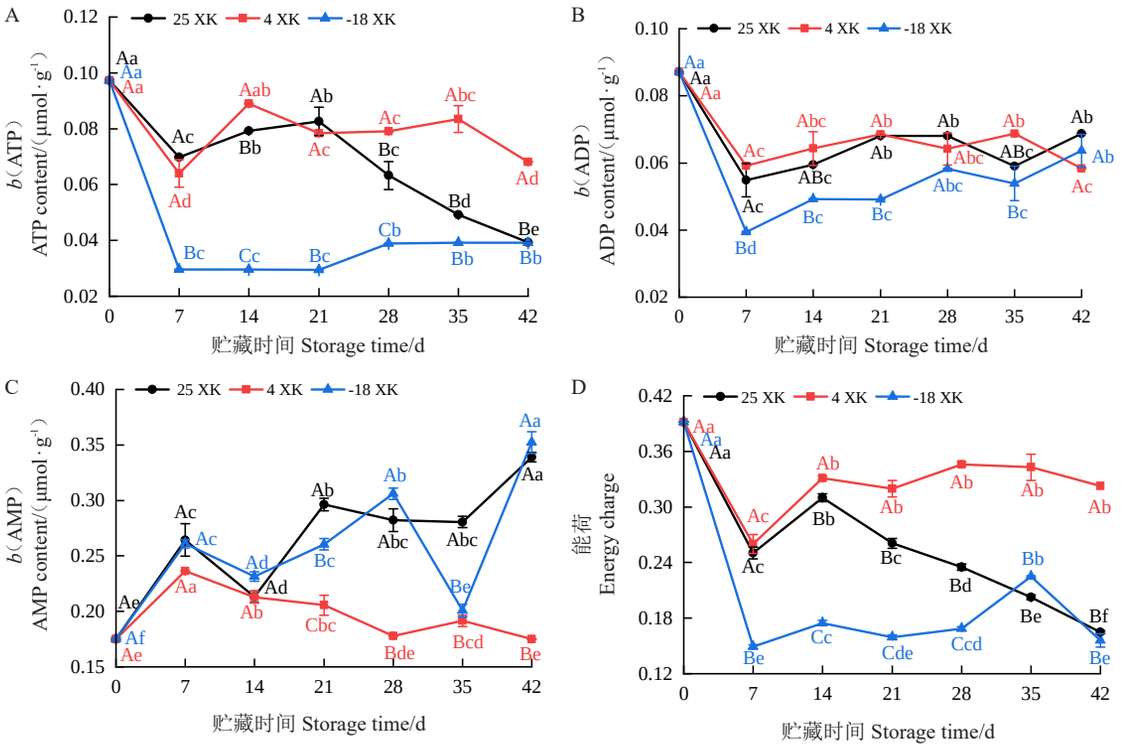


图7 不同贮藏温度对新鲜壳果果仁ATP（A）、ADP（B）、AMP含量（C）和能荷（D）的影响

Fig. 7 Effects of different storage temperatures on the contents of ATP (A), ADP (B), AMP (C) and energy charge (D) levels of fresh shell kernels

细胞功能的核心。当能量供应不足时，细胞应对生物胁迫与环境压力的防御机制弱化，从而加速细胞膜结构的破坏[25]。以上结果表明，4 ℃能更好地维持XQ和XK果仁的能量代谢。

2.5 不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁POD活性的影响

在油料种子及油脂的贮藏过程中，POD能催化不饱和脂肪酸氢过氧化物的裂解，产生具有不良风味的挥发性羰基化合物，同时产生自由基，加速果实衰老。因此，POD活性是反映果实衰老的一个重要指标[26]。在贮藏期间，XQ和XK果仁于25 ℃下的POD活性普遍高于4 ℃和−18 ℃下的活性。在25 ℃贮藏时，果仁的呼吸作用和脂质氧化速率加快，导致ROS大量积累，从而激活抗氧化防御系统，使POD活性升高以清除H_2O_2。在4 ℃和−18 ℃贮藏时，POD活性迅速下降，表明4 ℃和−18 ℃显著抑制呼吸作用和不饱和脂肪酸氢过氧化物的裂解，减少H_2O_2生成，从而降低POD的活性。以上结果表明，4 ℃和−18 ℃能够有效地减少自由基的产生，减缓XQ和XK果仁的氧化和衰老进程（图8）。

2.6 不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁PPO活性的影响

PPO活性是导致果蔬褐变的重要因素之一，其引发的反应会导致果肉褐变、产生异味，并降低果蔬营养价值，影响风味与品质，故成为表征果蔬衰老的典型特征与关键指标[12]。XQ的PPO活性整体呈现

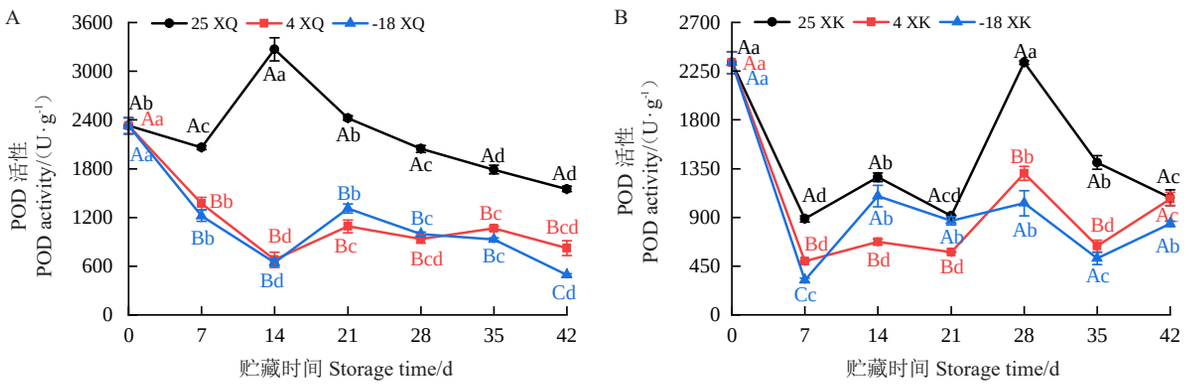


图 8　不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁（A）和带壳果果仁（B）POD 活性的影响

Fig. 8　Effects of different storage temperatures on peroxidase activity of fresh green-peel kernels (A) and shelled kernels (B)

多阶段波动的变化趋势（图 9-A），这可能是因为采后初期，青皮果仍进行旺盛的呼吸代谢，消耗大量能量和底物，间接抑制 PPO 活性；随着贮藏时间延长，细胞膜透性增加，酚类物质释放，为 PPO 提供充足底物，PPO 活性从而被激活；贮藏后期，酚类物质被持续氧化为醌类聚合物，底物浓度降低导致 PPO 活性无法维持。XK 的 PPO 活性整体呈现多阶段波动的变化趋势，其中 XK 的变化模式更为复杂，比 XQ 多经历一次完整的“下降-回升”周期（图 9-B），说明在贮藏后期可能出现了新的激活因素。这可能是由于果壳逐渐开裂，使氧气渗入内部，重新激活氧化酶系统。

XQ 和 XK 果仁在 4 ℃下的 PPO 活性普遍低于 25 ℃和−18 ℃（图 9）。这可能是因为在 4 ℃贮藏条件下，SOD 和 CAT 高效清除 ROS，减少氧化应激对膜系统的破坏，延缓了酚类物质的释放，抑制了 PPO 活性。由于 PPO 活性降低，整体褐变反应被抑制，导致 ΔE 值上升幅度较小（与前文结果一致）。上述结果表明，4 ℃贮藏能够显著降低 PPO 活性，延缓澳洲坚果的褐变进程。

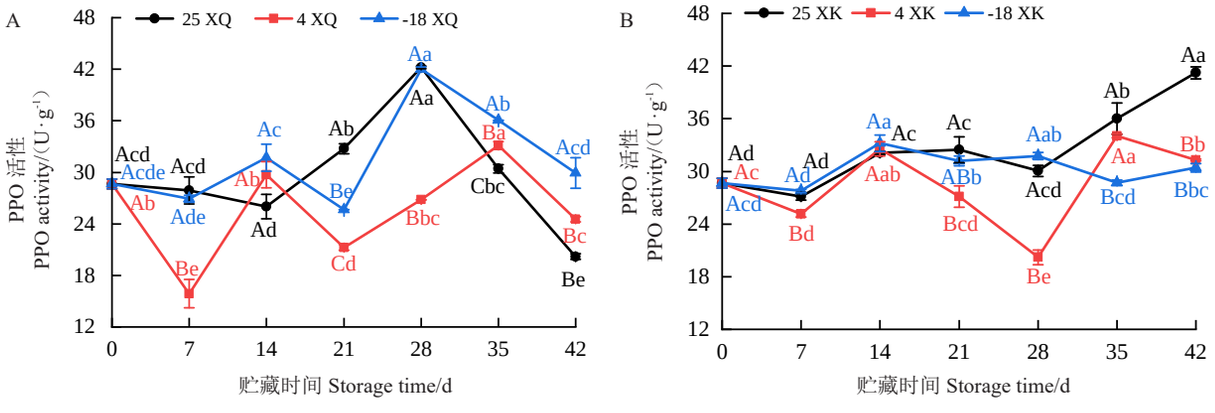


图 9　不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁（A）和带壳果果仁（B）PPO 活性的影响

Fig. 9　Effects of different storage temperatures on polyphenol oxidase activity in fresh green-peel kernels (A) and shelled kernels (B)

2.7　不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁 SOD 活性的影响

抗氧化酶在植物细胞中起到保护作用，能够减轻 ROS 介导的损伤，且抗氧化酶活性和抗冷性呈正相关[27]。SOD 是果实体内清除超氧阴离子的主要酶，其活性直接影响果实内超氧阴离子的清除速率，能够将果实内的超氧阴离子转化为低毒性的 H_2O_2 和 O_2[28-29]。

在贮藏过程中，4XQ、4XK 的 SOD 活性普遍高于 25XQ、25XK、−18XQ 和−18XK 的 SOD 活性。与 25 ℃和−18 ℃相比，4 ℃贮藏通过抑制果实呼吸作用和氧化代谢，减少 ROS 的生成，维持 SOD 稳定性，从而延缓 SOD 的降解。高 SOD 活性可有效清除超氧自由基，最大限度地减轻对细胞膜、蛋白质和

DNA的损害[30]。25XQ和25XK的SOD活性在出现峰值后呈下降趋势，表明随着贮藏时间的延长，果实代谢减缓，活性氧生成减少。同时，青皮果和壳果因呼吸消耗能量，导致SOD活性下降。上述结果表明，4 ℃更有助于维持SOD活性，减少果实冷害的发生（图10）。

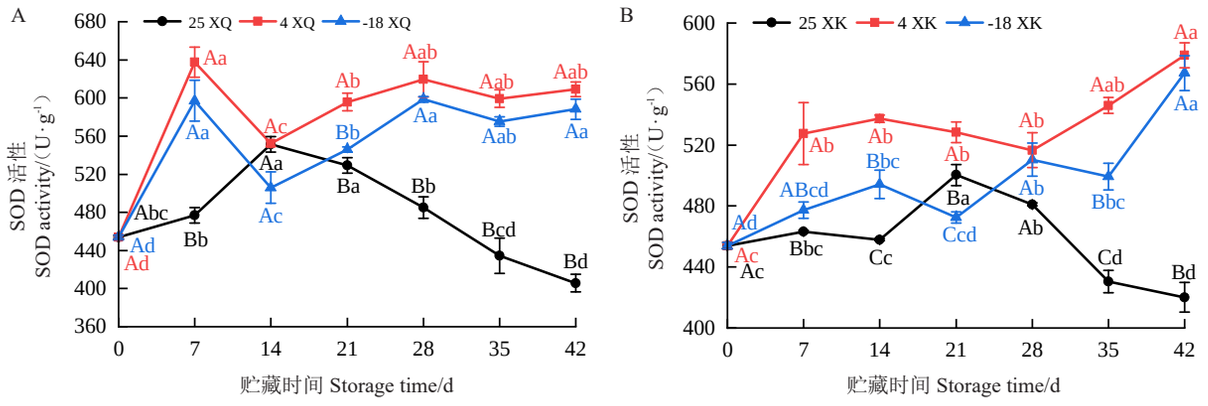


图10 不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁（A）和带壳果果仁（B）SOD活性的影响

Fig. 10 Effects of different storage temperatures on superoxide dismutase activity of fresh green-peel kernels (A) and shelled kernels (B)

2.8 不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁CAT活性的影响

CAT能够将有毒的H_2O_2氧化分解成对细胞无害的O_2和H_2O，从而保护植物组织[31]。因此，CAT活性增强有利于提高机体对H_2O_2的防御能力，增强抗逆性。

25XQ和25XK的CAT活性随着贮藏时间的延长呈先上升后下降的趋势（图11）。在贮藏初期，ATP含量较高，为CAT等保护酶的合成提供能量基础；同时，采后果实的呼吸作用增强，H_2O_2积累触发抗氧化防御信号，激活了CAT基因表达与酶合成。在贮藏中后期，25XQ受到微生物侵染，并且在较高温度下产生更多ROS抑制CAT活性。随着贮藏时间的延长，25XK的水分和ATP含量呈下降趋势，失水抑制了线粒体呼吸作用，使得ATP合成减少；而CAT活性的维持需要能量，因此，ATP缺乏导致CAT活性下降（图4-B和图7-A）。4XQ、4XK、−18XQ和−18XK在贮藏过程中保持了较高的CAT活性，整体呈先下降后上升再下降的变化趋势（图11）。这可能是由于贮藏初期的低温抑制了CAT活性。在贮藏后期（21~42 d），4XK的CAT活性高于25XK和−18XK的CAT活性。4 ℃贮藏通过诱导果实发生氧化应激和抗氧化反应，显著提高果实的CAT活性，能够更好地清除ROS，以保持果实品质[32]。上述结果表明，4 ℃低温贮藏可显著提高澳洲坚果果仁中CAT的活性。

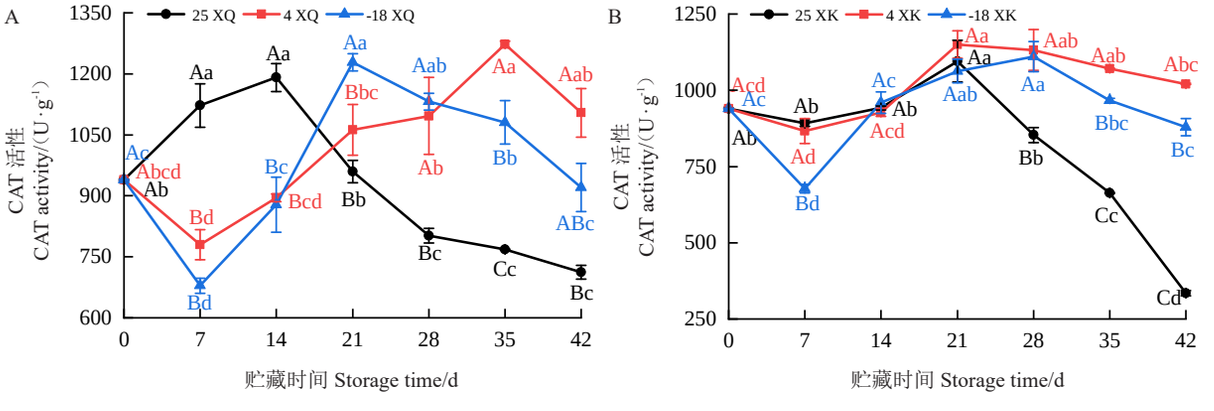


图11 不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁（A）和带壳果果仁（B）CAT活性的影响

Fig. 11 Effects of different storage temperatures on catalase activity in fresh green-peel kernels (A) and shelled kernels (B)

2.9　不同贮藏温度对新鲜青皮果和带壳果果仁 MDA 含量的影响

MDA 作为植物中自由基和脂质相互作用的最终产物，其含量反映了膜脂过氧化程度和植物的抗逆性强弱[33]。

MDA 含量整体均呈上升趋势（图 12），其累积量直接反映了细胞膜的受损程度。25 ℃贮藏条件下，XQ 和 XK 的 MDA 含量（*b*，后同）积累较快，分别在贮藏后期达到峰值，XQ 为 8.86 nmol·g^{-1}，XK 为 9.31 nmol·g^{-1}，表明细胞膜结构已遭受严重破坏，果实衰老进程加速。相比之下，4 ℃贮藏通过维持较高的 SOD、CAT 活性并抑制 ROS 积累，有效延缓了 MDA 生成速率[34]。同时，在 4 ℃贮藏时，果仁能量充足，有利于维持细胞结构的完整性。综上，4 ℃贮藏可显著降低 MDA 累积速度，进而减缓细胞膜透性增大程度，最终减轻膜系统损伤。

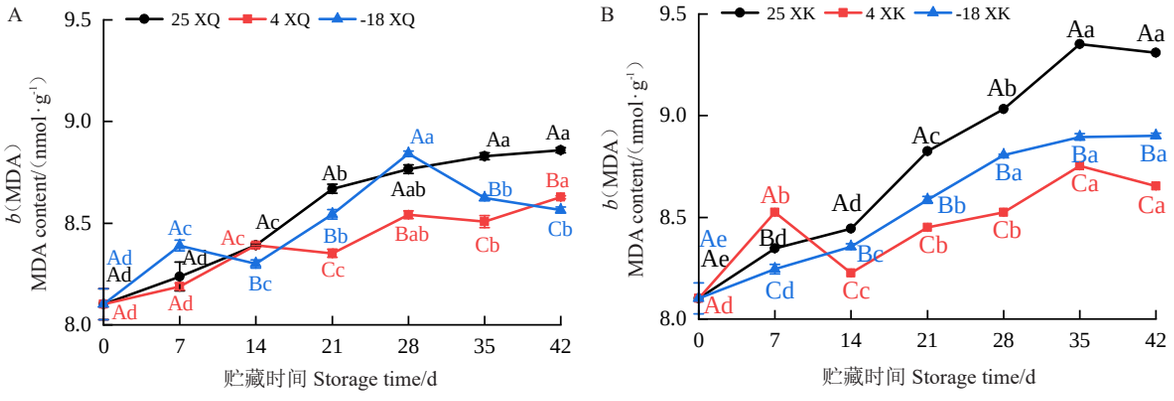


图 12　不同贮藏温度对新鲜青皮果果仁（A）和带壳果果仁（B）MDA 含量的影响

Fig. 12　Effects of different storage temperatures on malondialdehyde content in fresh green-peel kernels (A) and shelled kernels (B)

3　讨　论

3.1　温度对新鲜澳洲坚果果仁品质的影响

在贮藏新鲜澳洲坚果果仁时，4 ℃环境相较于 25 ℃和−18 ℃展现出显著优势。一方面，4 ℃贮藏能够有效抑制果仁呼吸代谢、非气孔性蒸腾失水及微生物活动，更好地维持细胞膜完整性，从而显著减少水分流失；另一方面，与罗树楠等[19]在核桃中的研究类似，−18 ℃贮藏时果仁水分含量变化明显，无法有效维持水分。果仁粗脂肪与蛋白质含量变化和水分紧密相关。由于 4 ℃下水分含量稳定，果仁的粗脂肪和蛋白质含量波动较小，其营养品质得以较好保留。同时，4 ℃贮藏能够有效抑制果仁 *ΔE* 值上升，这得益于 PPO 活性的下降、抗氧化屏障的维持以及细胞能量稳态的保障，从而减少酚类物质氧化、清除 ROS 并延缓细胞区室化解体。与之形成对比的是，在 25 ℃贮藏时，果仁因水分含量下降、脂质氧化加剧，导致整体 *ΔE* 值增大；而在−18 ℃下，*ΔE* 值变化趋势与王朝叶[14]的研究结论相符，表明该温度无法维持果仁色泽。综合来看，4 ℃贮藏对新鲜澳洲坚果果仁品质的影响最小。

3.2　温度对新鲜澳洲坚果果仁能量代谢的影响

果实贮藏期间的能量水平对维持细胞功能至关重要，能量不足会加速果实采后衰老与褐变进程，而维持组织的能量水平则可以延缓衰老与褐变过程[35]。在能量代谢与抗氧化系统协同作用下，4 ℃能够维持 ATP、ADP 含量和能荷始终处于相对较高的水平，保障 ATP 依赖的修复机制，这与陈熙等[36]在马铃薯中的研究结果相似。而−18 ℃的 ATP、ADP 含量和能荷维持在较低水平，使得果实可用能量供应不足，导致细胞膜损伤的同时 *ΔE* 值变大。因此，4 ℃能更好地维持新鲜澳洲坚果果仁的能量代谢。

3.3　温度对新鲜澳洲坚果果仁活性氧代谢的影响

ROS 是造成植物细胞氧化损伤的主要物质，ROS 过量积累则会产生氧化胁迫，引发一系列的不良反应，如呼吸代谢紊乱、能量供应不足和生物膜功能丧失等，加剧果蔬氧化损伤，促进衰老、褐变、软化等发生[37]。由 SOD、CAT 和 POD 等组成的酶促抗氧化系统是维持 ROS 平衡的主要途径之一。在 4 ℃

低温胁迫下，植物体内SOD和CAT活性显著升高而POD活性降低，同时MDA含量处于低水平，这一现象揭示了植物有效的低温氧化应激防御机制。低MDA含量作为脂质过氧化的关键标志物，直接证实细胞膜损伤轻微，SOD/CAT的协同作用有效维持了ROS稳态，阻断了氧化损伤链式反应，这与在百香果[37]、苹果[38]、甜瓜[39]等水果上的研究结果相似。综合来看，4 ℃贮藏维持了ROS稳态并保护了细胞膜结构的完整性。

4 结 论

4 ℃贮藏能够有效维持澳洲坚果果仁水分含量，抑制ΔE值的上升，且能维持高能荷状态，保障ATP依赖的修复机制。另外，4 ℃贮藏还能通过降低PPO、POD活性、维持SOD、CAT高活性及高能量水平来保持其品质。综上，4 ℃为澳洲坚果鲜果贮藏的最佳温度。

参考文献 References：

[1] 杨帆，付小猛，陶亮，杨虹霞，唐少平，周先艳，董美超，周东果 . 澳洲坚果起源、育种及种质资源研究现状[J]. 中国果树，2023(11)：1-7.
YANG Fan，FU Xiaomeng，TAO Liang，YANG Hongxia，TANG Shaoping，ZHOU Xianyan，DONG Meichao，ZHOU Dongguo. *Macadamia* spp. origin，variety breeding and germplasm resources research present situation[J]. China Fruits，2023(11)：1-7.

[2] 帅希祥 . 澳洲坚果油组成、营养及其油凝胶体系构建和应用[D]. 南昌：南昌大学，2023.
SHUAI Xixiang. Composition and nutrition of macadamia oil and construction of oleogel system and its application[D]. Nanchang：Nanchang University，2023.

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

[4] 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 . 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.
FU Jiarong，WEI Yuanmiao，XU Wenting，MA Shangxuan，HU Xiaojing，WANG Yuwen，HUANG Kechang，GUO Gangjun，HE Xiyong. Effects of different storage methods on fresh macadamia nut quality[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(5)：285-295.

[5] 张丞，张弘，苏建荣，涂行浩，徐涓，李颖，刘兰香，唐晓宁，马金菊 . 五倍子单宁对澳洲坚果鲜食果仁的保鲜效果[J]. 食品科学，2025，46(14)：311-320.
ZHANG Cheng，ZHANG Hong，SU Jianrong，TU Xinghao，XU Juan，LI Ying，LIU Lanxiang，TANG Xiaoning，MA Jinju. Preservation effect of gallnut tannin on fresh macadamia nuts[J]. Food Science，2025，46(14)：311-320.

[6] 郭刚军，黄克昌，马尚玄，付镓榕，贺熙勇 . 一种鲜食澳洲坚果及其加工方法和贮藏方法：CN202210610881.3[P]. 2024-02-02.
GUO Gangjun，HUANG Kechang，MA Shangxuan，FU Jiarong，HE Xiyong. A fresh-eating macadamia nut and its processing and storage methods：CN202210610881.3[P]. 2024-02-02.

[7] 王文林，宋海云，张涛，贺鹏，郑树芳，谭秋锦，覃振师，韦哲君，陈海生，黄锡云，汤秀华，许鹏，韦媛荣，何铣扬，莫庆道，钟建章，周春衡 . 一种澳洲坚果保鲜贮藏的方法：CN202111159228.1[P]. 2022-02-01.
WANG Wenlin，SONG Haiyun，ZHANG Tao，HE Peng，ZHENG Shufang，TAN Qiujin，QIN Zhenshi，WEI Zhejun，CHEN Haisheng，HUANG Xiyun，TANG Xiuhua，XU Peng，WEI Yuanrong，HE Xianyang，MO Qingdao，ZHONG Jianzhang，ZHOU Chunheng. A method for preserving and storing macadamia nuts：CN202111159228.1[P]. 2022-02-01.

[8] 付镓榕，马尚玄，杨悦雪，徐文婷，兰秀华，魏元苗，黄克昌，贺熙勇，郭刚军 . 不同温湿度贮藏对澳洲坚果鲜果品质的影响及BP神经网络预测模型构建[J]. 食品工业科技，2025，46(13)：314-326.
FU Jiarong，MA Shangxuan，YANG Yuexue，XU Wenting，LAN Xiuhua，WEI Yuanmiao，HUANG Kechang，HE Xiyong，GUO Gangjun. Effect of different temperature and humidity storage conditions on the quality of fresh macadamia nuts and the construction of a backpropagation neural network prediction model[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(13)：314-326.

[9] 张权 . 不同贮藏温度对漾濞鲜核桃仁品质及末期风味劣变影响的研究[D]. 昆明：云南农业大学，2023.
ZHANG Quan. Study on the effects of different storage temperatures on the quality and flavor deterioration of Yangbi fresh walnut kernels[D]. Kunming：Yunnan Agricultural University，2023.

[10] 国家卫生和计划生育委员会，国家食品药品监督管理总局 . 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定：GB 5009.6—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China，State Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of fat in food：GB 5009.6—2016[S]. Beijing：Standards Press of China，2017.

[11] ZHANG W H，MCCLEMENTS D J，CHEN J，DENG L Z，CUI Y Y，GENG Q，LI T，LIU C M，DAI T T. Improvement of rice protein functionality by electro-activation technology：Modulation of molecular and physicochemical properties[J]. Food Hydrocolloids，2025，159：110607.

[12] SAENGNIL K，CHUMYAM A，FAIYUE B，UTHAIBUTRA J.

Use of chlorine dioxide fumigation to alleviate enzymatic browning of harvested ‘Daw’ longan pericarp during storage under ambient conditions[J]. Postharvest Biology and Technology，2014，91：49-56.

[13] 杨旭凤，贾晓东，许梦洋，莫正海，贾展慧，宣继萍 . 褐变机理及其防治技术研究进展[J]. 中国农学通报，2023，39(13)：137-145.
YANG Xufeng，JIA Xiaodong，XU Mengyang，MO Zhenghai，JIA Zhanhui，XUAN Jiping. Browning mechanism and its control technology：Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2023，39(13)：137-145.

[14] 王朝叶 . 冻藏条件对鲜核桃抗氧化性及品质的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2019.
WANG Chaoye. Effects of different frozen conditions on oxidation resistance and quality of fresh walnuts[D]. Yangling：Northwest A & F University，2019.

[15] ZHENG Y H，WANG Y S，LU Y X，HU Y S，LI J. A high-performance sodium-ion battery enhanced by macadamia shell derived hard carbon anode[J]. Nano Energy，2017，39：489-498.

[16] WALTON D A，RANDALL B W，LE LAGADEC M D，WALLACE H M. 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.

[17] MARTIN L B B，ROSE J K C. There’s more than one way to skin a fruit：Formation and functions of fruit cuticles[J]. Journal of Experimental Botany，2014，65(16)：4639-4651.

[18] ROSSI F，MANFRINI L，VENTURI M，GRAPPADELLI L C，MORANDI B. Fruit transpiration drives interspecific variability in fruit growth strategies[J]. Horticulture Research，2022，9：uhac036.

[19] 罗树楠，曾春银，李雯雯，张文文，姚登杰，宁德鲁，庄永亮，曾培忠，李莉蓉 . 不同处理对冻藏去青皮鲜核桃及鲜核桃仁贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(20)：262-270.
LUO Shunan，ZENG Chunyin，LI Wenwen，ZHANG Wenwen，YAO Dengjie，NING Delu，ZHUANG Yongliang，ZENG Peizhong，LI Lirong. Effects of different treatments on storage quality of fresh green walnuts and walnut kernels in frozen[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(20)：262-270.

[20] SHAN Y X，ZHANG S T，LI Y，ZHANG J，FARAG M A，HE J X，XIAO J B，QU H X，DUAN X W，JIANG Y M. The roles of exogenous ATP in postharvest fruit and vegetable：A systematic meta-analysis[J]. Postharvest Biology and Technology，2023，199：112305.

[21] LI M L，ZHENG Q P，LIN H T，LIN M S，CHEN Y H，LIN Y F，FAN Z Q，WANG H. The influence of ATP treatment on energy dissipation system in postharvest Longan fruit during senescence[J]. Postharvest Biology and Technology，2020，164：111154.

[22] 刘欣淼，孙闽子，汪莹，赵佳佳，陈发河，陈东晓，何凡，张珅，林艺芬 . 硫化氢调控呼吸代谢和能量状态延缓采后莲雾果实絮状绵软劣变[J]. 食品工业科技，2025，46(18)：357-367.
LIU Xinmiao，SUN Minzi，WANG Ying，ZHAO Jiajia，CHEN Fahe，CHEN Dongxiao，HE Fan，ZHANG Shen，LIN Yifen. Hydrogen sulfide delays cottony softening of postharvest wax apple fruit via regulating respiration metabolism and energy status[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(18)：357-367.

[23] CHEN M Y，LIN H T，ZHANG S，LIN Y F，CHEN Y H，LIN Y X. Effects of adenosine triphosphate (ATP) treatment on postharvest physiology，quality and storage behavior of longan fruit[J]. Food and Bioprocess Technology，2015，8(5)：971-982.

[24] WANG T，HU M J，YUAN D B，YUN Z，GAO Z Y，SU Z H，ZHANG Z K. Melatonin alleviates pericarp browning in litchi fruit by regulating membrane lipid and energy metabolisms[J]. Postharvest Biology and Technology，2020，160：111066.

[25] CHENG S C，WEI B D，ZHOU Q，TAN D H，JI S J. 1-Methylcyclopropene alleviates chilling injury by regulating energy metabolism and fatty acid content in ‘Nanguo’ pears[J]. Postharvest Biology and Technology，2015，109：130-136.

[26] 马艳萍，马惠玲，刘兴华，李顺峰 . 鲜食核桃和干核桃贮藏生理及营养品质变化比较[J]. 食品与发酵工业，2011，37(3)：235-238.
MA Yanping，MA Huiling，LIU Xinghua，LI Shunfeng. Comparison of physiology and nutrition in dry and fresh walnut during the storage[J]. Food and Fermentation Industries，2011，37(3)：235-238.

[27] ZHANG Y，GONG Y，CHEN L，PENG Y，WANG Q G，SHI J Y. Hypotaurine delays senescence of peach fruit by regulating reactive oxygen species metabolism[J]. Scientia Horticulturae，2019，253：295-302.

[28] BORGSTAHL G E O，OBERLEY-DEEGAN R E. Superoxide dismutases (SODs) and SOD mimetics[J]. Antioxidants，2018，7(11)：156.

[29] NUKUNTORNPRAKIT O A，CHANJIRAKUL K，VAN DOORN W G，SIRIPHANICH J. Chilling injury in pineapple fruit：Fatty acid composition and antioxidant metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology，2015，99：20-26.

[30] 王馨，胡文忠，陈晨，李鹤，冯可 . 活性氧在果蔬采后成熟衰老过程中的作用及几种气体处理对其影响的研究进展[J]. 食品工业科技，2017，38(5)：375-379.
WANG Xin，HU Wenzhong，CHEN Chen，LI He，FENG Ke. The role of reactive oxygen in harvested fruits and vegetables during maturation and senescence and the influences which handled by several gas treatments[J]. Science and Technology of Food Industry，2017，38(5)：375-379.

[31] ZHANG Z，XU J，CHEN Y，WEI J，WU B. Nitric oxide treatment maintains postharvest quality of table grapes by mitigation of oxidative damage[J]. Postharvest Biology and Technology，2019，152：9-18.

[32] BAKER A，LIN C C，LETT C，KARPINSKA B，WRIGHT M H，FOYER C H. Catalase：A critical node in the regulation of cell fate[J]. Free Radical Biology and Medicine，2023，199：56-66.

[33] 郭园园，鲁晓翔，李江阔，张鹏 . 不同贮藏温度对青皮核桃保鲜的影响[J]. 食品工业科技，2013，34(16)：308-312.
GUO Yuanyuan，LU Xiaoxiang，LI Jiangkuo，ZHANG Peng. Effect of different storage temperature on the freshness retaining of green juglans[J]. Science and Technology of Food Industry，2013，34(16)：308-312.

[34] SHARMA P，JHA A B，DUBEY R S，PESSARAKLI M. Reactive oxygen species，oxidative damage，and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions[J]. Journal of Botany，2012，2012(1)：217037.

[35] LO'AY A A，ELGAMMAL R E，ALHAITHLOUL H A S，ALGHANEM S M，FIKRY M，ABDEIN M A，HIKAL D M. Enhance fruit ripening uniformity and accelerate the rutab stage by using ATP in 'Zaghloul' dates during the shelf life[J]. Foods，2021，10(11)：2641.

[36] 陈熙，苏宇萌，郭家如，赵迎丽，杨志国，杜培兵，白小东，王亮 . 基于能量代谢探究不同温度下马铃薯贮藏品质变化规律[J]. 食品与发酵工业，2024，50(6)：159-168.
CHEN Xi，SU Yumeng，GUO Jiaru，ZHAO Yingli，YANG Zhiguo，DU Peibing，BAI Xiaodong，WANG Liang. Investigation of changing trend of potato storage quality at different temperatures based on energy metabolism[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(6)：159-168.

[37] 任丽花，潘葳，韦航，方灵，刘文静，傅建炜 . 贮藏温度对百香果果皮性状及其活性氧代谢的影响[J]. 食品安全质量检测学报，2024，15(17)：246-254.
REN Lihua，PAN Wei，WEI Hang，FANG Ling，LIU Wenjing，FU Jianwei. Effects of storage temperature on the characters and reactive oxygen metabolism of peel of *Passiflora edulis* Sims[J]. Journal of Food Safety & Quality，2024，15(17)：246-254.

[38] 王晓慧，李培培，杜荣，侯旭杰，李婕，谢兵 . 温度对采后阿克苏"红富士"苹果贮藏品质和活性氧代谢的影响[J]. 北方园艺，2025(9)：79-87.
WANG Xiaohui，LI Peipei，DU Rong，HOU Xujie，LI Jie，XIE Bing. Effects of temperature on quality and active oxygen metabolism of Aksu 'Red Fuji' apple after harvest[J]. Northern Horticulture，2025(9)：79-87.

[39] 田玉肖，蔡鹏，唐月明，罗芳耀，房超，高佳 . 贮藏温度对厚皮网纹甜瓜"川蜜脆玉"品质的影响[J]. 保鲜与加工，2022，22(9)：7-13.
TIAN Yuxiao，CAI Peng，TANG Yueming，LUO Fangyao，FANG Chao，GAO Jia. Effects of different storage temperatures on the quality of *Cucumis melo* var. *reticulatus* Chuanmicuiyu [J]. Storage and Process，2022，22(9)：7-13.