冰温贮藏对新疆吊干杏保鲜效果的影响

白国荣[1]，郭敏瑞[1]，卢 娣[2]，陈国刚[1,*]，南立军[3,*]
（1.石河子大学食品学院，新疆 石河子 832000；2.新疆维吾尔自治区阿克苏地区疾病预防控制中心，新疆 阿克苏 843000；
3.楚雄师范学院化学与生命科学学院，云南 楚雄 675000）

摘 要：为了研究冰温贮藏对吊干杏果实的保鲜效果，以新疆吊干杏为试材，探究冰温、0～1 ℃、15 ℃贮藏对吊干杏果实采后生理和贮藏品质的影响。结果表明：吊干杏果实冰点为－3.1 ℃，确定果实冰温区间为－1.5～－2.0 ℃。与0～1 ℃和15 ℃贮藏相比，冰温贮藏能够有效降低吊干杏果实腐烂率，抑制吊干杏的呼吸强度和果实细胞膜透性的增加，减少丙二醛的积累；有效提高果实的过氧化物酶活力，抑制多酚氧化酶活力；较好地维持果实的硬度、可溶性固形物和可滴定酸质量分数、VC含量，能够使吊干杏贮藏70 d后仍保持较好的品质。因此，冰温贮藏是提高吊干杏果实保鲜效果和贮藏品质的有效方法。

关键词：冰温贮藏；保鲜效果；吊干杏；贮藏品质

Improved Postharvest Quality of Apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan) during Storage at Near-Freezing Temperature

BAI Guorong[1], GUO Minrui[1], LU Di[2], CHEN Guogang[1,*], NAN Lijun[3,*]
(1. Food College, Shihezi University, Shihezi 832000, China;
2. Center for Disease Control and Prevention of Xinjiang Uygur Autonomous Region Aksu Prefecture, Aksu 843000, China;
3. School of Chemistry and Life Sciences, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, China)

Abstract: The purpose of this work was to investigate the effects of near freezing temperature storage versus storage at 0–1 ℃ and 15 ℃ on the postharvest physiology and storage quality of Xinjiang-grown Diaogan apricot fruit. The results showed that the freezing point of Diaogan apricots was determined to be −3.1 ℃. Compared with two other storage temperatures, storage at near-freezing temperature (−1.5 to −2.0 ℃) could effectively inhibit respiration rate and reduce decay incidence in apricots by suppressing membrane permeability and the accumulation of malondialdehyde (MDA). In addition, near-freezing temperature storage could increase the activity of peroxidase (POD) and inhibit the activity of polyphenol oxidase (PPO) as well as maintain higher fruit firmness and higher contents of soluble solids, titratable acid and VC. The quality of Diaogan apricots was still good after 70 days of storage at near-freezing temperature. Overall, near-freezing temperature storage could be an appropriate method to maintain the quality of Diaogan apricots.

Keywords: near-freezing temperature storage; preservation effect; Diaogan apricot; storage quality
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180619-370
中图分类号：TS255.36 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2019）13-0260-07
引文格式：
白国荣, 郭敏瑞, 卢娣, 等. 冰温贮藏对新疆吊干杏保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 260-266. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180619-370. http://www.spkx.net.cn
BAI Guorong, GUO Minrui, LU Di, et al. Improved postharvest quality of apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan) during storage at near-freezing temperature[J]. Food Science, 2019, 40(13): 260-266. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180619-370. http://www.spkx.net.cn
收稿日期：2018-06-19
基金项目：兵团中青年科技创新领军人才计划项目（2018CB024）

第一作者简介：白国荣（1995—）（ORCID: 0000-0002-8830-5057），男，硕士研究生，研究方向为果蔬贮藏与加工。
E-mail: 342990949@qq.com
*通信作者简介：陈国刚（1977—）（ORCID: 0000-0002-3223-4034），男，教授，博士，研究方向为果蔬贮藏与加工。
E-mail: cgg611@163.com
南立军（1973—）（ORCID: 0000-0002-5562-8589），男，副教授，博士，研究方向为葡萄与葡萄酒学。
E-mail: nlj731210@126.com

吊干杏，又称“树上干”杏，是新疆伊犁及阿克苏地区的主栽杏品种。吊干杏风味甘甜、杏核极薄、轻嗑即食。因其熟后不落，受干燥季风的吹拂，在树上风干而得名[1]。吊干杏属于典型的呼吸跃变型水果，其采收时间集中，采后果实迅速进入呼吸高峰，如贮藏保鲜处理不当，会在短期内出现果实软化及腐败变质现象[2]，极大影响了杏果实的商品价值。

冰温贮藏是继冷藏、气调贮藏之后的第3代贮藏保鲜技术，能够长期有效地保持果蔬的固有风味和新鲜度。该技术的关键是将果蔬贮藏在其冰点以上、0 ℃以下温度范围内，在不破坏果实组织细胞的基础上，有效抑制果实呼吸作用、减少水分蒸发、降低新陈代谢率，从而较好地保持果实新鲜度，延长其贮藏期[3-5]。目前，冰温贮藏技术已经在蓝莓[6]、冬枣[7]、水蜜桃[8]、荔枝[9]、葡萄[10]等水果方面进行了研究，并取得了不错的保鲜效果。

在果实采后贮藏过程中，微生物侵染和细胞膜损伤是导致杏果实衰老和腐坏的重要原因。研究表明，过氧化物酶（peroxidase，POD）和多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO）可以通过影响微生物侵染来延缓杏果实的衰老和腐坏[11]。POD和PPO能够促进杏果实内木质素的合成，形成抵御病原菌侵入的物理屏障；同时，PPO可以利用O_2催化酚类物质形成醌类物质，也会对病原菌起到较强的毒害作用[12]。活性氧自由基会引起植物细胞膜脂过氧化作用，其中H_2O_2对植物细胞具有很强的毒害作用，其含量可以影响活性氧在体内的代谢，而POD可以通过控制H_2O_2的含量来抑制其对细胞膜的毒害和损伤[13]。然而，目前在吊干杏的冰温贮藏技术中，针对这两种酶的相关研究还存在明显不足。

本实验以新鲜吊干杏为试材，研究了冰温贮藏、低温贮藏以及常温贮藏对吊干杏果实贮藏过程中生理和品质指标的变化。通过直接比较这3 种贮藏条件下果实各项指标参数，研究冰温贮藏吊干杏的可行性，以期为吊干杏的冰温贮藏保鲜技术提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

保鲜吊干杏原料产自新疆农一师四团果园，于2017年6月18日进行采收，采收的果实要求为八成熟、可溶性固形物质量分数约23.5%。挑选无病虫害、无机械损伤、大小均匀的杏，立即运回新疆石河子大学食品学院果蔬保鲜中心。

三氯乙酸、硫代巴比妥酸、乙醇、氢氧化钠、碳酸氢钠、邻苯二甲酸氢钾、冰醋酸、聚乙二醇、愈创木酚等均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

GY-2果实硬度计 浙江乐清市爱德堡仪器有限公司；阿贝折光仪、UV-759紫外分光光度计 上海精密科学仪器有限公司；SL2002N电子天平 上海民桥精密科学仪器有限公司；DDD-303A电导率仪 上海雷磁公司；DK-8D水浴锅 江苏金坛仪器有限公司；SH21-1磁力搅拌器 上海梅颖浦仪器制造有限公司；UB-7精密pH酸度计 美国赛多利斯丹佛公司；X3R高速冷冻离心机 美国赛默飞世尔公司。

1.3 方法

1.3.1 果实的预处理

挑选后的杏果实在温度为（4±1）℃、相对湿度约90%的贮藏条件下充分预冷24 h，以散去田间热。样品分成3 组，每组6 筐，每筐5 kg，首先将样品放入聚乙烯袋（5 kg/袋）中，然后置于塑料筐内，分别进行冰温贮藏（－1.5～－2.0 ℃，保鲜库）、普通冷藏（0～1 ℃，普通冷库）、常温15 ℃（冷藏室准备间），每次处理设置3 个重复组，贮藏期间每隔10 d取样测量各指标，至杏果实的腐烂率超过50%后终止实验。

1.3.2 吊干杏果实冰点的测定

采用冻结法对吊干杏果实冰点温度进行测量[14-15]。随机选取10 个成熟度一致、大小均匀的果实，将接有温度传感器的整果放置于恒温－18 ℃冰箱中，当温度下降至2 ℃时，开始记录温度读数，每隔20 s记录1 次。果实中心温度随时间的延长不断下降，当果实中心温度降至过冷点后温度突然上升并长时间保持在恒定温度，此时的温度就是杏果实的冰点。实验每组设3 个重复，取平均值，据此作出吊干杏果实的冰点曲线图，并确定果实的冰点。

1.3.3 腐烂率的测定

腐烂率的测定采用唐怡等[16]的方法，每组分别选取100 枚果实，定期观察。果实出现菌斑、发霉、流水等均视为果实腐烂，腐烂率按照公式（1）进行计算。

$$果实腐烂率/\%=\frac{果实腐烂个数}{果实总个数}\times 100 \quad (1)$$

1.3.4 硬度、可溶性固形物质量分数、呼吸强度的测定

硬度测量采用GY-2果实硬度计；可溶性固形物（total souble solids，TSS）质量分数测定采用阿贝折光仪；呼吸强度的测定采用曹建康等[17]的方法，以每千克果实每小时产生的CO_2质量表示呼吸强度，单位为mg/（kg·h）。

1.3.5 可滴定酸质量分数、VC含量的测定

可滴定酸（titratable acidity，TA）质量分数的测定参考GB/T 12456—2008《食品中总酸的测定方法》的酸碱滴定法；VC含量的测定采用2,6-二氯酚靛酚滴定法。

1.3.6 丙二醛含量和细胞膜透性的测定

丙二醛（malonaldehyde，MDA）含量的测定采用硫代巴比妥酸显色法[18]。称取样品1.0 g，加入10 mL、质量分数10%三氯乙酸溶液，研磨，6 000 r/min离心8 min；取5 mL上清液，加入5 mL质量分数0.6%的硫代巴比妥酸溶液，混匀后沸水浴15 min，冷却后再离心，取上清液，分别测定450、532、600 nm波长处的吸光度。MDA含量按式（2）进行计算。

$$\text{MDA含量/（nmol/g）}=\frac{[6.45\times(A_{532\,nm}-A_{600\,nm})-0.56\times A_{450\,nm}]\times V}{V_s\times m\times 1\,000} \quad (2)$$

式中：V为提取液的总体积/mL；V_s为测定所用提取液体积/mL；m为样品质量/g。

果蔬组织细胞膜受损伤会引起电导率增加，故一般以相对电导率表示细胞膜透性，电导率采用电导率仪进行测定[19]。将洗净的杏果实用打孔器在果肉上采集圆柱状果肉，切成厚度为1 mm的组织圆片，称取150 g放入装有25 mL蒸馏水的烧杯中，置于真空干燥器中，密闭抽气30 min，取出后倒掉浸泡液，用滤纸吸干周围的水分，将组织圆片放入100 mL三角瓶中，加入25 mL蒸馏水，盖塞后在振荡器上振荡30 min，于25 ℃下测定提取液电导率（C_1/（μS/cm））；然后在水浴锅中加热煮沸10 min，待冷却至25 ℃后，再次测定提取液电导率（C_0/（μS/cm））。相对电导率按式（3）进行计算。

$$\text{相对电导率/\%}=\frac{C_1}{C_0}\times 100 \quad (3)$$

1.3.7 POD、PPO活力的测定

POD活力采用愈创木酚法[20]测定。酶液的提取：取3.0 g吊干杏果肉，加入10 mL 50 mmol/L pH 5.5的磷酸缓冲液充分研磨成匀浆，6 000 r/min冷冻（4 ℃）离心10 min，取上清液备用。酶活力的测定：在试管中加入1.0 mL 0.05 mol/L的愈创木酚溶液和0.1 mL酶提取液，再加入1 mL质量分数2% H_2O_2溶液迅速混合启动反应，同时开始计时。将反应混合液倒入比色杯中，以蒸馏水为参比，在反应30 s时测其在470 nm波长处的吸光度，并每间隔1 min记录1 次，共记录5 次。将1 g果实每分钟在470 nm波长处的吸光度变化0.01定义为1 个PPO活力单位（U）。实验重复3 次，取平均值。

PPO活力的测定采用曹建康等[17]的方法。酶液的提取：称取3 g果肉，加入质量分数4%的聚乙烯吡咯烷酮、5 mL 0.1 mol/L pH 7.5的磷酸缓冲液，冰浴条件下充分研磨，4 ℃、10 000 r/min离心20 min，取上清液用于酶活力测定。酶活力的测定：在试管中加入2 mL 0.1 mol/L pH 7.5的磷酸缓冲液、1 mL 0.1 mol/L邻苯二酚、0.1 mL酶提取液，以缓冲液为参比，同时开始计时。在反应30 s时测其在420 nm波长处的吸光度，并每间隔1 min记录1 次，共记录5 次。定义1 g果实每分钟在420 nm波长处的吸光度变化0.01为1 个PPO活力单位（U），单位为U/g。实验重复3 次，取平均值。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 18.0软件处理数据，并利用t检验进行差异显著性分析，$P<0.05$表示差异显著；采用Origin 8.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 吊干杏果实的冰点分析结果

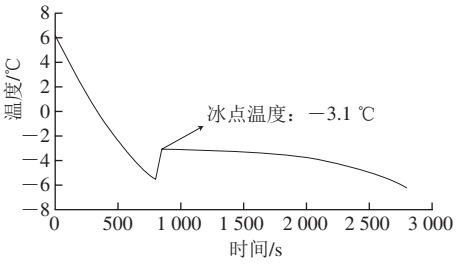
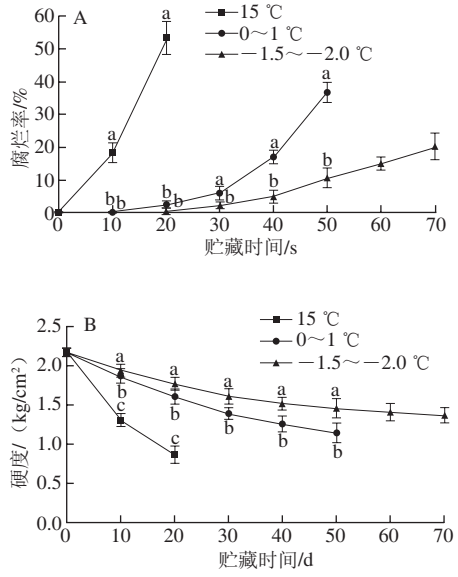


图1 吊干杏冰点曲线

Fig. 1 Freezing point curve of Diaogan apricot fruit

冰点是果蔬进行冰温实验的关键参数，由图1可知，随着时间的延长，吊干杏的温度先快速下降，之后出现过冷现象，随后温度回升至−3.1 ℃，并维持一段时间，此温度即吊干杏的冰点温度[21]。为防止长时间低温贮藏导致杏果实纤维化并出现冷害[14]，故在本实验吊干杏的冰温贮藏实验中，将温度严格控制在−1.5～−2.0 ℃。

2.2 贮藏温度对吊干杏贮藏过程中腐烂率、硬度的影响



同一贮藏时间、不同贮藏温度字母不同表示差异显著（$P<0.05$）。下同。

图2 贮藏温度对吊干杏贮藏期间腐烂率（A）和硬度（B）的影响

Fig. 2 Effects of different storage temperatures on decay incidence (A) and hardness (B) of Diaogan apricot fruit

从图2A可以看出，15 ℃贮藏的吊干杏在20 d内腐烂率迅速上升至53.3%，且因果实无法达到保鲜要求而失去实验价值；0～1 ℃贮藏的吊干杏第20天开始出现腐烂果实，40 d后腐烂率迅速上升；而冰温贮藏的吊干杏30 d后才开始腐烂，贮藏70 d时腐烂率为20.3%，仍低于在0～1 ℃下贮藏50 d的腐烂率，这可能是由于温度较高时，吊干杏的代谢相对旺盛，且腐烂真菌的生长速度更快。因此，冰温贮藏能显著降低吊干杏的腐烂率（$P<0.05$）。

果实硬度是衡量杏果实成熟度和贮藏品质的重要指标。由图2B可知，随着贮藏时间的延长，吊干杏的硬度整体呈下降趋势，且冰温贮藏组杏果实的硬度显著高于0～1 ℃和15 ℃的杏果实（$P<0.05$）。这是由于果胶酶会不断水解果实中的果胶物质，而低温能显著抑制果胶酶的活力[22]。在冰温下贮藏70 d时，吊干杏的硬度为1.4 kg/cm^2，仍高于在0～1 ℃下贮藏50 d的硬度，这可能是由于多聚半乳糖醛酸酶能促进果实内可溶性果胶含量的上升，从而加快果实的软化，而低温对于多聚半乳糖醛酸酶活力具有良好的抑制作用。结果表明，冰温贮藏可较好地保持杏果实的硬度，减缓果实软化。

2.3 贮藏温度对吊干杏贮藏过程中TSS质量分数和呼吸强度的影响

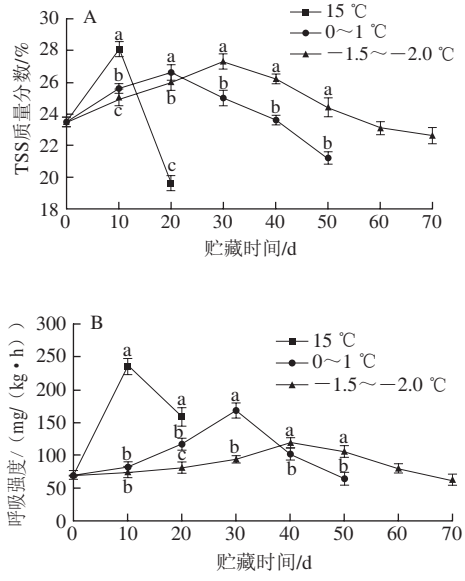


图3 贮藏温度对吊干杏贮藏期间TSS质量分数（A）和呼吸强度（B）的影响

Fig. 3 Effects of different storage temperatures on soluble solids content (A) and respiration rate (B) of Diaogan apricot fruit

TSS质量分数是衡量杏果实品质和耐贮藏性的一个重要指标，它的高低影响果实的冰点及贮藏、运输过程的抗冻性[23-24]。由图3A可知，在贮藏过程中，不同贮藏条件下吊干杏TSS质量分数变化规律相似，均在贮藏前期不断增加，在贮藏后期逐步下降。在贮藏30 d后，冰温贮藏组的TSS质量分数显著高于0～1 ℃贮藏组的TSS质量分数（$P<0.05$）。贮藏结束时，冰温贮藏组（70 d）、0～1 ℃贮藏组（50 d）、15 ℃贮藏组（20 d）的TSS质量分数分别为22.6%、21.2%、19.6%。冰温贮藏组的TSS质量分数峰值在第30天出现，比0～1 ℃贮藏组推迟了10 d，这可能是由于冰温贮藏对果实呼吸跃变作用产生了抑制。因此，冰温贮藏能维持吊干杏贮藏过程中的TSS质量分数。

果蔬的呼吸代谢与多种营养物质的分解代谢过程密切相关，呼吸强度是反映果实食用品质和贮藏特性的关键指标[25]。在保证果蔬基本代谢的前提下，尽可能抑制其呼吸作用是果蔬保鲜的基本原理。由图3B可知，在贮藏期间，不同贮藏温度下的吊干杏均出现了呼吸高峰，但呼吸高峰的峰值出现时间不同，冰温贮藏组的呼吸强度峰值在第40天出现，比0～1 ℃和15 ℃贮藏组分别推迟了10、30 d，并且冰温贮藏组的呼吸强度峰值低于15 ℃和0～1 ℃贮藏组。果蔬的呼吸作用是通过一系列酶参与的生化反应来实现的，冰温贮藏能通过抑制相关酶的活力从而影响杏果实呼吸强度[26]。结果表明，冰温贮藏能显著抑制吊干杏在贮藏期间呼吸强度的升高（$P<0.05$），从而起到较好的采后保鲜作用。

2.4 贮藏温度对吊干杏贮藏过程中TA质量分数和VC含量的影响

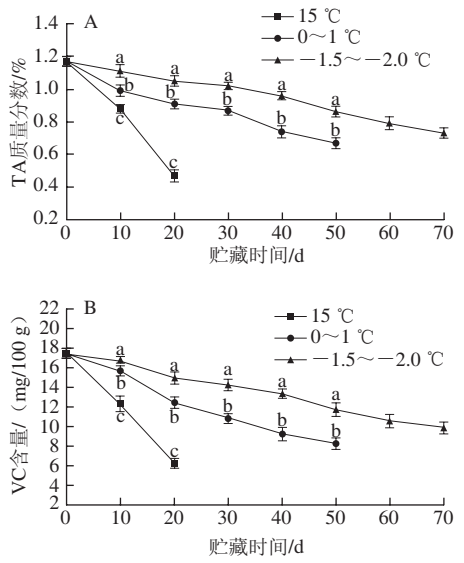


图4 贮藏温度对吊干杏贮藏期间TA质量分数（A）和VC含量（B）的影响

Fig. 4 Effects of different storage temperatures on titratable acid (A) and ascorbic acid (B) contents of Diaogan apricot fruit

果蔬中含有多种有机酸，它们会对果蔬的风味、pH值、耐贮藏性等产生影响[27]。TA会随着细胞呼吸和果实衰老而被分解，所以其质量分数是衡量果蔬新鲜度的重

要指标。由图4A可知，在贮藏期间，不同贮藏条件下吊干杏的TA质量分数均呈下降的趋势。在贮藏末期，冰温贮藏组（70 d）果实TA质量分数（0.72%）仍高于0～1 ℃贮藏组（50 d）和15 ℃贮藏组（20 d）。这说明冰温贮藏能够抑制吊干杏贮藏过程中TA质量分数的下降。

VC是果蔬中重要的营养物质，其含量是衡量果蔬贮藏保鲜效果的重要指标之一。由图4B可知，吊干杏中VC的含量随着贮藏时间的延长而不断下降，且15 ℃贮藏组和0～1 ℃贮藏组VC含量显著低于冰温贮藏组（$P<0.05$），这可能是由于冰温贮藏能降低杏果实的呼吸速率和酶的反应速率，从而减缓了VC的氧化分解[28]。结果表明，冰温贮藏能显著延缓贮藏期内吊干杏VC含量的下降（$P<0.05$）。

2.5 贮藏温度对吊干杏贮藏过程中MDA含量和细胞膜透性的影响

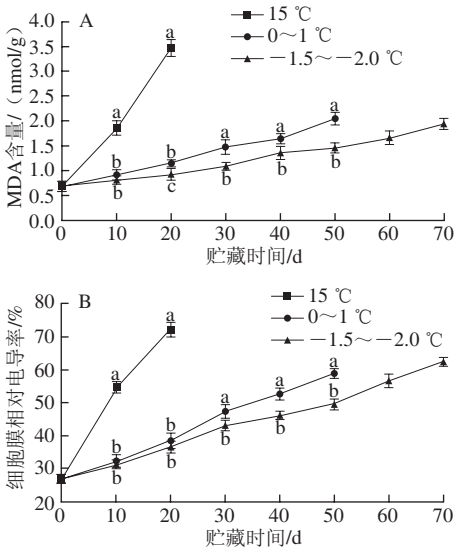


图5 贮藏温度对吊干杏贮藏期间MDA含量（A）和细胞膜相对电导率（B）的影响

Fig. 5 Effects of different storage temperatures on MDA content (A) and membrane permeability (B) of Diaogan apricot fruit

MDA是果蔬细胞膜脂质过氧化作用的主要产物，其含量能反映细胞膜脂质过氧化的程度，MDA的累积会对果蔬细胞膜产生一定损伤[29]。由图5A可知，随着吊干杏贮藏时间的延长，其果实中的MDA不断积累；与其他贮藏组相比，冰温贮藏的吊干杏在相同贮藏时间下的MDA含量最低，且贮藏结束时仍低于0～1 ℃和15 ℃组贮藏结束时的水平，这可能是由于冰温贮藏能降低杏果实的呼吸速率，从而抑制了膜脂质的氧化，延长了保鲜时间。结果表明，冰温贮藏能有效抑制吊干杏贮藏过程中MDA的积累。

细胞膜对于维持果蔬细胞的正常代谢和稳定微环境有重要作用。细胞膜透性能反映细胞膜损伤和果蔬组织衰老的程度，细胞膜透性越高，细胞膜功能活性越低。由图5B可知，随着贮藏时间的延长，吊干杏细胞膜透性不断增高。贮藏结束时，15 ℃贮藏组、0～1 ℃贮藏组和冰温贮藏组细胞膜相对电导率分别为72.2%、58.9%和62.4%。冰温贮藏组电导率在相同贮藏时间始终低于15 ℃贮藏组、0～1 ℃贮藏组，这可能是15 ℃和0～1 ℃贮藏组果肉细胞电解质大量外渗，导致膜透性增加，而冰温贮藏可以通过降低水分活度来减少电解质大量外渗[30]。结果表明，冰温贮藏能有效延缓吊干杏果实细胞膜透性的增加。

2.6 贮藏温度对吊干杏贮藏过程中POD活力和PPO活力的影响

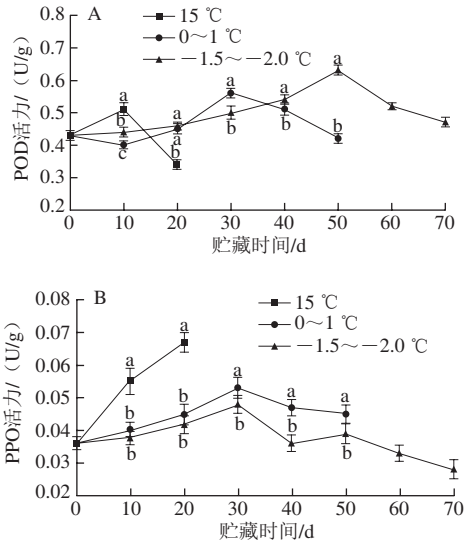


图6 贮藏温度对吊干杏贮藏期间POD（A）和PPO（B）活力的影响

Fig. 6 Effects of different storage temperatures on POD activity (A) and PPO activity (B) of Diaogan apricot fruit

POD对清除果实内的H_2O_2起到重要作用，它能够维持活性氧的代谢平衡，延缓果实衰老[27]。由图6A可知，贮藏温度对吊干杏果实中POD活力的影响较大。随着贮藏时间的延长，不同贮藏温度下的吊干杏果实POD的活力均呈先上升后下降的趋势，但峰值出现时间不同。冰温贮藏组的POD活力峰值在第50天出现，比0～1 ℃和15 ℃贮藏组分别推迟了20、40 d，并且冰温贮藏组的POD峰值高于15 ℃和0～1 ℃贮藏组。这说明冰温贮藏能提高吊干杏贮藏过程中的POD活力。

PPO活力与果实组织衰老密切相关，是衡量果实衰老的重要指标[31]。由图6B可知，随着贮藏时间的延长，0～1 ℃贮藏和冰温贮藏下吊干杏的PPO活力均呈先上升后下降的趋势；且相同贮藏时间，冰温贮藏下PPO活力始终低于15 ℃和0～1℃贮藏组的活力。贮藏结束时，冰温贮藏组（70 d）的PPO活力仍显著低于15 ℃（20 d）和0～1 ℃（50 d）贮藏组（$P<0.05$）。

这说明冰温贮藏能有效抑制吊干杏的PPO活力，从而达到更好的贮藏效果。

3 讨 论

冰温贮藏使果蔬采后仍能继续新陈代谢，且能最大程度抑制其呼吸速率和真菌生长，从而延长贮藏期。唐坚等[32]研究发现冰温贮藏比传统低温贮藏能更好地保持生菜的贮藏品质，降低生菜呼吸速率、质量损失率，延缓MDA积累速度，抑制生菜自身代谢，这与本研究的结果一致。冰温贮藏能够明显减少吊干杏中营养物质的流失，减缓细胞膜透性的增加和MDA的累积，减轻细胞膜脂质过氧化损害。果实的腐烂率、硬度、TSS质量分数、TA质量分数、VC含量是衡量果蔬理化品质的代表性指标[33]。本研究结果表明，相比0～1 ℃和15 ℃贮藏，冰温贮藏能明显提高吊干杏的保鲜品质，表现为冰温贮藏抑制了腐烂率的增加及硬度、TSS质量分数、VC含量、TA质量分数的降低。

PPO、POD活力是反映果实后熟和衰老的重要指标。PPO被认为是引起果蔬产品采后褐变最重要的酶，其活力影响杏果的品质和贮藏时间[34]。当植物组织受损或者发生微生物感染时，植物组织中PPO活力会明显升高，对植物体起到保护作用[35]。在冰温贮藏条件下，杏的PPO活力在前30 d呈现上升的趋势，这可能是低温胁迫导致。15 ℃贮藏组的PPO活力快速上升可能是果实自身的衰老、组织受损、微生物侵染以及受到逆境胁迫导致。贮藏的第70天，果实自身组织受损严重，同时受到大量微生物的侵染，杏的腐烂率已经达到20%以上，果实硬度较低，此时杏自身的免疫特性已经无法保护果实不受损害，PPO活力为0.028 U/g，处于相对较低的水平[36-37]。POD活力的变化趋势与果实呼吸强度变化趋势一致，可能是由于POD活力与呼吸强度、乙烯的生物合成以及细胞衰老有关[38]。本实验发现，吊干杏果实的PPO与POD活力变化趋势都是先升高后下降，可能是由于PPO与POD活力具有对应关系，两者协同作用引起果实的酶促褐变[15]。

有研究表明，－2 ℃贮藏会导致杏果实出现冷害，并造成果实品质大幅下降，影响贮藏效果[11]。但本实验中，将吊干杏贮藏在－1.5～2.0 ℃下70 d，并没有出现明显的冷害现象。这可能是由于吊干杏的TSS质量分数较高，使果实具有更低的冰点和耐寒性；也可能是本实验对于冰温变化区间设定范围较小，避免了机器的温度波动引起杏发生冷害[39]。

4 结 论

冰温贮藏不仅能够降低吊干杏的果实腐烂率，还能延缓硬度、TSS质量分数、TA质量分数和VC含量的下降，从而保持吊干杏果实良好的采后贮藏品质。同时，冰温贮藏能有效抑制吊干杏的呼吸强度，推迟其峰值的出现；有效延缓了果实中MDA的积累和细胞膜透性的上升；提高了吊干杏贮藏过程中的POD活力，抑制了PPO活力。因此认为，冰温贮藏可有效提高吊干杏果实的采后贮藏品质。

参考文献：

[1] 杨相政, 吕平, 魏雯雯, 等. 1-MCP结合硅窗气调包装对吊干杏贮藏品质的影响[J]. 中国果菜, 2015, 35(10): 1-4. DOI:10.3969/j.issn.1008-1038.2015.10.001.

[2] 杨婷婷, 朱璇, 向玉洁, 等. 采收成熟度对杏果实贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 277-282. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.044.

[3] YAMANE A. Development of controlled freezing-point storage of food[J]. Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi, 1982, 29: 736-743.

[4] 彭丹, 邓洁红, 谭兴和, 等. 冰温技术在果蔬贮藏中的应用研究进展[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(2): 38-43. DOI:10.3969/j.issn.1005-1295.2009.02.013.

[5] 罗海波, 姜丽, 余坚勇, 等. 鲜切果蔬的品质及贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(3): 307-311.

[6] 于继男, 薛璐, 鲁晓翔, 等. 温度驯化对蓝莓冰温贮藏期间生理品质变化的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 265-269. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201422052.

[7] 宋健飞, 刘斌, 吴子健, 等. 冰温及冰温气调贮藏对冬枣品质的影响[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 70-74; 81. DOI:10.3969/j.issn.0253-4339.2016.05.070.

[8] 朱麟, 凌建刚, 尚海涛, 等. 因子分析法综合评价冰温结合1-MCP处理对‘玉露’水蜜桃贮藏品质的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(9): 1164-1172. DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20160041.

[9] 申江, 李超, 王素英, 等. 冰温储藏对荔枝品质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(3): 360-363. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.03.018.

[10] 李志文, 张平, 刘翔, 等. 1-MCP结合冰温贮藏对葡萄采后品质及相关生理代谢的调控[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 300-306.

[11] 吕英忠, 刘刚, 梁志宏, 等. 不同贮藏温度对玉露香梨采后生理和贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2014, 14(5): 14-19. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2014.05.003.

[12] 余晓燕, 毕阳, 李永才, 等. *Trichothecium roseum*蛋白激发子诱导杏果抗黑斑病的作用机理[J]. 食品科学, 2015, 36(4): 254-259. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201404040.

[13] 侯媛媛, 朱璇, 王英, 等. 水杨酸处理对杏果实冷害及活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 195-199. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201504050.

[14] 穆晶晶, 张博, 李书倩, 等. 失水处理对软枣猕猴桃贮藏期间褐变相关因子的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 307-311. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201320064.

[15] 林本芳, 鲁晓翔, 李江阔, 等. 冰温贮藏对西兰花保鲜的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 312-316. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.19.063.

[16] 唐怡, 杨红, 李文婷, 等. 1-MCP对木纳格葡萄的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 301-306. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.05.056.

[17] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 50-53.

[18] ZHANG Z K, ZHU Q G, HU M J, et al. Low-temperature conditioning induces chilling tolerance in stored mango fruit[J]. Food Chemistry, 2017, 219: 76-84. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.09.123.

[19] ZHOU R, LI Y F, YAN L P, et al. Effect of edible coatings on enzymes, cell-membrane integrity, and cell-wall constituents in relation to brittleness and firmness of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) during storage[J]. Food Chemistry, 2010, 124: 569-575. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.06.075.

[20] JAYACHANDRAN L E, CHAKRABORTY S, RAO P S. Inactivation kinetics of the most baro-resistant enzyme in high pressure processed litchi-based mixed fruit beverage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(7): 1135-1147. DOI:10.1007/s11947-016-1702-5.

[21] 尚海涛, 凌建刚, 朱麟, 等. 葡萄冰点测定及冰温贮藏实验的研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 55-60. DOI:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.05.010.

[22] 安瑞丽, 王斌, 魏长庆, 等. 不同贮藏温度对采后伽师瓜果实冷害及品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 196-201. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201809030.

[23] 钟志友, 张敏, 杨乐, 等. 果蔬冰点与其生理生化指标关系的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 76-78. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.02.018.

[24] 王颉, 李里特, 丹阳, 等. 果品蔬菜冰点同可溶性固形物含量关系的研究[J]. 制冷学报, 2005(1): 14-18.

[25] 朱赛赛, 张敏. 温度激化处理对采后果蔬贮藏品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 230-238. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201605041.

[26] 张长峰. 气调包装条件下果蔬呼吸强度模型的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 281-285.

[27] 刘新社, 刘三军. 减压结合低温对杏李贮藏性状的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(3): 521-525. DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.2011.03.028.

[28] GUTIÉRREZ-QUEQUEZANA L, VUORINEN A L, KALLIO H, et al. Improved analysis of anthocyanins and vitamin C in blue-purple potato cultivars[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 217-224. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.09.002.

[29] 潘艳芳, 张继明, 李喜宏, 等. 间歇升温对树上干杏冷藏品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(1): 46-49. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2017.01.012.

[30] 刘芳, 陈年来, 张玉鑫. 低温贮藏甜瓜的离子外渗研究[J]. 食品科学, 2011, 32(10): 271-273.

[31] LIN L, WANG B G, WANG M, et al. Effects of a chitosan-based coating with ascorbic acid on post-harvest quality and core browning of 'Yali' pears (*Pyrus bertschneideri* Rehd.)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88: 877-884. DOI:10.1002/jsfa.3164.

[32] 唐坚, 马丽, 王凯晨, 等. 冰温贮藏对生菜抗氧化能力及贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 255-259. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201522048.

[33] ZHANG Y Z, LI P M, CHENG L L. Developmental changes of carbohydrates, organic acids, amino acids, and phenolic compounds in 'Honeycrisp' apple flesh[J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1013-1018. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.05.053.

[34] 刘路, 张谦, 赵晓梅. 不同处理对赛买提杏贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品工业, 2010, 31(2): 32-34.

[35] 赵鑫. 黑提葡萄采后贮藏过程中品质变化的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016: 28.

[36] 曹森, 马超, 龙晓波, 等. 1-MCP结合乙烯吸附剂对蓝莓贮藏品质及生理的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(19): 265-271. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.19.049.

[37] 高建晓, 王毓宁, 李鹏霞, 等. 漆蜡涂膜对鲜莲蓬采后褐变的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 275-282. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201618044.

[38] 罗佳丽. 鲜切紫薯褐变机理及控制技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013: 55-56.

[39] FAN X G, XI Y, ZHAO H D, et al. Improving fresh apricot (*Prunus armeniaca* L.) quality and antioxidant capacity by storage at near freezing temperature[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 231: 1-10. DOI:10.1016/j.scienta.2017.12.015.