

高氧气调包装对冬枣果实贮藏品质和乙醇代谢的影响

杜雨星^{1,2}, 谭玉鹏³, 刘清竹⁴, 孙芳¹, 张平^{1,2*}, 赵晓梅^{1,2*}

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院农产品贮藏加工所, 新疆农产品加工与保鲜重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆农业职业技术学院园林科技分院, 新疆 昌吉 831100; 4. 普拉瑞思科学仪器(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要:为探究冬枣采后贮藏品质及果实风味的变化,以冬枣为试材,于常温条件下对冬枣充入不同体积分数(40%、60%、80%、100%,其余气体成分为N₂)O₂进行处理。结果表明:60% O₂处理与充入空气的对照组品质指标均存在显著差异,60% O₂处理能够有效延缓冬枣采后果实硬度、可溶性固形物含量和可滴定酸含量的下降及褐变度的上升,并有效推迟了冬枣呼吸高峰的出现;电子舌结果显示,高O₂气调包装能够有效抑制冬枣在贮藏过程中果实苦味强度的增加,其中60% O₂处理效果最佳;贮藏第18天时,与对照组相比,60% O₂处理组乙醇、乙醛和丙酮酸含量分别降低了26.64%、26.29%和33.11%,显著抑制了乙醇、乙醛、丙酮酸含量的积累;此外,乙醇代谢相关酶活性的试验结果表明,贮藏结束时,与对照组相比,60% O₂处理组乙醇脱氢酶、丙酮酸脱羧酶和丙酮酸脱氢酶活性分别降低了29.03%、24.00%和17.18%。综上所述,60% O₂气调处理能较好地保持冬枣采后果实的品质和风味,也为冬枣贮藏保鲜技术的研发提供理论依据。

关键词:高氧气调;冬枣;贮藏品质;乙醇代谢;风味

Effect of High Oxygen Conditioning Packaging on Storage Quality and Ethanol Metabolism of Winter Jujube Fruit

DU Yuxing^{1,2}, TAN Yupeng³, LIU Qingzhu⁴, SUN Fang¹, ZHANG Ping^{1,2*}, ZHAO Xiaomei^{1,2*}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Processing and Preservation of Agricultural Products, Institute of Storage and Processing of Agricultural Products, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830052, China; 3. Landscape Science and Technology Branch, Xinjiang Agricultural Vocational and Technical College, Changji 831100, China; 4. Praris Scientific Instruments (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to explore the changes of storage quality and fruit flavor of winter jujube after harvest, winter jujube was treated with different concentrations of O₂ (40%, 60%, 80%, 100%, residual gas composition was N₂) at normal temperature. The results showed that there were significant differences in quality indexes between the 60% O₂ treatment group and the control group (air). 60% O₂ treatment could effectively delay the decrease of fruit hard-

基金项目:新疆维吾尔自治区公益性项目(KY2022027);新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2022A02006);新疆红枣产业技术体系专项资金项目(XJCYTX-01)

作者简介:杜雨星(1999—),女,汉族,硕士在读,研究方向为果品贮藏保鲜。

***通信作者:**张平,博士,研究员,研究方向为果品贮藏保鲜。

赵晓梅,博士,研究员,研究方向为果品贮藏保鲜。

ness, soluble solid and titrable acids contents and the increase of browning degree, and effectively delay the appearance of respiratory peak of winter jujube. At the same time, the electronic tongue results showed that high O₂ conditioning packaging could effectively inhibit the increase of bitter intensity of winter jujube fruits during storage, among which 60% O₂ treatment had the best effect. On the 18th day, compared with the control group, the contents of ethanol, acetaldehyde and pyruvate in 60% O₂ treatment group decreased by 26.64%, 26.29% and 33.11%, respectively, which significantly inhibited the accumulation of ethanol, acetaldehyde and pyruvate contents. In addition, the test results of activity of enzymes related to ethanol metabolism showed that at the end of storage, the activities of ethanol dehydrogenase, pyruvate decarboxylase and pyruvate dehydrogenase in 60% O₂ treatment group decreased by 29.03%, 24.00% and 17.18%, respectively, compared with the control group. In summary, 60% O₂ gas conditioning treatment can better maintain the quality and flavor of winter jujube fruits after harvest, and also provide the basic theoretical parameters for the research and development of storage and preservation technology of winter jujube.

Key words: high oxygen modified atmosphere; winter jujube; storage quality; ethanol metabolism; flavour

中图分类号:S609⁺.3

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2024.11.004

冬枣(*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)是我国特有的果树品种之一,富含VC、氨基酸、膳食纤维等。新疆红枣品种丰富,截至2020年底新疆红枣栽培面积41.35万hm²、产量381.24万t,居全国首位。冬枣作为红枣的一种优良品种,因具果肉脆甜、丰润多汁、香气芬芳等特点,深受大众的喜爱。但冬枣属于呼吸跃变型果实,且采收期相对集中,果实在采摘后贮藏不当则易出现“酒化”和发苦现象^[1]。由于甜味对苦味的掩盖作用和鲜枣的高水分含量对苦味的稀释作用,使鲜枣中的苦味含量较低^[2]。然而,随着贮藏时间的延长,水分流失及糖分等营养成分的消耗,乙醇和乙醛的大量积累,苦味逐渐显现,这严重影响了冬枣的食用价值和商品价值。

正常情况下,果实中乙醛和乙醇的含量相对较低,但在采后贮藏过程中,由于果实贮藏不当,或其在后熟衰老过程中,会产生大量乙醇和乙醛,这两种物质积累后扩散,会导致细胞组织受损或死亡,造成果肉褐变,加速品质劣变。研究发现,不同体积分数O₂处理能抑制鸭梨果实中丙酮酸脱羧酶(Pyruvate decarboxylase, PDC)和乙醇脱氢酶(Alcohol dehydrogenase, ADH)的活性,从而降低乙醇、乙醛的产生,维持果实采后品质^[3]。80%和100% O₂气调处理能有效抑制杏果实贮藏期间的呼吸强度和乙烯释放积累,提高其贮藏品质^[4]。高氧保鲜技术(氧气体积分数21%~100%)是一种新型物理保鲜技术,在果蔬中的应用研究较广泛,可应用于整株果蔬、鲜切果蔬的保鲜,也可用于防止果蔬褐变、降低呼吸强度。本研究拟采用高O₂气调包装对冬枣进行采后处理,研究其对冬枣果实乙醇代

谢及风味的影响,为高O₂气调包装方式在冬枣果实中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

半红期冬枣果实,2023年9月26日采摘于新疆巴音郭楞蒙古自治州库尔勒市(85°80'E, 41°84'N),采后立即运回新疆农业科学院加工所,挑选无机械损伤、无病虫害,大小、外观一致的正常果实进行后续试验。

氢氧化钠、三氯乙酸、2,4-二硝基苯肼、丙酮酸钠、盐酸,天津市光复精细化工研究所;奎宁、氯化钾、酒石酸、2-吗啉乙磺酸(MES)、二硫苏糖醇(DTT)、聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)、焦磷酸硫胺素盐酸盐、还原型辅酶I钠、乙醇脱氢酶、乙醛、无水氯化镁,天津市致远化学试剂有限公司;丙酮酸激酶(PK)测定试剂盒,北京索莱宝科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

GY-4型硬度计,乐清市艾德堡仪器有限公司;PAL-1型数显糖度计,日本Atago公司;UV-2600型紫外分光光度计,日本岛津公司;7890B型气相色谱仪,美国安捷伦科技公司;6000孔微孔膜、保鲜盒,浙江省永康市多晟家居用品有限公司;YC-300L型恒温箱,上海智城分析仪器制造有限公司;顶空MAP气体分析仪,阿美特克商贸(上海)有限公司;905 Titrand全自动电位滴定仪,瑞士万通集团;SB-42000DTD型超声波清洗机,宁波新艺超声设备有限公司;A11型研磨机,广州IKA实验室技术有限公司;GD1913型气调

包装机,广州行远包装机械有限公司;SA402B 电子舌,日本 Insent 公司。

1.2 方法

1.2.1 处理方法

将预冷后的冬枣随机放入敞口保鲜盒(180 mm×140 mm×50 mm)中,每盒 25 个果实。使用 6 000 孔微孔膜(厚度 25 μm ,透氧量为 6 000 $\text{cm}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)密封,进行气调包装,用气调包装机向密封保鲜盒内充入不同体积分数(40%、60%、80%、100%) O_2 ,其余气体成分为 N_2 ,以密封保鲜盒内充入空气(21% O_2)作为对照(CK),每天用气体分析仪对气体进行调节。各组样品均贮藏于(20±1)℃恒温箱中,每 3 d 测定 1 次各项生理指标。

1.2.2 测定指标与方法

1.2.2.1 硬度

参考曹建康等^[5]的方法测定,每盒随机选择 10 个冬枣,削去赤道一圈果皮,围绕赤道等间距的 3 个位置,测定各个位置果肉的硬度,重复 3 次,结果以平均值计,单位为 N。

1.2.2.2 可溶性固形物(Total soluble solids, TSS)含量

每盒随机选择 10 个冬枣,将冬枣破碎榨汁,分别过滤出汁液用数显糖度计测定,每组重复 6 次,最终结果以平均值计,单位为%。

1.2.2.3 可滴定酸(Titrable acid, TA)含量

每盒随机选择 10 个冬枣,将冬枣破碎榨汁后各提取 5 g 果汁,分别加入 50 mL 蒸馏水,用全自动电位滴定仪进行测定,每个处理重复测定 3 次,最终结果以平均值计,单位为%。

1.2.2.4 苦味感官评价

参照姜雪^[6]的奎宁感官评价法进行评定,评估小组由 8 名食品专业的学生组成。准确称取 50 g 冬枣整果样品切碎后用 250 mL 蒸馏水在 50 ℃水浴条件下,90%超声波功率辅助提取 1 h,过滤后的样液经 50 ℃、0.08 MPa 旋蒸浓缩用于感官评价。评估人员需要提前用蒸馏水漱口,取 3 mL 待评估的样品浓缩溶液放入口中,10 s 后吐出。品尝不同处理冬枣的苦味,并与不同浓度的奎宁溶液进行比较,取 8 人评分的平均值来确定冬枣的苦味分值。感官评价每 3 d 测定 1 次,苦味评价评分标准如表 1 所示。

电子舌的测定参考 Sun 等^[7]的方法略作改动。冬枣果皮、果肉、整果分别称取 50 g 样品,加入 150 mL 蒸馏水,榨汁机匀浆 10 min。用纱布过滤果渣,10 000 r/min 离心 15 min。取 100 mL 滤液,并在室温下测试滋味。电子舌配备 5 种化学传感器阵列,包括

表 1 冬枣苦味评分标准

Table 1 Evaluation standard of bitter taste of winter jujube

苦味描述	奎宁溶液质量浓度/(g·mL ⁻¹)	苦味评分/分
较苦	1×10 ⁻⁵	10
稍苦	5×10 ⁻⁶	5
少许苦味	1×10 ⁻⁶	2
无苦	5×10 ⁻⁷	0

AAE(鲜味)、CTO(咸味)、CAO(酸味)、C00(苦味)、AE1(涩味),2.236 5 g 氯化钾+0.045 g 酒石酸作为基准液。每个处理测量 4 次。

1.2.2.5 褐变度

参照 Coseteng 等^[8]的测定方法并加以改进。称取 2.5 g 样品,用液氮冷冻,在研钵中快速充分研磨,直至成为细腻粉末,置于离心管中,加入 5 mL 蒸馏水,10 min 后 4 ℃下 10 000 r/min 离心 15 min。取上清液在 420 nm 波长处测定吸光度值,以 $A_{420\text{nm}}$ 表示褐变度。每个样品平行测定 3 次。

1.2.2.6 呼吸强度

参照 Guo 等^[9]的方法,略有修改。将 0.5 kg 冬枣果实放入密闭容器罐中密封,室温静置 2 h 后用便携式气体分析仪测密封罐里的 CO_2 体积分数。呼吸强度单位为 $\text{mg CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

1.2.2.7 乙醛、乙醇、丙酮酸含量

乙醛、乙醇含量:参考 Dong 等^[10]的方法,并稍作修改。称取 5 g 冬枣果实的样品,加入 3 mL 饱和氯化钠溶液,研磨匀浆,置于 85 ℃水浴锅中静置 2 h 用做乙醇含量待测液。

GC 测定条件:色谱柱 DB-WAX 柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm);进样器温度 160 ℃;检测器温度 200 ℃;空气、氢气、氮气的流速分别为 300、40、30 mL/min;程序升温条件:35 ℃保持 1 min,以 1 ℃/min 升至 45 ℃保持 1 min,再以 5 ℃/min 升至 80 ℃;分流比 5:1。根据标准曲线测定乙醛和乙醇的含量,含量以 $\mu\text{g/g}$ 表示。

丙酮酸含量:在 3 g 冷冻样品中加入 3.0 mL 8%三氯乙酸研磨匀浆,静置 3 min 后,在 4 ℃、8 000 r/min 条件下离心 15 min。取 3.0 mL 上清液和 7.0 mL 8%三氯乙酸作为提取液。反应溶液依次加入 1.0 mL 提取液、2.0 mL 8%三氯乙酸和 1.0 mL 0.1% 2,4-二硝基苯肼溶液,摇匀后再加入 5.0 mL 1.5 mol/L 氢氧化钠。在避光的环境下,溶液进行显色反应 10 min^[11]。在 520 nm 处测定吸光度值的变化,丙酮酸含量以 $\mu\text{g/g}$ 表示。

1.2.2.8 乙醇脱氢酶(ADH)、丙酮酸脱羧酶(PDC)及丙酮酸激酶(PK)活性

参照 Dong 等^[10]的方法略作改动。提取液包含 2-

吗啉乙磺酸缓冲液、4% PVPP 和 2 mmol/L 二硫苏糖醇。称取 1 g 冬枣冷冻样品,加入 1 mL 提取缓冲液,研磨匀浆后,置于离心机 4 ℃下 10 000 r/min 离心 15 min,收集上清液用于后续试验 PDC 和 ADH 活性的测定。

ADH 活性的测定:反应混合液包含 2.0 mL 100 mmol/L、pH 6.5 MES 缓冲液,100 μ L 1.6 mmol/L NADH 溶液及 0.2 mL 酶提取液;加入 200 μ L 80 mmol/L 乙醛溶液后启动反应,在波长 340 nm 处测定吸光度的变化^[10],1 个酶活单位(U)定义为每分钟内吸光度值变化 0.01 所需酶量,ADH 活性以 U/g 表示。

PDC 活性的测定:反应混合物包括 1.5 mL 100 mmol/L、pH 6.5 MES 缓冲液,0.2 mL 5 mmol/L 焦磷酸硫胺素溶液,0.2 mL 50 mmol/L MgCl₂ 溶液,100 μ L 1.6 mmol/L NADH 溶液,0.2 mL 乙醇脱氢酶溶液,0.2 mL 酶提取液;反应由 200 μ L 50 mmol/L 丙酮酸溶液启动,在波长 340 nm 处测定吸光度值的变化^[10]。

PK 活性的测定:使用 PK 测定试剂盒测定,单位 U/mg。

1.2.3 数据处理

使用 Origin 2021 软件作图,SPSS 20.0 进行数据分析以及利用 Duncan 法来比较均值。 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

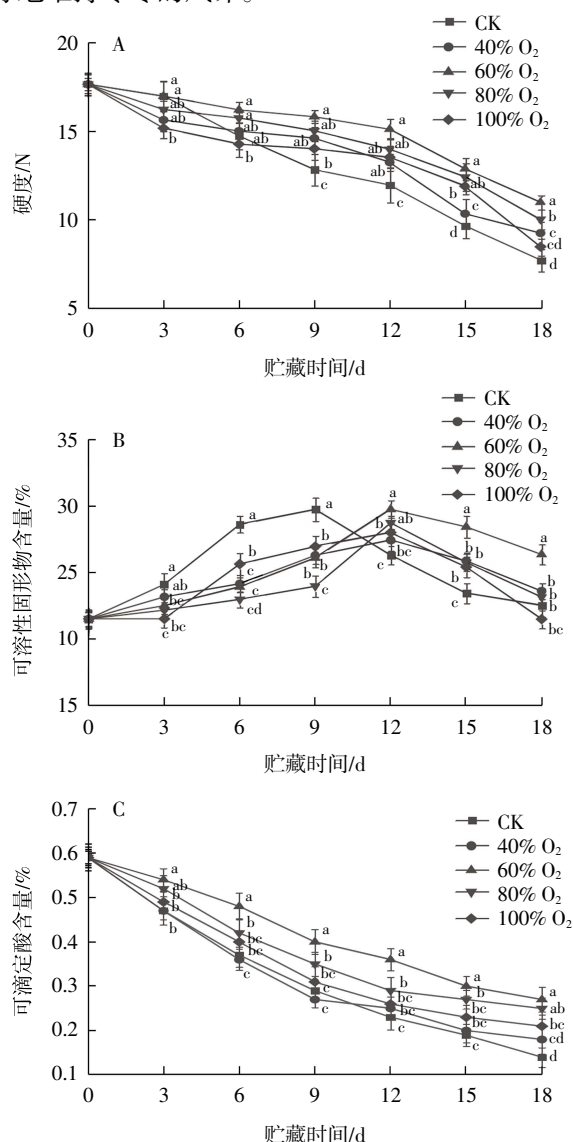
2.1 高 O₂ 气调包装对冬枣采后贮藏品质的影响

硬度、TSS 含量和 TA 含量是衡量冬枣果实品质的重要因素。如图 1A 所示,在贮藏第 15 天,对照组冬枣硬度急剧下降,相较于贮藏第 12 天下降了 19.4%。第 12 天时,对照组、40% O₂、60% O₂、80% O₂、100% O₂ 处理组的硬度分别为 11.96、13.25、15.12、13.98、13.54 N,60% O₂ 处理组的硬度在整个贮藏期间显著高于对照组($P < 0.05$),且 40% O₂、80% O₂、100% O₂ 处理组果实之间硬度无明显差异。其中,60% O₂ 处理对冬枣硬度的下降抑制效果最佳,贮藏结束时,60% O₂ 处理组的硬度比对照组高 29.8%。

由图 1B 可见,随着贮藏时间的延长,不同体积分数 O₂ 处理后冬枣果实的 TSS 含量均表现为先上升后迅速下降的变化趋势。对照组 TSS 含量在贮藏第 9 天达到最大值,随后显著下降;而 40% O₂、60% O₂、80% O₂、100% O₂ 处理组 TSS 含量在贮藏第 12 天均达到高峰,相较于对照组,高氧处理显著延缓了冬枣的后熟。贮藏第 18 天时,80% O₂ 处理组 TSS 含量与贮藏初期相比变化不大,60% O₂ 处理的冬枣果实 TSS

含量比对照组高 3.84 个百分点。高 O₂ 处理能延缓冬枣果实 TSS 高峰的出现,60% O₂ 处理后的冬枣对贮藏期间 TSS 含量的下降有较好的抑制效果。

如图 1C 所示,贮藏前 9 d,各组冬枣果实的 TA 含量均呈下降趋势,60% O₂、80% O₂、100% O₂ 处理组冬枣的 TA 含量在第 9 天时分别比对照组升高了 0.11、0.06、0.02 个百分点。与对照组相比,60% O₂、80% O₂ 处理对冬枣 TA 含量有显著影响,能够抑制 TA 含量的下降,从而延缓果实中游离酸含量的下降,更好地维持冬枣的风味。



注:相同贮藏时间不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

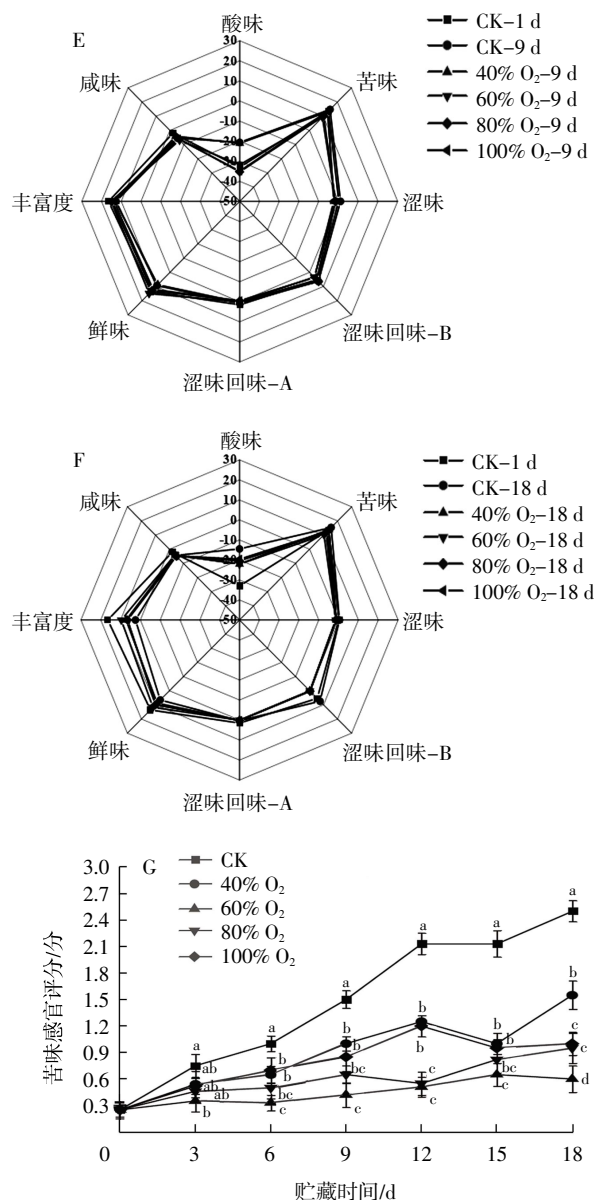
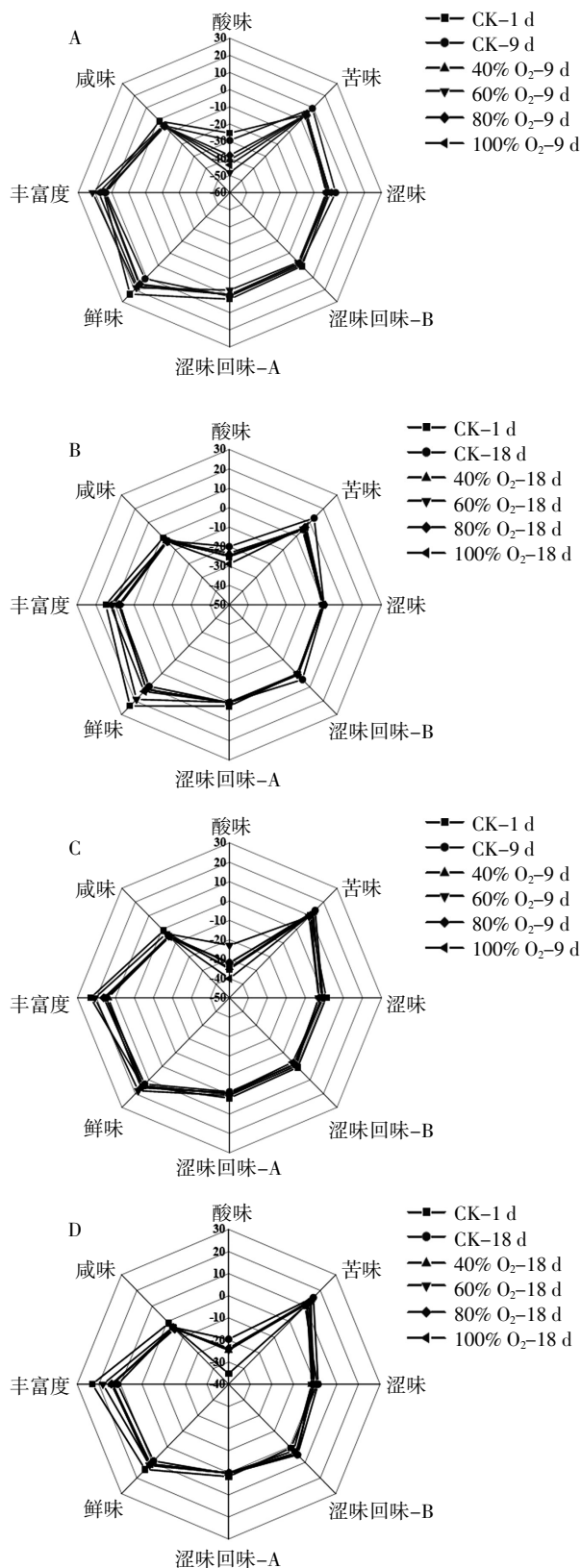
图 1 高 O₂ 气调包装对冬枣采后硬度(A)、可溶性固形物含量(B)及可滴定酸含量(C)的影响

Fig.1 Effects of high oxygen modified atmosphere packaging on fruit hardness (A), soluble solid content (B) and titratable acids content (C) of winter jujube

2.2 高 O₂ 气调包装对冬枣苦味感官评价的影响

不同高 O₂ 气调包装处理后的冬枣味觉差异主要

体现在酸味、苦味、鲜味上,而在咸味和涩味上差异较小,其中对照组的苦味响应值最高,鲜味值最低(图 2)。如图 2A 所示,贮藏第 9 天时,各组冬枣果皮样品对苦味和鲜味的响应值最大,对酸味的响应值在所有传感器中最低。贮藏第 18 天时(图 2B),各组冬枣果



注: A、B. 冬枣果皮; C、D. 冬枣果肉; E、F、G. 冬枣整果。

图 2 高 O_2 气调包装对冬枣果皮、果肉、整果风味和整果的感官评价影响

Fig.2 Effects of high oxygen modified atmosphere packaging on winter jujube peel, flesh and whole fruit flavour and whole fruit sensory evaluation

皮样品的苦味和鲜味响应值依然最大,并且与第 9 天的响应值相比,苦味有所增加而鲜味有所降低。图 2C、图 2D 分别为不同高 O_2 气调包装处理组果肉的雷达色谱图,贮藏第 9 天时,60% O_2 和 100% O_2 处理后的冬枣比其贮藏初期(CK-1 d)果实鲜味的响应值分别增加了 3.36 和 1.22,而对照组鲜味响应值贮藏第 9 天时相较于其贮藏初期(CK-1 d)则下降了 1.47;在贮藏第 18 天时不同处理冬枣果肉的酸味、苦味、鲜味和丰富度的响应值差异较为明显。此外,冬枣果肉的涩味、咸味、苦味回味、涩味回味强度值也略有差异。

与贮藏第9天冬枣果肉滋味相比,贮藏第18天时冬枣果肉的苦味响应值增加,鲜味响应值降低。高 O_2 气调包装处理组果肉的苦味响应值始终低于对照组,对照组贮藏第1天、第18天的苦味响应值分别为10.05和15.39;而贮藏第18天时,40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 和100% O_2 处理组苦味响应值分别为14.00、11.30、12.32和13.36;贮藏第18天时,高氧处理组果肉鲜味响应值高于对照组,40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 和100% O_2 处理组和对照组对应的果肉鲜味响应值分别为11.90、11.63、10.99、11.07、9.07,说明高 O_2 气调包装处理的冬枣能有效维持果实的鲜味。由图2E、图2F可知,冬枣整果在贮藏过程中苦味响应值逐渐升高。对照组苦味响应值升高较快,60% O_2 处理组苦味响应值整体呈现先下降后上升的趋势,其他处理组则一直呈上升趋势。这说明60% O_2 气调包装处理能抑制冬枣苦味响应值的上升。

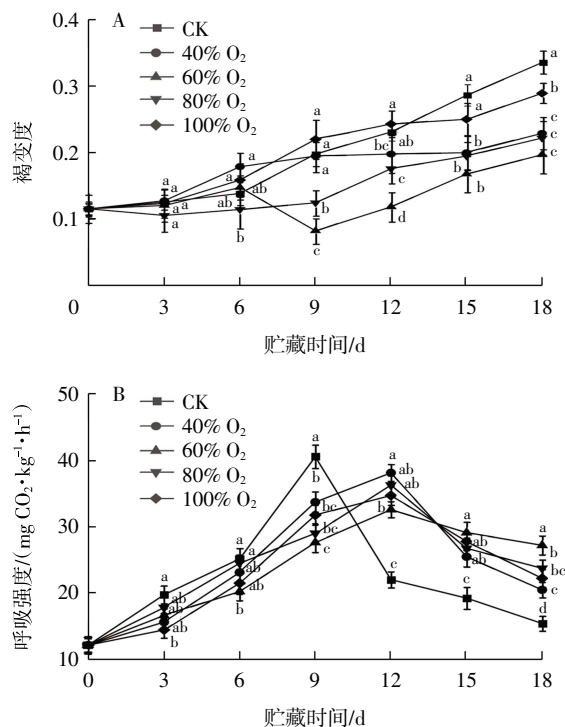
感官评分是反映水果货架品质和货架寿命的直观指标。由图2G可见,各组冬枣果实苦味感官评价分数均随着贮藏时间的延长整体呈上升趋势,贮藏前期各处理组间冬枣的感官品质无明显差异,贮藏9~12 d时,对照组开始失去食用价值,果实苦味感官评价分数上升最快,贮藏第12天时,对照组苦味感官评分达到了2.13。贮藏期间,60% O_2 苦味评价分数上升较为缓慢,对照组上升较为快速,且对照组和60% O_2 处理后的冬枣差异显著($P<0.05$),贮藏结束时,60% O_2 处理组苦味感官评分比对照组低76%,且60% O_2 处理组抑制苦味评分上升明显优于其他处理组。

2.3 高 O_2 气调包装对冬枣褐变度和呼吸强度的影响

由图3A可以看出,不同处理组冬枣的褐变度整个贮藏期间呈现明显的增长趋势。从贮藏第9天开始,60% O_2 处理组与对照组之间褐变度出现显著性差异($P<0.05$),贮藏第18天时,对照组褐变度是60% O_2 处理组的1.7倍。60% O_2 处理组褐变度在贮藏第9天后始终显著低于其他高 O_2 处理组($P<0.05$),说明60% O_2 处理可有效抑制冬枣采后褐变。

由图3B可见,冬枣果实的呼吸强度随着贮藏时间的延长呈现先上升后下降的趋势。对照组冬枣果实采后呼吸高峰出现在第9天,处理组呼吸高峰均出现在第12天,40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 和100% O_2 处理组呼吸峰值分别为38.29、32.72、36.43、34.86 $mg\ CO_2\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$ 。与对照组相比,采后高 O_2 包装处理不仅显著抑制了冬枣果实的呼吸强度,还推迟了呼吸高峰出现的时间,这可能是由于高 O_2 处理抑制了冬枣收获后贮藏过程中营养消耗所致。60% O_2 处理的冬枣在贮藏第18天

呼吸强度仍能达到27.33 $mg\ CO_2\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$,分别是40% O_2 、80% O_2 和100% O_2 处理组的1.33、1.14倍和1.22倍,证明60% O_2 处理对冬枣呼吸高峰的出现有很好的推迟作用,并可降低呼吸强度。



注:相同贮藏时间、不同组别小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

以下各图同。

图3 高 O_2 气调包装对冬枣褐变度(A)和呼吸强度(B)的影响

Fig.3 Effect of high oxygen modified atmosphere packaging on browning degree (A) and respiratory intensity (B) of winter jujube

2.4 高 O_2 气调包装对冬枣乙醛、乙醇和丙酮酸含量的影响

由图4A可见,冬枣果实在贮藏过程中,乙醛含量整体呈上升趋势。对照组贮藏0~6 d乙醛积累缓慢,6~18 d乙醛迅速积累,贮藏第18天时乙醛含量达43.67 $\mu g/g$ 。60% O_2 处理组冬枣乙醛含量始终处于较低水平,显著低于对照组($P<0.05$)。贮藏第18天时,60% O_2 处理组乙醛含量仅为32.19 $\mu g/g$,此时,对照组乙醛含量是60% O_2 处理组的1.36倍。80% O_2 处理组的乙醛含量在第12天和第15天增加较为明显,分别为19.86 $\mu g/g$ 和32.37 $\mu g/g$,其他时间点乙醛积累并不明显,均低于对照组。贮藏结束时,40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 、100% O_2 处理组乙醛含量分别比对照组降低了6.43%、26.29%、18.41%、11.59%。综上所述,60% O_2 处理可以有效抑制冬枣果实在后熟过程中乙醛的产生,并且抑制效果最佳。

冬枣果实的乙醇含量变化和乙醛含量变化基本一致。如图4B所示,对照组在0~9 d乙醇含量增加较

为缓慢,9~18 d 增加较快,贮藏结束时,对照组乙醇含量达到 37.87 $\mu\text{g/g}$,分别是 40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 、100% O_2 处理组的 1.11、1.36、1.24 倍及 1.15 倍。80% O_2 处理组乙醇含量在贮藏第 12 天时较高,为 24.09 $\mu\text{g/g}$ 。60% O_2 处理组贮藏 6~18 d 时乙醇含量显著低于对照组 ($P<0.05$),且在贮藏结束时,60% O_2 处理组比对照组乙醇含量低 26.64%,说明 60% O_2 处理对冬枣贮藏过程中乙醇积累具有显著的抑制效果。

丙酮酸是冬枣果实新陈代谢的中间产物,无氧条件下,丙酮酸反应会生成乙醇、乙醛。如图 4C 所示,在常温条件下,随着贮藏时间的延长,冬枣果实丙酮酸含量呈现先上升后下降的变化趋势。对照组丙酮酸含量贮藏 6~12 d 急剧上升,并在贮藏第 12 天时达到峰

值(22.53 $\mu\text{g/g}$),贮藏 12~18 d,对照组丙酮酸含量迅速下降,第 18 天时丙酮酸含量为 12.14 $\mu\text{g/g}$ 。60% O_2 处理组冬枣果实中丙酮酸含量始终保持在较低水平。对照组在贮藏第 12 天时到达高峰,而 40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 、100% O_2 处理组均在贮藏第 15 天时到达高峰,其峰值分别为 17.39、13.53、15.19、16.89 $\mu\text{g/g}$ 。贮藏第 12 天和第 18 天时,60% O_2 处理组冬枣果实丙酮酸含量分别比对照组低 50.78% 和 33.11% ($P<0.05$)。综上,高氧气调包装不仅推迟了丙酮酸含量高峰的出现时间,还抑制了丙酮酸含量的积累,其中 60% O_2 处理抑制冬枣采后丙酮酸含量的增长效果最佳。

2.5 高 O_2 气调包装处理对冬枣乙醇代谢相关酶活性的影响

ADH 是乙醇代谢关键酶,能够使乙醇和乙醛相互转化,催化乙醛转化为乙醇的过程可以防止细胞被乙醛毒害,但同时产生的大量乙醇,若不及时扩散,就会产生酒味。如图 5A 所示,在整个贮藏期间,果实 ADH 活性呈现逐渐上升趋势,其中,6~18 d 时 60% O_2 处理组的活性显著低于对照组 ($P<0.05$)。对照组果实的 ADH 活性在贮藏第 9 天和第 18 天上升速度最快。在贮藏过程中,40% O_2 、80% O_2 和 100% O_2 处理组 ADH 活性之间无显著差异。贮藏结束时,60% O_2 处理组冬枣果实 ADH 活性比对照组低 29.03%,而 40% O_2 、80% O_2 和 100% O_2 处理组 ADH 活性分别是 60% O_2 处理组的 1.18、1.23 倍和 1.14 倍。可见,60% O_2 处理可以显著抑制冬枣果实贮藏期间 ADH 活性的上升。

如图 5B 所示,随着贮藏时间的延长,高 O_2 包装处理组 PDC 活性始终低于对照组,在贮藏结束时,对照组 PDC 活性分别是 40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 和 100% O_2 处理组的 1.02、1.32、1.09 倍和 1.19 倍。说明高 O_2 气调包装处理能够抑制 PDC 活性的升高。60% O_2 处理组冬枣果实 ADH 活性在整个贮藏期间上升较为缓慢,且能够显著抑制 PDC 的活性。贮藏第 9 天时,对照组、40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 和 100% O_2 处理组的 PDC 活性分别为 18、16、11、15、16 U/g。

由图 5C 可知,冬枣在贮藏期间 PK 活性逐渐上升,贮藏前 9 d 冬枣 PK 活性上升较为缓慢,贮藏后期快速增加,其中高 O_2 气调包装处理能够有效抑制果实 PK 活性的上升。在贮藏结束时,40% O_2 、60% O_2 、80% O_2 、100% O_2 处理组和对照组 PK 活性分别为 3.23、2.16、2.59、2.77、3.90 U/mg,高 O_2 包装处理组的 PK 活性显著低于对照组 ($P<0.05$)。由此可见,高 O_2 处理可以使冬枣果实在贮藏过程中的 PK 活性维持在较低水平。

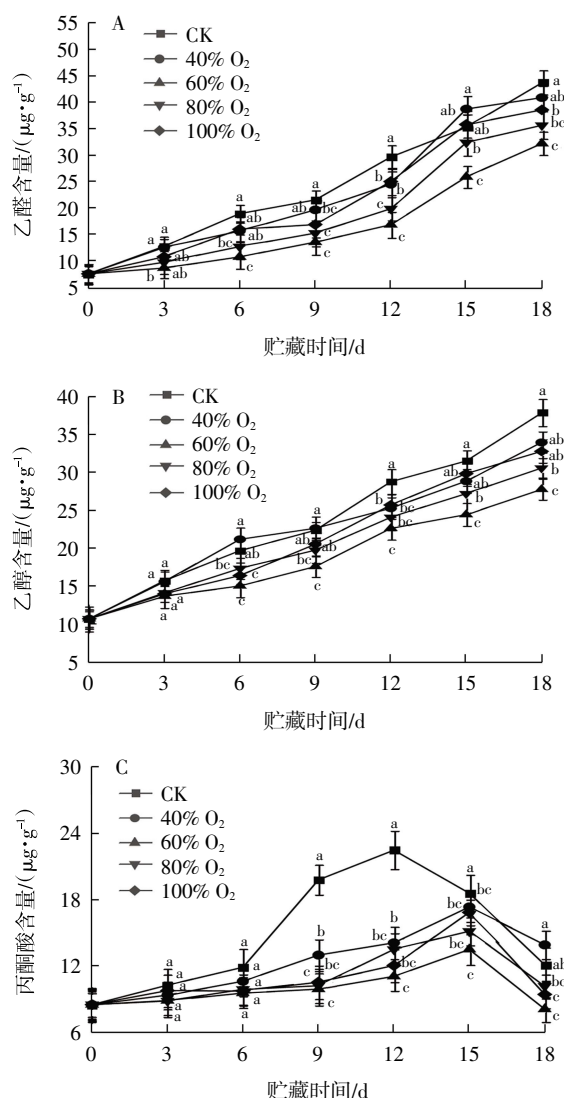
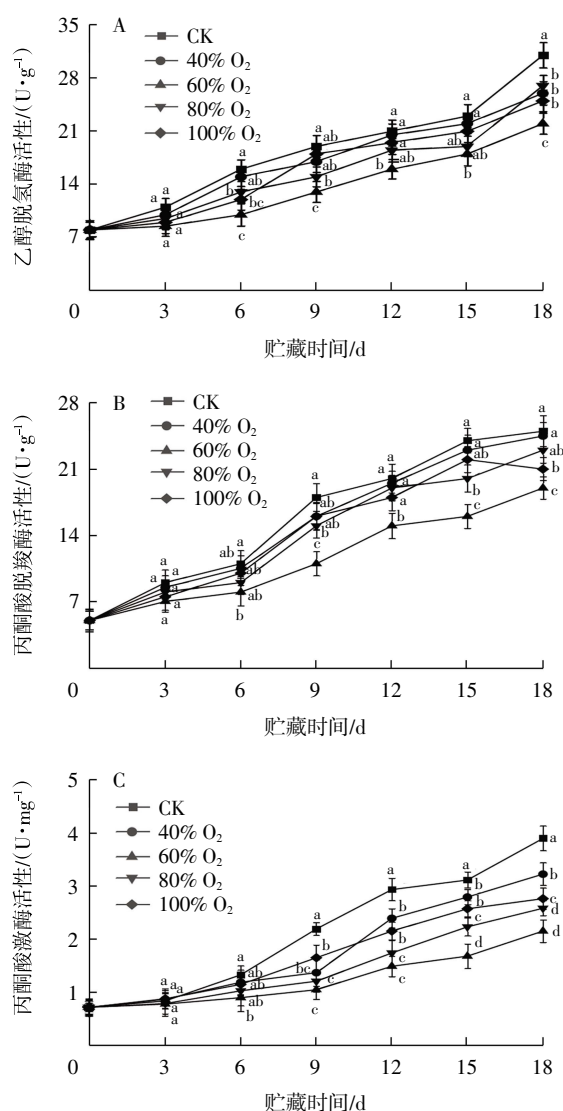


图 4 高 O_2 气调包装对冬枣乙醛(A)、乙醇(B)和丙酮酸(C)含量的影响

Fig.4 Effect of high oxygen modified atmosphere packaging on the contents of acetaldehyde (A), ethanol (B) and pyruvic acid (C) of winter jujubes



注: A.乙醇脱氢酶活性; B.丙酮酸脱羧酶活性; C.丙酮酸激酶活性。

图5 高O₂气调包装对冬枣乙醇代谢相关酶活性的影响
Fig.5 Effect of high oxygen modified atmosphere packaging on the activities of enzymes related to ethanol metabolism of winter jujube

3 讨论

采后衰老通常涉及果实硬度、TSS含量和TA含量的降低。TSS与TA作为呼吸基质,通过呼吸作用逐渐被降解和消耗,使衰老不可逆地进行下去。高O₂气调包装处理作为一种物理保鲜技术,因其成本较低、无残留而受到越来越多的关注^[12]。本研究采用不同体积分数(40%、60%、80%、100%)O₂气调包装处理冬枣果实发现,高O₂处理能够推迟冬枣呼吸高峰的出现,显著抑制冬枣果实的硬度、TSS含量及TA含量的下降,并有效降低冬枣果实的褐变度。研究表明,受冷害后桃果肉褐变会引起质地硬化、木质化或絮状败坏,导致固有风味变淡甚至丧失,有的甚至产生异味或苦

味,这说明褐变度的上升会促使果实的风味变差^[13]。本研究表明,60% O₂处理对抑制冬枣果实褐变效果最佳,从而延缓了果实风味的劣变。本试验发现冬枣硬度随着贮藏时间的延长逐渐下降,这种变化可能是由于水分蒸发和呼吸强度的变化引起的,这与Zhao等^[14]的研究结果相似。60% O₂处理对维持冬枣果实品质效果最佳,这与李汶轩^[15]研究气调处理对冬枣采后贮运品质变化情况的结果相似。本试验表明,高O₂气调包装处理通过抑制果实呼吸作用,来维持贮藏期间冬枣果实的品质。

感官评价是反映果实风味品质的重要指标。本试验通过电子舌味觉分析系统研究了不同高O₂包装处理后冬枣果实的味觉信息,结果发现,随着贮藏时间的增加,不同处理组冬枣果实苦味强度逐渐增加。贮藏初期,冬枣果肉苦味响应值高于果皮苦味强度。一部分人对乙醇口味的描述为苦味,奎宁(苦味)溶液口感的评定与10%的乙醇味相似,并且通过添加蔗糖可以增强这种效果^[16]。本试验发现,冬枣果实苦味的增加和乙醇、乙醛的变化规律一致,这说明苦味的形成可能与乙醇、乙醛的含量相关。

较高的CO₂体积分数或者过低的O₂体积分数可通过促进冬枣果实贮藏过程中的无氧呼吸来加速冬枣的酒化进程。本试验表明,高O₂气调包装处理可有效抑制冬枣贮藏过程中丙酮酸、乙醇和乙醛的积累。ADH和PDC作为乙醇代谢关键酶,对于乙醇的代谢有至关重要的作用^[17]。糖酵解-三羧酸循环(TCA)是呼吸代谢的主要途径,在氧气不足或二氧化碳含量过高的情况下呼吸类型会由有氧呼吸向无氧呼吸转变,丙酮酸也由TCA循环转向乙醇代谢途径,在PDC和ADH的催化下生成乙醛和乙醇^[15]。在草莓中发现PDC基因通过调控相关酶活性促进果实的成熟和香气物质的产生^[18]。ADH和PDC会加速果实丙酮酸的分解,导致乙醇、乙醛含量的快速积累,然而乙醇、乙醛的过度积累会导致异味的产生,继而会加速果实的酒化和衰老。本试验中,60%高O₂气调包装处理冬枣中ADH、PDC活性显著低于对照组。通过对PK活性的测定发现,随着贮藏时间的延长,PK活性逐渐上升,从而导致丙酮酸和乙醇、乙醛含量也逐渐上升,60% O₂处理对PK活性有较好的抑制作用,所以丙酮酸和乙醇、乙醛含量的增加也较为缓慢;贮藏前期,高O₂包装处理组冬枣PK活性差异不大,贮藏第9天时,差异逐渐明显,60% O₂处理对冬枣PK活性抑制效果最明显,80%和100% O₂处理对抑制PK活性的效果差异不显著。有研究发现,过高体积分数氧气处理不

利于冬枣果实细胞壁结构的维持,使其品质下降^[15]。这可能是本试验中 80% O₂ 和 100% O₂ 贮藏条件下冬枣果实贮藏效果不如 60% O₂ 处理的原因,所以选择合适的氧气体积分数对冬枣贮藏尤为重要。

4 结论

上述试验结果表明,在 40% O₂、60% O₂、80% O₂、100% O₂ 这 4 种不同体积分数高氧气调处理中,60% O₂ 处理能明显抑制冬枣果实贮藏期间的品质下降,其能通过抑制冬枣呼吸高峰的出现,延缓 TSS 含量的下降,抑制硬度和 TA 含量的降低,同时能抑制冬枣乙醇和乙醛的积累,降低果实苦味的产生,延缓乙醇代谢相关酶的活性,从而提高冬枣果实贮藏品质。

参考文献:

- [1] ZHAO Y T, ZHU X, HOU Y Y, et al. Effects of harvest maturity stage on postharvest quality of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during cold storage[J/OL]. Scientia Horticulturae, 2021, 277[2023-10-18]. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109778>. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109778.
- [2] 蒲云峰. 骏枣苦味物质鉴定及形成机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [3] 杜艳民, 王文辉, 贾晓辉, 等. 不同 O₂ 浓度对鸭梨采后生理代谢及贮藏品质的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23):4918-4928. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2020.23.016.
- [4] 张文涛, 李喜宏, 王威, 等. 高氧气调对树上干杏采后生理和贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(8):220-225. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201608039.
- [5] 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, 2007.
- [6] 姜雪. 枣品种及干制条件与苦味形成关系的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [7] SUN L L, ZHANG S W, LI Q H, et al. Metabolomics and electronic tongue reveal the effects of different storage years on metabolites and taste quality of Oolong tea[J/OL]. Food Control, 2023, 152[2023-10-18]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109847>. DOI: 10.1016/j.foodcont.2023.109847.
- [8] COSETENG M Y, LEE C Y. Changes in apple polyphenoloxidase and polyphenol concentrations in relation to degree of browning[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(4): 985-989. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1987.tb14257.x.
- [9] GUO Y, ZHOU J, ZHANG J R, et al. Chitosan combined with sodium silicate treatment induces resistance against rot caused by *Alternaria alternata* in postharvest jujube fruit[J]. Journal of Phytopathology, 2019, 167(7-8): 451-460. DOI: 10.1111/jph.12817.
- [10] DONG L, LI L, XU Y Q X, et al. Exogenous ATP attenuated fermentative metabolism in postharvest strawberry fruit under elevated CO₂ atmosphere by maintaining energy status[J/OL]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 182[2023-10-22]. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111701>. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2021.111701.
- [11] BURDON J, LALLU N, YEARSLEY C, et al. The kinetics of acetaldehyde and ethanol accumulation in 'Hass' avocado fruit during induction and recovery from low oxygen and high carbon dioxide conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 43(2): 207-214. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2006.08.014.
- [12] 崔丽娟, 马素娟. 浅谈高氧气调保鲜技术在食品加工中的应用现状[J]. 食品安全导刊, 2022(4): 148-150. DOI: 10.16043/j.cnki.cfs.2022.04.014.
- [13] 魏文毅, 王贵禧, 梁丽松, 等. '八月脆'桃果实气调贮藏过程中品质及相关酶活性的变化[J]. 林业科学, 2008, 44(3):81-86. DOI:10.3321/j.issn:1001-7488.2008.03.017.
- [14] ZHAO Y T, ZHU X, HOU Y Y, et al. Effects of harvest maturity stage on postharvest quality of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during cold storage[J/OL]. Scientia Horticulturae, 2021, 277[2023-10-22]. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109778>. DOI:10.1016/j.scienta.2020.109778.
- [15] 李汶轩. 高 O₂ 处理调控采后冬枣果实贮藏品质及生理特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [16] SCINSKA A, KOROS E, HABRAT B, et al. Bitter and sweet components of ethanol taste in humans[J]. Drug and Alcohol Dependence, 2000, 2(60): 199-206. DOI: 10.1016/s0376-8716(99)00149-0.
- [17] 王如倩. PDC 和 ADH 在采后柑橘果实乙醛乙醇积累中的作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [18] MOYANO E, ENCINAS-VILLAREJO S, LÓPEZ-RÁEZ J A, et al. Comparative study between two strawberry pyruvate decarboxylase genes along fruit development and ripening, post-harvest and stress conditions[J]. Plant Science, 2004, 4(166): 835-845. DOI: 10.1016/j.plantsci.2003.09.025.

收稿日期:2024-05-20