# 1-MCP 处理对不同期采收的阿克苏富士苹果在采后贮藏期糖代谢的影响

谢季云，赵晓敏，汪永琴，马少帅，白友强，杜林笑，马楠，李丹，李学文

（新疆农业大学食品科学与药学学院，新疆乌鲁木齐 830052）

**摘要：**以阿克苏富士苹果为试材，通过测定在贮藏过程中（0~150 d），果实蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨醇含量，以及蔗糖磷酸合成酶（SPS）、蔗糖合成酶（SS-S、SS-C）、酸性转化酶（AI）、中性转化酶（NI）和山梨醇脱氢酶（SDH）的活性，研究采后苹果果实糖代谢及相关酶活性的变化规律并分析了 1-MCP 处理对它们的影响。结果表明：在采后贮藏期间 1-MCP 处理在一定程度上抑制了贮藏过程中富士苹果果实蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨醇含量的增加，且对不同采收期果实酶活性的影响效果不同，果实中蔗糖、山梨醇含量以及 SDH 活性呈下降趋势，果糖含量、葡萄糖含量、与 SPS、SS-S 活性呈先下降后上升趋势，AI 与 NI 在贮藏过程中出现明显峰值，且 1-MCP 处理可以显著提高这一峰值。

**关键词：**富士苹果；采收期；1-甲基环丙烯；糖含量；糖代谢相关酶

**文章篇号：**1673-9078(2018)09-111-121 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.9.017

# Effect of 1-MCP Treatment on Sugar Metabolism in Aksu Fuji Apples Harvested at Different Stages and Stored for Different Periods

**XIE Ji-yun, ZHAO Xiao-min, WANG Yong-qin, MA Shao-shuai, BAI You-qiang, DU Lin-xiao, MA Nan, LI Dan, LI Xue-wen**

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Through using Aksu Fuji apple as the test material, and analyzing the sucrose, glucose, fructose and sorbitol contents as along with sucrose phosphate synthase (SPS), sucrose synthase (SS-S, SS-C), acid invertase (AI), neutral invertase (NI) and sorbitol dehydrogenase (SDH) activity, this study examined the changes of sugar metabolism and related enzyme activities of these apples harvested at different stages. The effects of 1-MCP treatment on them were analyzed during storage (0~150 days). The obtained results showed that 1-MCP treatment during postharvest storage inhibited the increase of sucrose, glucose, fructose and sorbitol contents in Fuji apple fruit during storage, and exerted different effects on the enzymatic activities in the apples harvested at different stages. The sucrose and sorbitol contents and SDH activity in fruit decreased, whilst the contents of fructose and glucose and activities of SPS and SS-S decreased first and then increased. AI and NI showed significant peak values during storage, and 1-MCP treatment significantly increased these peaks.

**Key words:** Fuji apple; harvest time; 1-MCP; sugar content; glucose metabolism related enzymes

富士苹果作为我国的优质栽培果品，具有皮薄肉厚、味甜汁多、色泽光亮等特点，阿克苏地区作为新疆苹果产量大区，据统计，2015 年其苹果种植面积达到 1.8 万公顷，苹果产量达到 42 万吨，占全疆产量的 36.17%[1]。苹果果实生长过程中积累糖的种类、含量及比率是决定果实品质和商品价值的重要因素之一[2,3]，有研究表明，苹果果实中糖的积累受果实库强、碳水化合物代谢、山梨醇代谢、韧皮部卸载，跨膜运输、蔗糖代谢及相关酶活性等方面的调控[2~4]。

1-MCP(1-Methylcyclopropene，1-甲基环丙烯)是一种含双键的环丙烯类化合物，是一种乙烯受体抑制剂具有无毒、无味和无毒副作用等特点，在环丙烯类化合物中其活性强，使用效果好，对苹果果实采后品质的保持有明显作用，美国环保局（U.S.EPA）已批准其在苹果的贮藏过程使用。人们通过研究 1-MCP 处理对苹果、香梨、桃、草莓和杏等果实在贮藏过程中的衰老及保鲜效果，发现 1-MCP 通过与乙烯受体结合，阻断了乙烯反馈调节的生物合成，抑制了乙烯诱

收稿日期：2018-04-14

基金项目："十二五"农村领域国家科技计划项目（2011BAD27B01-02）

作者简介：谢季云（1993-），男，硕士研究生，研究方向：果蔬采后贮藏及物流工程

通讯作者：李学文（1964-），男，博士，教授，研究方向：果蔬采后生理及贮藏保鲜技术

导的成熟作用，从而延长了水果和蔬菜的保鲜[5,6]。

果实的糖酸含量调控着果实贮藏过程中果实风味物质品质的变化，且果实糖含量受果实糖代谢相关酶活性的变化影响，目前，对果实糖代谢的研究主要集中在果实的发育过程中，对于1-MCP处理对不同采收期苹果采后糖代谢的影响机理研究报道较少，因此本实验通过使用浓度为1.0 μL/L的1-MCP对不同采收期苹果进行熏蒸处理，研究苹果果实在贮藏过程中糖含量及相关酶活性的变化，以期探讨1-MCP处理对采后苹果果实采后糖代谢的影响机理，为提高果实采后品质提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

试验用材料采自阿克苏红旗坡农场管理良好的商品苹果园，在果园不同区域随机选择15棵盛果期“富士”苹果树，并标记，每次从标记果树随机采摘大小均匀，无病虫害和无机械损伤的果实，分三批采摘，采收日期分别为2016年10月22日（采收期Ⅰ）、11月1日（采收期Ⅱ）、11月12日（采收期III），每次采摘90 kg，运回实验室，剔除机械损伤果实，装箱，放置在-1~0 ℃，相对湿度90%~95%的冷库中贮藏。1-MCP，美国罗门哈斯中国公司提供；果糖、葡萄糖、蔗糖、山梨醇标准品购自Sigma公司，均为色谱纯级。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品处理方法

1-MCP处理方法参照谢季云等[7]的方法。

#### 1.2.2 样品的制备

样品的制备参照王艳颖等[8]、Zhang等[9]的方法并加以改进。准确称取3 g果肉，加入了7 mL超纯水研磨成匀浆后转入10 mL高心管中，80 ℃水浴超生提取1 h，使可溶性糖充分浸出。冷却后11000 r/min离心20 min，将上清液过滤到25 mL的容量瓶中，残渣加超纯水再提取，合并上清液，用超纯水定容至25 mL容量瓶中。用0.22 μm的有机滤膜过滤后待测。

#### 1.2.3 标准溶液的配置

准确称取果糖、蔗糖、葡萄糖和山梨醇标样各500 mg，用超纯水定溶于10 mL容量瓶中，摇匀50 mg/mL的糖标准母液，再用超纯水稀释成浓度为0.25、0.50、1.00、2.00、2.50、5.00 mg/mL的混标溶液。

#### 1.2.4 高效液相色谱条件

可溶性糖测定的色谱条件为：Athena $NH_2$，（120 A,4.6 mm×250 mm，3 μm）色谱柱及保护柱，柱温40 ℃，流动相为乙腈:水=75:25，（*V/V*），流速1.00 mL/min，进样量20 μL；检测器为示差折光检测器。外标法定量。

#### 1.2.5 酶液制备及酶活性的测定

##### 1.2.5.1 酶液的制备

蔗糖磷酸合成酶（SPS）、蔗糖合酶（SS）、酸性转化酶（AI）、中性转化酶（NI）酶液制备方法参照Lowell[10]的方法并加以改动：称取1 g去皮果肉于冰浴的研钵中，分批加入5 mL提取缓冲液，提取液成分：100 mmol/L Tris-HCL（pH 7.0）缓冲液，内含5 mmol/L $MgCl_2$，2 mmol/L EDTA-Na，2%乙二醇，0.2%牛血清清蛋白（BSA），2%PVP，5 mmol/L LDTT，冰浴研磨提取，2 ℃下10000 r/min离心20 min，取上清液3 mL装入透析袋中，透析袋置于透析缓冲液中4 ℃透析过夜，其间更换透析液三次，透析后酶液备用。透析液成分，25 mmol/L Tris-HCL（pH 7.0）缓冲液，内含2.5 mmol/L $MgCl_2$，1 mmol/L EDTA-$Na_2$，1%乙二醇，1 mmol/L DTT。

山梨醇脱氢酶（SDH）酶液制备方法参照Yamamguchi[11]等的方法并有所改动：称取1 g新鲜去皮果肉于冰浴的研钵中，加入8 mL提取缓冲液，冰浴研磨提取，经滤纸过滤后，滤液经11000 r/min离心15 min，上清夜加入$NH_4SO_4$至达到40%饱和度，经11000 r/min离心20 min，将沉淀颗粒去除，将上清液装入透析袋中，用其10倍体积的稀释10倍的提取液（去除TritonX-100）透析缓冲液4 ℃透析过夜，其间更换透析液三次，透析后酶液备用。

##### 1.2.5.2 酶活性测定

SS-C活性测定：通过480 nm比色测定分解方向生成的果糖来定量，反应体系包括：0.4 mL酶反应液（100 mmol/L tris-MES (pH 7.0)缓冲液，内含10 mmol/L蔗糖，5 mmol/L醋酸镁，5 mmol/L DTT），0.1 mL 10 mmol/L UDP，0.05 mL透析后的酶液，补水至1 mL，在30 ℃下反应30 min后加入0.2 mL 30% KOH，转入沸水浴10 min终止反应，冷却至室温，混匀后加入3 mL蒽酮溶液[0.15 g蒽酮溶于100 mL 81%硫酸]在40 ℃下反应20 min后冷却，测定在480 nm下测定吸光值。计算蔗糖的合成量，对照用蒸馏水代替UDP，表示蔗糖合成酶活性，单位mg/(g h FM)。

SS-S活性测定：酶反应液改为[10 mmol/L果糖，5 mmol/L 醋酸镁，5 mmol/L DTT]把0.1 mL、10 mmol/L的UDP换成10 mmol/L的UDPG，对照用蒸馏水代替UDPG。

SPS活性测定：除反应液改为UDP-葡萄糖10 mmol/L，果糖-6-磷酸5 mmol/L，葡萄糖-6-磷酸15

现代食品科技

mmol/L，15 mmol/L $MgCl_2$，1 mmol/L EDTA，0.1 mol/L 硼酸缓冲液（pH 8.0）外，其余与蔗糖合成酶活性测定相同，对照用蒸馏水代替 UDPG，单位 mg/(g h FM)。

NI 活性测定：参考王惠聪等[12]并加以改进，取 0.2 mL 酶液加入 1 mL 的反应液[1%蔗糖，0.1 ml/L 磷酸缓冲液（pH 7.0），5 mmol/L $MgCl_2$，1 mmo/L EDTA] 在 37 ℃下水浴 30 min 后，加 1.2 mL DNS 试剂终止反应，沸水浴 5 min，冷却后加 2.4 mL 蒸馏水，混匀后在 540 nm 下测定吸光值，用 3,5-二硝基水杨酸法测定还原糖含量，计算还原糖产生速率，表示转化酶的的活性，单位 mg/(g h FM)。

AI 活性的测定：参考王惠聪[12]等并加以改进，除反应液改为 1%蔗糖，0.1 mol/L 醋酸缓冲液，pH 4.7，其余于 NI 活性测定相同。

SDH 活性的测定：SDH 活性测定参照 Yamaguchi 等[11]的方法并有所改动：通过 340 nm 比色测定 $NAD^+$(氧化型辅酶Ⅰ)在 D-山梨醇存在的情况下的还原量来测定。反应混合液包括：1 mM $NAD^+$，0.1 Mtris-HCL(pH 9.0)，500 mM D-山梨醇，0.6 mL 酶液。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据分析与作图，SAS $V_{8.0}$ 进行差异显著性分析，*表示差异显著（$p$<0.05），**表示差异显著（$p$<0.01）。

## 2 结果与分析

### 2.1 1-MCP 处理对不同采收期果实蔗糖含量变化的影响

由图 1 可见，随着贮藏时间的延长，不同采收期果实在贮藏过程中变化趋势不同，且总体呈下降趋势，采期Ⅱ、Ⅲ在贮藏 30 d 出现上升峰值后下降，采期Ⅰ未有这一现象，1-MCP 处理在整个贮藏期内，均抑制了果实蔗糖的积累，采期Ⅰ处理组果实蔗糖含量在整个贮藏期内均低于对照组，且对照组果实在贮藏 120 d 蔗糖含量达到最小值为 14.3 mg/g，随后蔗糖含量呈上升趋势，至贮藏结束，对照组果实蔗糖含量为 18.6 mg/g，处理组果实较对照组变化趋势较为平稳；采期Ⅱ处理组与对照组果实蔗糖含量在贮藏 0~60 d 时变化趋势差异显著（$p$<0.05），对照组果实在 0~30 d 内呈现上升趋势，至贮藏 30 d 蔗糖含量达到 30.3 mg/g 为整个贮藏期内的峰值，此时处理组果实蔗糖含量为 20.1 mg/g；采期Ⅲ对照组与处理组果实在整个贮藏期内呈现先上升后下降趋势，但上升趋势不明显，处理组在贮藏 30~120 d 平均低于对照组 9.6 mg/g，表明 1-MCP 处理对苹果果实蔗糖含量与很好的抑制作用。以采期Ⅲ较为明显。

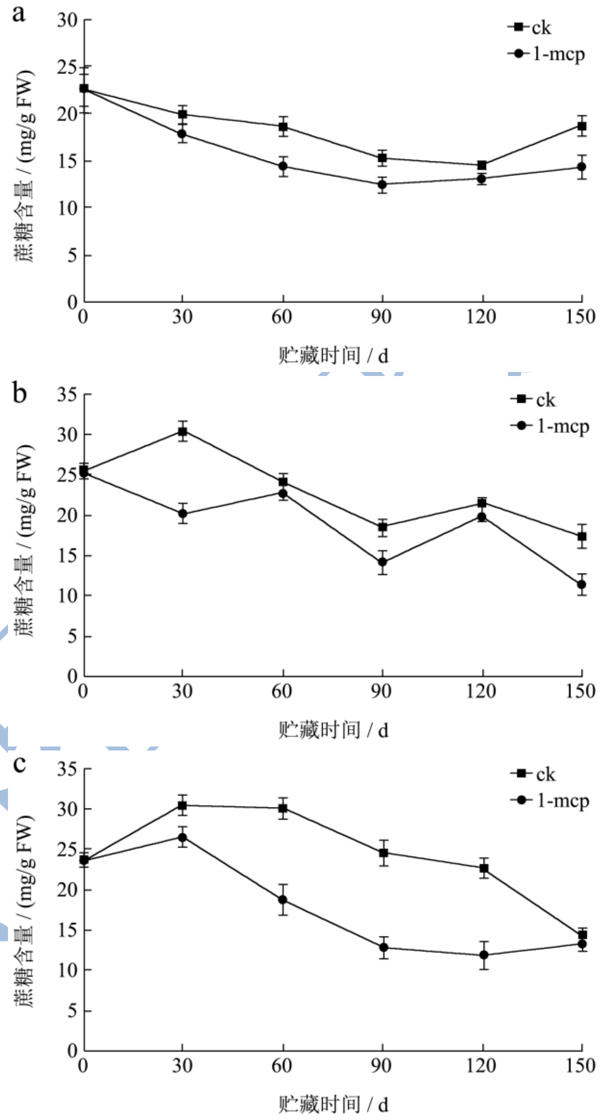



图 1 1-MCP 处理对不同采收期果实蔗糖含量变化的影响

**Fig.1 Effect of 1-MCP treatment on changes of sucrose content in different harvested fruits**

注：a 为采收期采收期Ⅰ；b 为采收期Ⅱ；c 为采收期Ⅲ。下同

### 2.2 1-MCP 处理对不同采收期果实葡萄糖含量变化的影响

由图 2 可见，随着贮藏期的延长，采期Ⅰ、Ⅲ果实在不同采收期苹果果实葡萄糖含量变化均呈现先下降后上升的趋势，采期Ⅰ对照组果实由采收时 10.56 mg/g 至贮藏 90 d 下降为 4.56 mg/g 随后呈现上升趋势，处理组果实在贮藏 0~60 d 内下降，随后平稳上升，至贮藏结束葡萄糖含量低于对照组 3.96 mg/g；采期Ⅱ果

实葡萄糖与蔗糖含量在整个贮藏期内变化趋势不平稳，对照组与处理组均出现了两个明显的峰值，但峰值大小差异显著（$p<0.05$）至贮藏结束处理组果实葡萄糖含量低于对照组果实 6.24 mg/g；采期III对照组果实在贮藏 0~150 d 内呈平缓下降趋势，处理组果实在贮藏 0~90 d 内抑制了果实葡萄糖的生成，较对照组差异不显著，但在贮藏 90~150 d 内含量明显上升，至贮藏结束（150 d）高于对照组 5.02 mg/g；表明 1-MCP 处理可以抑制果实葡萄糖含量的生成，但效果不明显，且对不同采收期果实效果差异显著。

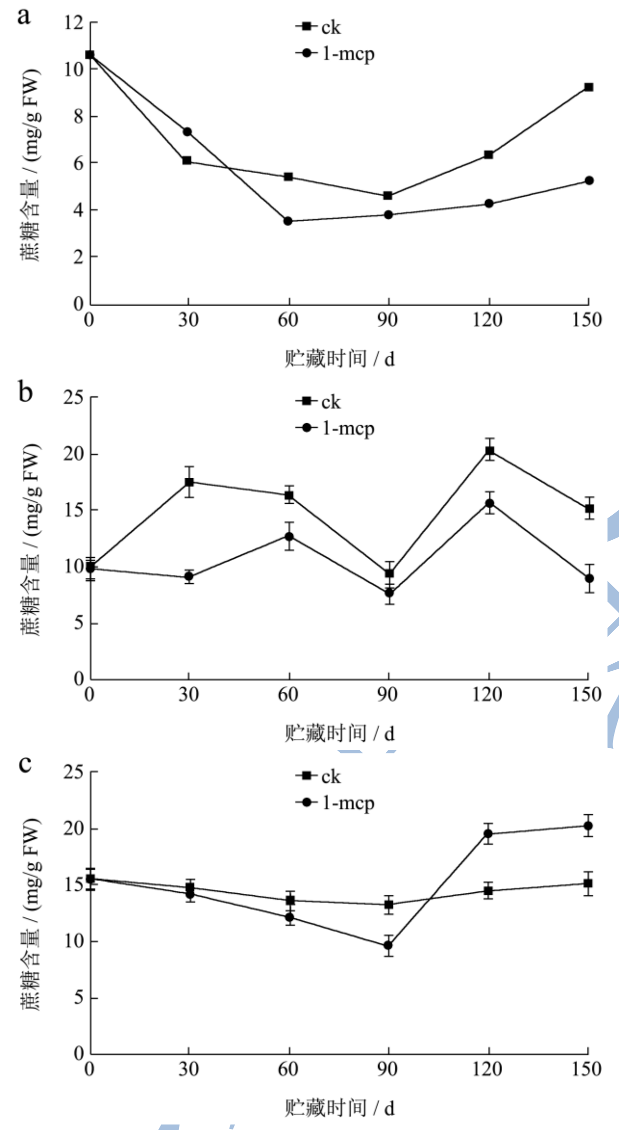



图 2 1-MCP 处理对不同采收期果实葡萄糖含量变化的影响

**Fig.2 Effect of 1-MCP treatment on changes of glucose content in different harvesting fruits**

## 2.3 1-MCP 处理对不同采收期果实果糖含量变化的影响

由图 3 可见，随着贮藏期的延长，不同采收期果实在整个贮藏期间果实果糖含量变化趋势均不相同，采期 I 对照组与处理组果实在整个贮藏期内出现两个峰值，且处理组果实与对照组均在贮藏第 30 d、90 d 出现峰值，处理组果糖含量峰值分别高于对照组 13.3 mg/g、16.8 mg/g。

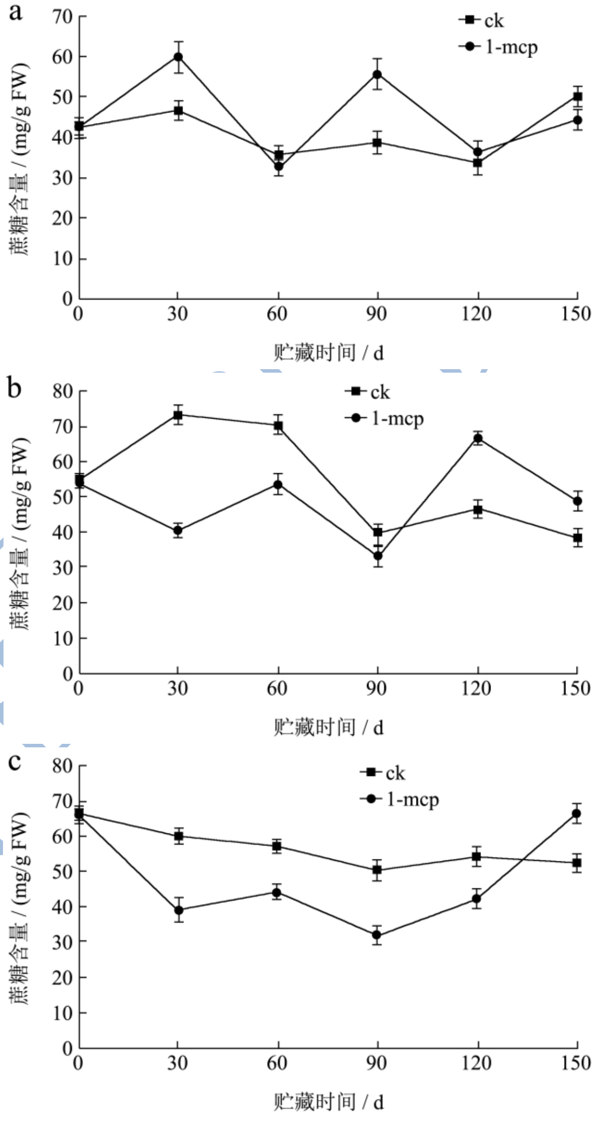



图 3 1-MCP 处理对不同采收期果实果糖含量变化的影响

**Fig.3 Effect of 1-MCP treatment on fruit fructose content in different harvesting periods**

在贮藏后期（120 d~150 d）处理组含量低于对照组；采期 II 处理组果实在整个贮藏期间对果实果糖含量的积累有明显的抑制作用，在贮藏 0~90 d 处理组与对照组果实果糖含量差异显著（$p<0.01$），在贮藏 90~150 d 内，处理组果实的果糖含量高于对照组，且在贮藏 120 d 时，处理组果实果糖含量达到整个贮藏期的峰值，高于对照组果实 30.3%，随后呈下降趋势，至贮藏结束处理组果实高于对照组 10 mg/g；采期III对照组果实果糖含量在整个贮藏期内平缓下降，处理组果实在贮藏 0~90 d 内呈下降趋势，但在贮藏 90 d

后果实果糖含量呈快速上升趋势，至贮藏结束果糖含量上升了34.38 mg/g；表明1-MCP处理可以抑制果实在贮藏过程中果糖含量的积累，但对不同采收期果实在贮藏前、中、后期的抑制效果不同，以采收期Ⅰ的后期（120~150 d）采收期Ⅱ的前期（0~60 d）采收期Ⅲ的前中期（0~120 d）最为显著（$p$<0.05）。

## 2.4 1-MCP处理对不同采收期果实山梨醇含量变化的影响

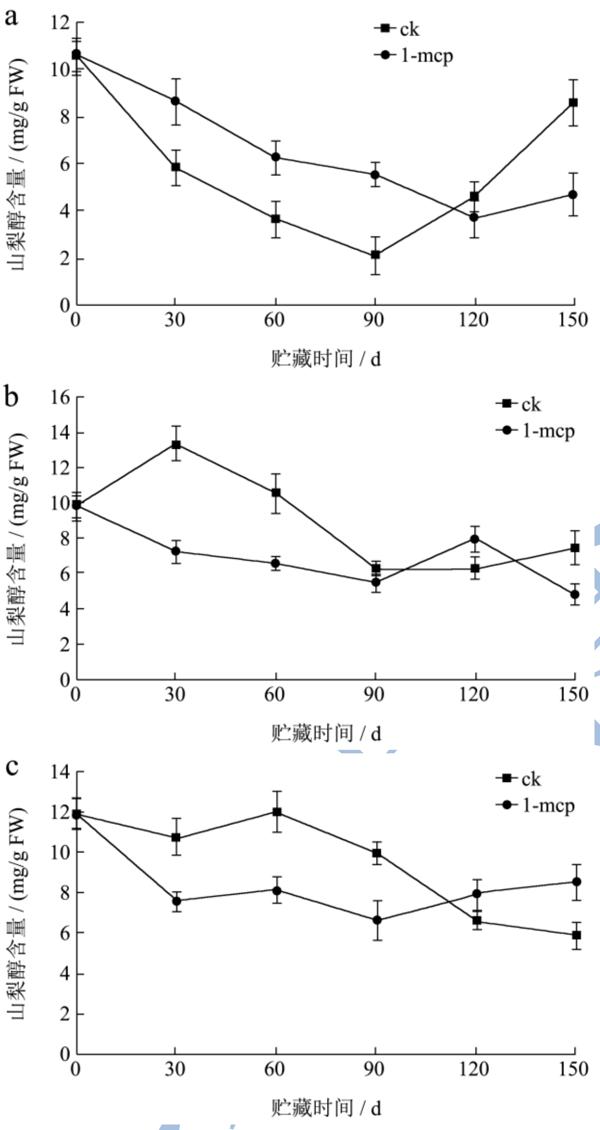



图4 1-MCP处理对不同采收期果实山梨醇含量变化的影响

**Fig.4 Effect of 1-MCP treatment on sorbitol content in fruits at different harvesting times**

由图4可见，在贮藏过程中，不同采收期果实的山梨醇含量变化呈现先下降后上升的趋势，以采期Ⅰ果实下降幅度最为显著（$p$<0.01），且采期Ⅱ对照组果实在贮藏0~30 d出现上升趋势后下降，采期Ⅰ处理组与对照组果实在贮藏前期山梨醇含量呈快速下降趋势，较处理组，对照组果实在贮藏0~90 d山梨醇含量平均比其低2.96 mg/g，贮藏90 d以后对照组果实山梨醇含量呈上升趋势，至贮藏结束对照组果实山梨醇含量比处理组果实山梨醇含量高3.85 mg/g；采期Ⅱ处理组果实在整个贮藏期内山梨醇含量变化趋势平稳，在贮藏期内平均山梨醇含量低于对照组果实，对照组果实在贮藏0~30 d内上升后呈下降趋势，采期Ⅲ处理组果实在贮藏0~90 d内山梨醇含量平均低于对照组3.5 mg/g，较其他两个采收期相比，至贮藏结束处理组果实山梨醇含量高于对照组，表面1-MCP处理可以抑制果实在低温贮藏过程中山梨醇含量的下降，但对成熟度较低的果实有相反作用。对采期Ⅱ和采期Ⅲ抑制效果较好，但至贮藏后期（120~150 d）1-MCP处理效果均有差异。

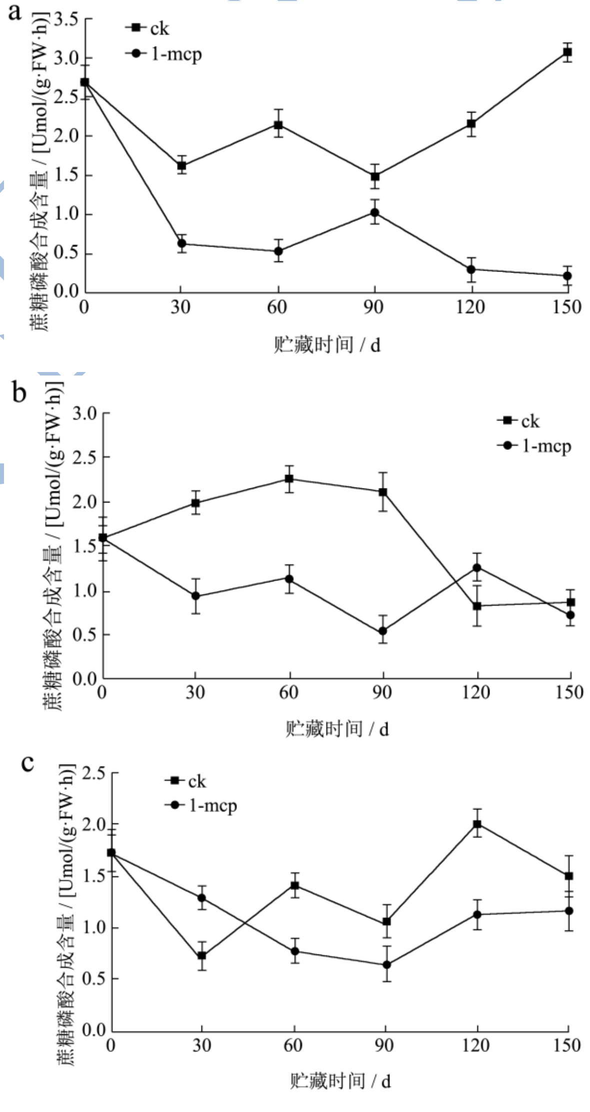



图5 1-MCP处理对不同采收期果实蔗糖磷酸合成酶活性的影响

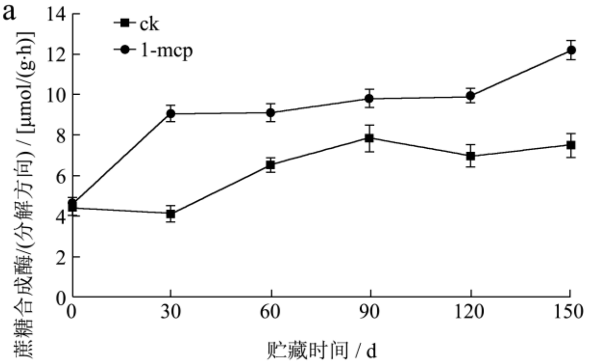
**Fig.5 Effect of 1-MCP treatment on sucrose phosphate synthase activity in different harvested fruits**

## 2.5 1-MCP 处理对不同采收期果实蔗糖磷酸合成酶活性的影响

由图 5 可见，随着贮藏期的延长，不同采收期果实在贮藏过程中蔗糖磷酸合成酶（SPS）活性变化趋势不同，采期 I 对照组果实在贮藏过程中 SPS 活性呈上升趋势，至贮藏结束，对照组果实 SPS 活性远高于处理组果实；采期 II 处理组果实 SPS 活性在贮藏 0~90 d 低于对照组，较对照组在贮藏 30 d、60 d、90 d 的酶活性，处理组果实酶活性分别只有对照组的 46.6%、46.7%、24.7%；采期III处理组果实 SPS 活性在贮藏 60~150 d 显著（$p<0.05$）低于对照组果实，但在贮藏前期（0~30 d）没有明显效果，表明 1-MCP 处理可以抑制不同采收期果实的 SPS 活性，对采收期 I 的果实 SPS 酶活性抑制效果较好，对于采期 II 的前中期（0~90 d）、采期III的中后期（60~150 d）同样有明显的抑制效果。

## 2.6 1-MCP 处理对不同采收期果实蔗糖合成酶（分解方向）活性的影响

由图 6 可见，随着贮藏期的延长，不同采收期果实 SS-C 活性在贮藏过程均呈上升趋势，采期 I 处理组果实在整个贮藏期 SS-C 活性均高于对照组，在贮藏 0~30 d 处理组果实 SS-C 酶活性迅速上升，而对照组果实则是缓慢下降，至贮藏 30 d 对照组果实酶活性仅为处理组果实酶活性的 44.3%；采期 II 果实在贮藏 0~60 d 内处理组与对照组果实酶活性差异不显著，至贮藏 60 d 后，差异明显（$p<0.01$），在贮藏 60~90 d 内对照组果实酶活性呈下降趋势，至贮藏 90 d 后酶活性逐渐上升，较对照组，处理组果实在贮藏 90 d 后呈先下降后上升趋势，且在贮藏 30~120 d 内酶活性均高于对照组；采期III处理组果实 SS-C 活性在贮藏 0~60 d 内酶活性低于对照组，在贮藏 90~120 d 内高于对照组。



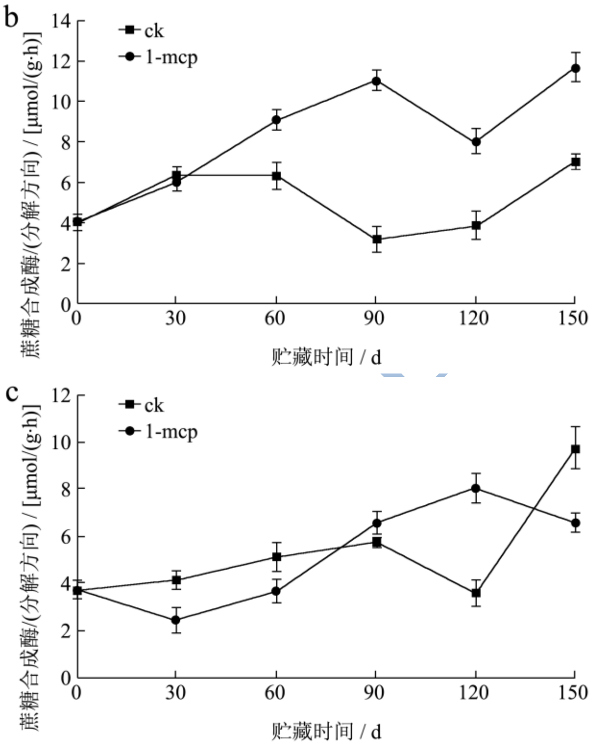




图 6 1-MCP 处理对不同采收期果实蔗糖合成酶（分解方向）活性的影响

**Fig.6 Effect of 1-MCP treatment on sucrose synthase (decomposition direction) activity in different harvesting periods**

比较其他两个采收期果实处理效果不明显，且至贮藏结束，对照组酶活性高于处理组果实酶活性；表明 1-MCP 处理在贮藏过程中可以提升果实的 SS-C 酶活性从而加快果实蔗糖含量的下降，对采收期 I 、采收期 II 、采收期III果实均有明显的效果。

## 2.7 1-MCP 处理对不同采收期果实蔗糖合成酶（合成方向）活性的影响

由图 7 可见，在贮藏过程中，随着贮藏期的延长，不同采收期果实 SS-S 活性变化趋势差异不明显，采期 I 处理组与对照组果实在贮藏过程中 SS-S 活性呈下降趋势，除贮藏 60 d 处理组果实 SS-S 酶活性低于对照组，在整个贮藏期内处理组果实 SS-S 活性均高于对照组，但差异不显著；采期 II 处理组果实 SS-S 酶活性除在贮藏 60 d 高于对照组，在整个贮藏期内 SS-S 酶活性均低于对照组，至贮藏结束（150 d），与对照组果实 SS-S 酶活性差异显著（$p<0.05$），处理组果实酶活性为对照组果实酶活性的 65.2%；采期III对照组果实在贮藏过程中呈重复的先下降后上升趋势，处理组较对照组在贮藏前期（0~60 d）和贮藏后期（120~150 d）抑制的果实 SS-S 的活性；表明 1-MCP 处理可以在

贮藏过程抑制果实在贮藏过程中 SS-S 的酶活性，且不同采收期间差异显著（$p<0.05$），以采期Ⅱ和采期Ⅲ效果明显。

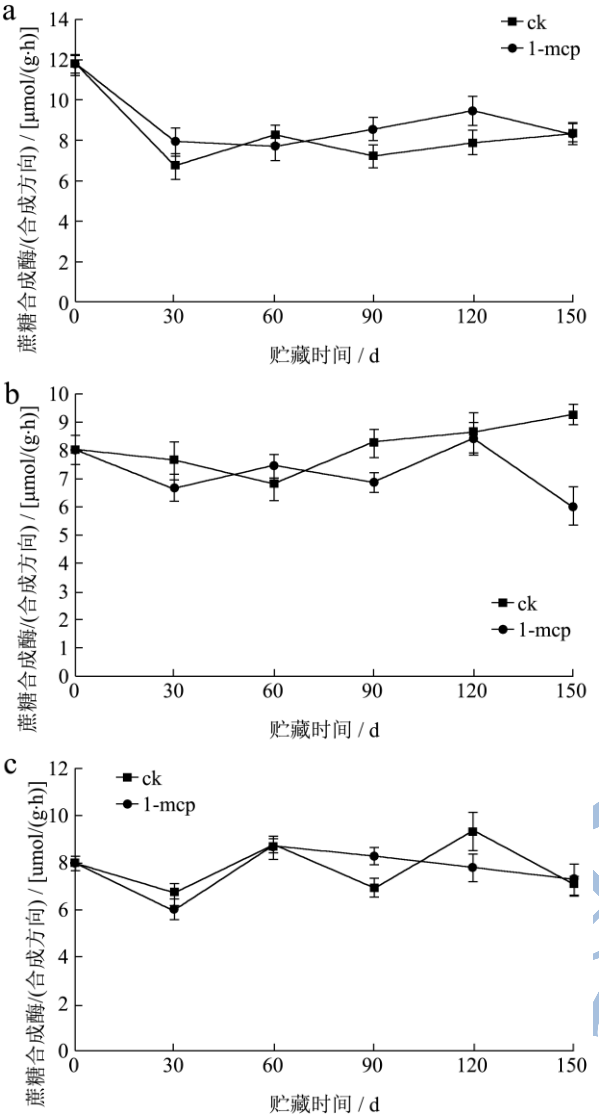



图 7 1-MCP 处理对不同采收期果实蔗糖合成酶（合成方向）活性的影响

**Fig.7 Effect of 1-MCP treatment on sucrose synthase (synthesis direction) activity at different harvest time**

## 2.8　1-MCP 处理对不同采收期果实酸性转化酶活性的影响

由图 8 可见，随着贮藏期的延长，不同采收期果实酸性转化酶（AI）活性在贮藏过程中呈上升趋势，采期Ⅰ处理组果实 AI 活性在整个贮藏期中显著高于对照组（$p<0.01$）且处理组果实 AI 活性在贮藏 0~30 d 内迅速升高，在贮藏 60 d 达到峰值后逐渐下降，对照组果实在贮藏 120 d 达到活性峰值，且活性为处理组的 77.3%；采期Ⅱ果实处理组果实 AI 活性在整个贮藏过程中低于对照组果实 AI 活性，在贮藏第 60 d、90 d、120 d 处理组果实 AI 活性仅为对照组活性的 84.5%、54.1%、51.9%；采期Ⅲ果实 AI 活性在贮藏过程中变化趋势同采期Ⅰ相似，在贮藏 0~90 d 处理组果实 AI 活性显著高于（$p<0.05$）对照组果实，但贮藏 90 d 后，差异不明显，至贮藏结束，处理组和对照组果实 AI 活性无明显差别；表明 1-MCP 处理可以改变贮藏过程中 AI 活性，且对不同采收期果实的效果不同，对采收期Ⅰ、Ⅲ为提升作用，而对采收期Ⅱ AI 活性为抑制作用。

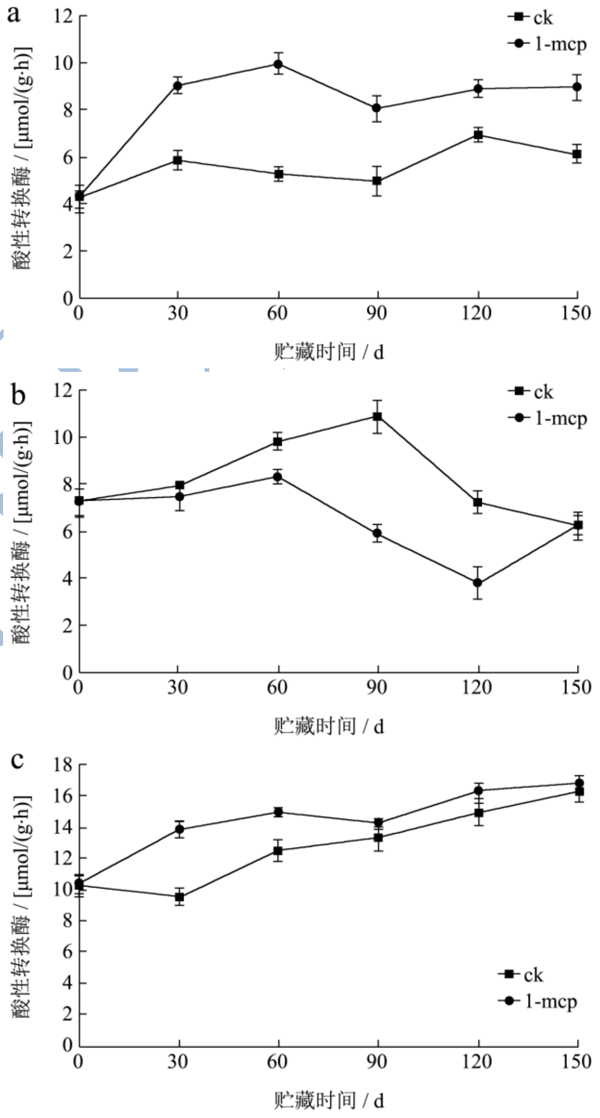



图 8 1-MCP 处理对不同采收期果实酸性转化酶活性的影响

**Fig.8 Effect of 1-MCP treatment on acid invertase activity at different harvest times**

## 2.9　1-MCP 处理对不同采收期果实中性转化酶活性的影响

由图 9 可见，不同采收期果实中性转化酶（NI）

活性在贮藏过程中呈先上升后下降的趋势，采期Ⅰ处理组果实 NI 活性在贮藏 0~150 d 内高于对照组果实，且在贮藏 60 d 时，对照组果实 AI 活性仅为处理组果实的 45.4%，在贮藏 90~150 d 内处理组与对照组果实 AI 活性变化趋势相同，较贮藏 0~90 d 差异不明显；采期Ⅱ处理组果实在贮藏 0~60 d 内表现为对 AI 活性的提升，但在贮藏 90~150 d 内表现为对 AI 活性的抑制，且抑制效果明显高于提升效果；采期Ⅲ处理组果实 AI 活性在贮藏 0~60 d 内同样高于对照组果实，但在贮藏 60 d 后与对照组果实相比呈交替上升趋势，至贮藏结束，处理组果实 AI 活性比对照组果实 AI 活性高 17%；表明 1-MCP 处理对不同采收期果实 AI 活性的表现上效果差异很大，但在贮藏 0~60 d 内均表现为提升 AI 活性，且效果明显，较采期Ⅰ与采期Ⅲ相比，至贮藏结束，采期Ⅱ果实 NI 活性较低。

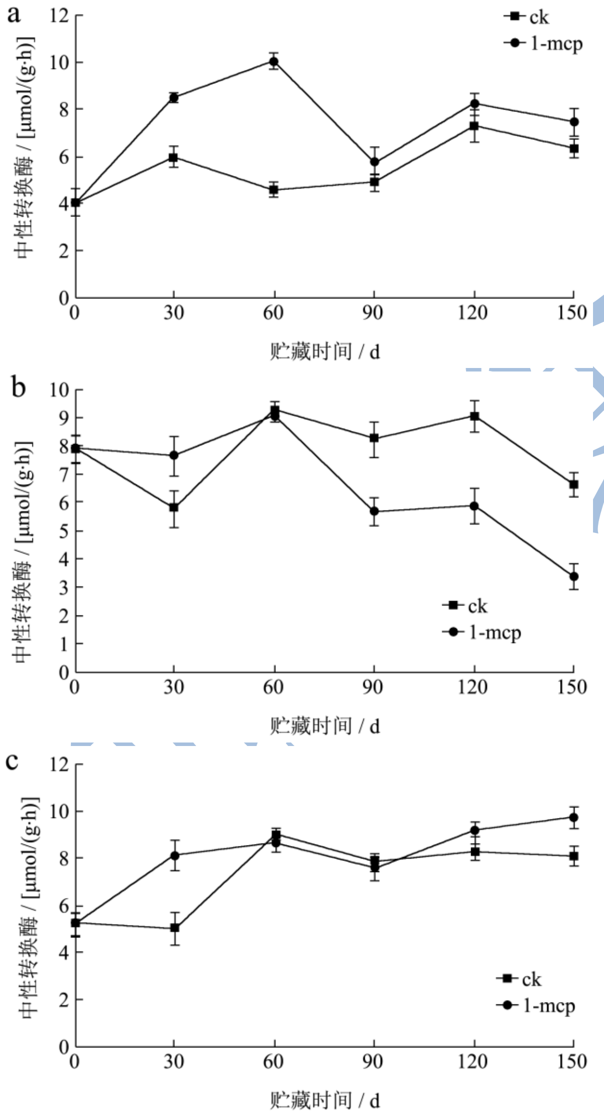



图 9 1-MCP 处理对不同采收期果实中性转化酶活性的影响

**Fig.9 Effect of 1-MCP treatment on the activity of neutral invertase in different harvested fruits**

## 2.10 1-MCP 处理对不同采收期果实山梨醇脱氢酶酶活性的影响

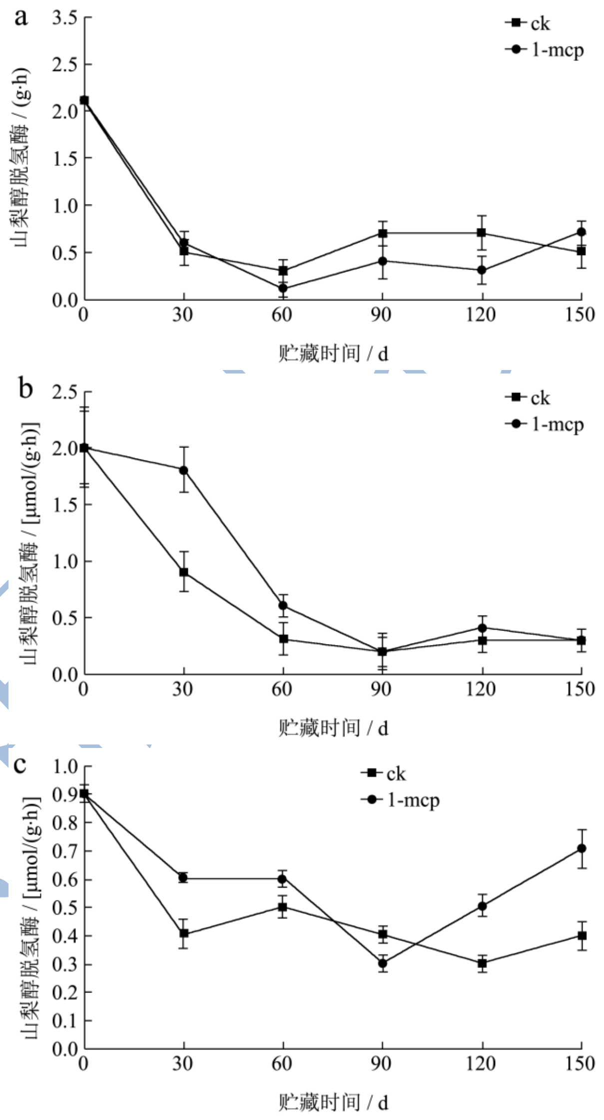



图 10 1-MCP 处理对不同采收期果实山梨醇脱氢酶酶活性的影响

**Fig.10 Effect of 1-MCP treatment on sorbitol dehydrogenase activity in different harvesting periods**

由图 10 可见，不同采收期果实山梨醇脱氢酶(SDH)活性在贮藏过程中呈下降趋势，采期Ⅰ1-MCP 处理组果实与对照组果实在贮藏前期（0~30 d）时活性差异不显著，从贮藏 60 d 后处理组 SDH 活性明显低于对照组果实 SDH 活性，至贮藏 150 d 处理组果实 SDH 活性高于对照组；采期Ⅱ1-MCP 处理组果实在整个贮藏过程中高于对照组，以贮藏 0~60 d 较为明显，贮藏 60 d 后差异不显著；采期Ⅲ处理组果实与对照组组果实在贮藏过程中 SDH 的活性高于采期Ⅰ和采期Ⅱ，且处理组果实较采期Ⅰ、采期Ⅱ处理组果实在贮藏过程中明显提升了贮藏过程中果实的 SDH 活性，

在贮藏 30 d、60 d、120 d、150 d 对照组果实 SDH 活性仅为处理组果实SDH活性的66.67%、83.33%、60%、57.14%；表明 1-MCP 处理对不同采收期果实在贮藏过程中 SDH 的活性影响效果不同，以对采期Ⅰ果实表现为抑制效果，对采期Ⅱ、采期Ⅲ果实表现为提升酶活性。

### 2.11 果实中糖含量与糖代谢相关酶活性的相关分析

在苹果整个贮藏过程中，富士苹果果实的可溶性糖含量与糖代谢相关酶活性的相关性表如表 1 所示。可以看出，在整个贮藏过程中，果实中的 SPS 活性与蔗糖含量的变化呈极显著的正相关且相关系数为 0.434**，与葡萄糖含量变化呈负相关性，与果糖和山梨醇含量的变化均呈正相关；在贮藏过程中，果实 SS-C 的活性与果实在贮藏过程中蔗糖、葡萄糖、果糖、山梨醇含量变化均呈显著的正相关性，与山梨醇含量变化呈极显著相关性，相关系数为 0.513**。果实 SS-S 活性与果实在贮藏过程中果实蔗糖、葡萄糖、山梨醇含量变化呈负相关性，与果糖含量变化呈显著的负相关性，相关系数为-0.854*；果实中酸性转化酶与中性转化酶活性变化与蔗糖含量及山梨醇含量变化均呈负相关性。

AI 活性变化与果实中葡萄糖含量含量变化呈显著的负相关性，相关系数为-0.375**，且与果糖含量变化呈正相关性，NI 活性变化与葡萄糖含量及果糖含量变化相关性相反，其与葡萄糖含量活性变化呈正相关，与果糖含量变化呈负相关。在贮藏过程中果实的 SDH 活性变化与果实果糖含量、山梨醇含量呈正相关性，且与蔗糖含量呈显著的正相关，与葡萄糖含量的变化呈负相关。

表 1 苹果贮藏过程中果实中可溶性糖与相关酶活性的相关分析

Table 1 Correlation analysis of soluble sugar and related enzyme activities in apple fruits during storage

| 富士 | 蔗糖磷酸合成酶 SPS | 蔗糖合酶分解方向 SS-C | 蔗糖合酶合成方向 SS-S | 酸性转化酶 AI | 中性转化酶 NI | 山梨醇脱氢酶 SDH |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 蔗糖 | 0.434** | 0.186* | -0.652 | -0.058 | -0.304 | 0.553* |
| 葡萄糖 | -0.385 | 0.428* | -0.019 | -0.375** | 0.021 | -0.406 |
| 果糖 | 0.583 | 0.409 | -0.854* | 0.139 | -0.115 | 0.267 |
| 山梨醇 | 0.511 | 0.513** | -0.66 | -0.05 | -0.476 | 0.448 |

注：相关显著水平：$p$<0.05（*），$p$<0.01（**）。

## 3 结论

3.1 1-MCP 作为一种高效的乙烯受体抑制剂被广泛应用在苹果、香蕉、桃和香梨等水果保鲜上，在商业化的应用上前进广泛，糖代谢是一个复杂的过程，目前人们对糖代谢开展了一些研究，但对采后经过保鲜剂处理后的果实糖代谢的研究还很缺乏。采收期是影响苹果在低温贮藏过程中的重要因素，本实验通过使用 1-MCP 对三个采收期果实进行熏蒸处理，发现 1-MCP 处理可以明显抑制不同采收期果实在低温贮藏过程中蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨醇含量的增加，且以前期表现较为明显，魏建梅等[13]对嘎拉苹果研究表明，1-MCP 处理在一定程度上抑制了果实在贮藏前期葡萄糖、果糖和蔗糖含量的增加与本实验结果相同。

3.2 蔗糖位于苹果果实细胞的细胞质和自由空间中，在贮藏过程中受到多种酶活性的调控，AI 和 NI 是两种主要起分解蔗糖作用的酶，在贮藏过程中中期采摘果实的 AI 和 NI 活性呈下降趋势，其他两个采收期果实在贮藏过程中 AI、NI 活性均呈逐渐上升后下降趋势，三个采收期果实的蔗糖含量在贮藏过程中均呈现下降趋势，由表 1 可见蔗糖含量的变化与 AI 和 NI 的活性变化呈现负相关性，但与 AI 活性的相关系数仅为-0.058，且差异不显著，蔗糖含量变化与 NI 活性的相关系数为-0.304，Stepansky 等[14]在甜瓜的研究上发现低酸性转化酶是蔗糖积累的前提条件，而较高的酸性转化酶活性有利于蔗糖的分解和己糖的积累，刘卫晓等[15]在对甘蔗研究上的结果与本实验相似，然而蔗糖的合成与分解并不仅仅受 AI 和 NI 活性的调控，果实采后蔗糖合成酶具有合成和分解蔗糖的双重属性[16]，在本实验中，蔗糖分解酶的总活性大于合成酶的总活性从而导致蔗糖含量下降，这与王君在采后黄冠梨的研究上结论相同[17]。本实验中蔗糖磷酸合成酶（SPS）和蔗糖合成酶（SS-S）在贮藏过程中表现对蔗糖合成的促进，Macrae 等[18]在对猕猴桃的研究上表明，随着果实进入后熟阶段，SPS 活性增加，蔗糖不断积累，蔗糖的积累与 SPS 活性的提高表现为显著的正相关，在本实验中蔗糖含量的变化与 SPS 活性变化同样表现为正相关，相关系数到达 0.434**，与 SS-S 活性相关系数为-0.652，陈美霞等[19]在研究杏果实蔗糖含量变化中也发现蔗糖的积累与蔗糖合成酶（SS）

和蔗糖磷酸合成酶（SPS）活性提高相关，在本实验中三个采收期果实 SPS 与 SS-S 活性主要呈下降趋势，且经 1-MCP 处理的果实 SPS 活性显著低于对照组，表明 SPS 与 SS-S 是影响阿克苏富士苹果蔗糖含量变化的重要酶，且 1-MCP 处理在贮藏过程中降低了 SPS 与 SS-S 的活性从而延缓了蔗糖含量的增加，这与 Moriguchi[20]在日本梨的研究上结果一致。

3.3 在本实验中，三个采收期果实的果糖含量均占总糖的比例最高，达到 54%，这与赵尊行[21]刘金豹[22]的研究结论相符，宋烨等[23]在瑞星苹果的研究上发现蔗糖含量占总糖的比例最高，表明不同品种苹果果实可溶性糖含量的差异明显，经 1-MCP 处理的果实在贮藏过程，不同采收期果实果糖含量在贮藏过程中影响效果差异显著，分析认为可能是成熟度差异造成这一影响，孙希生[24]等在金冠苹果上的研究表明，1-MCP 处理作用效果随果实成熟度增加而减弱，这与本实验对果糖含量在贮藏过程影响效果不同，分析认为可能是品种差异造成这一影响，Yamaki 等[25]对苹果在低温贮藏过程中的研究发现果实中果糖的增加与山梨醇脱氢酶活性的增强是相关的，而王永章等[26]对富士苹果的研究表明，红富士苹果在发育过程中果实果糖、葡萄糖的积累与 SS 活性显著相关，与 SPS 和 NI 活性无显著相关性，表明苹果果实在发育与贮藏过程中果糖含量的变化受到不同酶活性共同调控，在本实验中发现与果糖含量变化呈显著相关的酶为蔗糖合酶（SS-S），相关系数为-0.854*，NI 活性与果糖含量相关系数为-0.115 且与葡萄糖的相关系数仅为 0.021，而 1-MCP 处理对于不同采收期果实 NI 的活性影响效果也不同，表明 NI 对于果实果糖和葡萄糖的调控影响不显著。

3.4 山梨醇作为苹果叶片的主要光合同化产物，在苹果果实内只有分解没有从头合成的过程，在果实发育过程中，山梨醇在苹果果实内占可溶性碳水化合物的 3%~8%，但在叶片中达到 70%~80%，山梨醇由叶片进入果实后大部分在山梨醇脱氢酶和山梨醇氧化酶的作用下，催化转化为果糖和葡萄糖[3,27]，在本实验中，1-MCP 处理在贮藏过程中对 SDH 的调控表现为采收期Ⅰ抑制，采收期Ⅱ、Ⅲ提高，对不同采收期果实效果差异显著，山梨醇脱氢酶活性与山梨醇含量变化相关系数为 0.448，与蔗糖合成酶（SS-C）的相关系数达到 0.513**，分析认为是由于在果实贮藏过程中山梨醇含量受山梨醇脱氢酶催化转化为果糖，果糖含量出现上升趋势，果糖作为信号分子可能诱导了果实中 SS-C 的活性从而引起酶活性的升高，这与 Yamaki 的研究结果相符合，Suzuki 等[28]对 4 年生的富士苹果上同样研究表明，果糖含量变化与 SDH 活性变化在不同时期表现不同的相关性，且以前期表现为相关，后期表现为不相关。这与本实验果糖含量与山梨醇活性在贮藏前期的变化趋势相符合。

3.5 本实验通过对贮藏过程中果实蔗糖、葡萄糖、果糖和山梨醇含量的测定，以及对糖代谢相关酶活性的测定，发现 1-MCP 处理对贮藏过程中可溶性糖含量的影响效果显著，对酶活性的调控明显，进一步表明，果实可溶性糖作为呼吸消耗代谢的能量和底物，1-MCP 作为乙烯受体抑制剂通过调控呼吸调节了糖代谢相关酶活性，从而延缓了果实糖代谢的进程以达到延缓果实品质的下降，在今后的研究中，应多从分子水平探讨糖代谢相关酶在采后果实中作用，为果实品质改善提供可行方式，并能在实际中得到运用。

## 参考文献


[1] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2015
Xinjiang Uyghur Autonomous Region Statistics Bureau. Xinjiang Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015

[2] 王永章,张大鹏.乙烯对成熟期新红星苹果果实碳水化合物代谢的调控[J].园艺学报,2000,27(6):391-395
WANG Yong-zhang, ZHANG Da-peng. Regulation of ethylene on the metabolism of carbohydrates in apple trees during the ripening period [J]. Chinese Journal of Horticulture, 2000, 27(6): 391-395

[3] 吕英民,张大鹏.果实发育过程中糖的积累[J].植物生理学报,2000,36(3):258-265
LV Ying-min, ZHANG Da-peng. Sugar accumulation during fruit development [J]. Plant Physiology Letters, 2000, 36(3): 258-265

[4] Beruter J, Studer Feusi M E, Ruedi P. Sorbitol and sucrose partitioning in the growing apple fruit [J]. Plant Physiol, 1997, 151: 269-276

[5] 何德良.1-MCP 在蔬菜贮藏保鲜中的应用[J].保鲜与加工,2007,7(1):45-48
HE De-liang. Application of 1-MCP in storage and preservation of vegetables [J]. Fresh Keeping and Processing, 2007, 7(1): 45-48

[6] 孙思胜,杨耀洲,李雯.1-MCP 在果品贮藏保鲜上的应用[J].安徽农业科学,2009,37(30):14871-14872
SUN Si-sheng, YANG Yao-zhou, LI Wen. Application of 1-MCP in preservation of fruits [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(30): 14871-14872

[7] 谢季云,赵晓敏,汪永琴,等.1-MCP 处理对不同采收期阿克苏红富士苹果贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2017, 38(24):292-296,307
XIE Ji-yun, ZHAO Xiao-min, WANG Yong-qin, et al. Effect of 1-MCP treatment on storage quality of aksu red fuji apple in different harvest periods [J]. Food Industry Technology, 2017, 38(24): 292-296, 307
[8] 王艳颖.高效液相色谱-蒸发光散射法测定苹果中可溶性糖的含量[J].食品与发酵工业,2008,34(6):129-131
WANG Yan-ying. Determination of soluble sugar content in apple by high performance liquid chromatography-evaporation light scattering method [J]. Food and Fermentation Industry, 2008, 34(6): 129-131
[9] 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
[10] Patricia T. Tomlinson. Sucrose-metabolizing enzymes in transport tissues and adjacent sink structures in developing citrus fruit [J]. Plant Physiology, 1989, 90(4): 1394-1402
[11] Yamaguchi H, Kanayama Y, Yamaki S. Purification and properties of NAD-dependent sorbitol dehydrogenase from apple fruit [J]. Plant and Cell Physiology, 1994, 35(6): 887-892
[12] 王惠聪,黄辉白,黄旭明.荔枝果实的糖积累与相关酶活性[J].园艺学报,2003,30(1):1-5
WANG Hui-cong, HUANG Hui-bai, HUANG Xu-ming. Sugar accumulation and related enzyme activity in litchi fruit [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003, 30(1): 1-5
[13] 魏建梅,齐秀东,闫芳教.采后'嘎拉'苹果果实糖和淀粉代谢及关键酶基因表达特性[J].北方园艺,2015,19:126-131
WEI Jian-mei, QI Xiu-dong, YAN Fang-jiao. Sugar and starch metabolism and gene expression characteristics of key enzymes in postharvest 'Gala' apples [J]. Northern Horticulture, 2015, 19: 126-131
[14] Asya Stepansky, Kovalski I, Schaffer A A, et al. Variation in sugar levels and invertase activity in mature fruit representing a broad spectrum of *Cucumis melo* genotypes [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 1999, 46(1): 53-62
[15] 刘卫晓,茅林春.甘蔗采后冷藏过程中品质及生理变化[J].亚热带农业研究,2000,3:20-23
LIU Wei-xiao, MAO Lin-chun. Quality and physiological changes during sugarcane postharvest refrigeration [J]. Subtropical Agriculture Research, 2000, 3: 20-23
[16] 郭艳利,杨肖芳,蒋黎,等.蔗糖代谢相关酶与果实糖代谢[J].现代园艺,2012,9:10-12
GUO Yan-li, YANG Xiao-fang, JIANG Li, et al. Sucrose metabolic enzymes and fruit sugar metabolism [J]. Modern Horticulture, 2012, 9: 10-12
[17] 王君,李磊,谢冰,等.采后黄冠梨果实糖代谢及相关酶活性变化规律[J].食品科学,2010,31(18):390-393
WANG Jun, LI Lei, XIE Bing, et al. Changes in sugar metabolism and related enzyme activities in Huangguan pear fruit after harvest [J]. Food Science, 2010, 31(18): 390-393
[18] Macrae E, Quick W P, Benker C, et al. Carbohydrate metabolism during postharvest ripening in kiwifruit [J]. Planta, 1992, 188(3): 314-323
[19] 陈美霞,陈学森,慈志娟,等.杏果实糖酸组成及其不同发育阶段的变化[J].园艺学报,2006,33(4):805-808
CHEN Mei-xia, CHEN Xue-sen, CI Zhi-juan, et al. Changes of sugar acid composition and different development stages of apricot fruits [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(4): 805-808
[20] Moriguchi T, Abe K, Tanaka K, et al. Polyuronides changes in Japanese and Chinese pear fruits dur ing ripening on the tree [J]. Engei Gakkai Zasshi, 2008, 67(3): 375-377
[21] 赵尊行,孙衍华,黄化成.山东苹果中可溶性糖、有机酸的研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),1995,3:355-360
ZHAO Zun-hang, SUN Yan-hua, HUANG Hua-cheng. Study on soluble sugar and organic acid in apple of Shandong province [J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1995, 3: 355-360
[22] 刘金豹.加工苹果果实中糖酸和酚类物质研究[D].泰安:山东农业大学,2004
LIU Jin-bao. Research on sugar acid and phenols in apple fruit [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2004
[23] 宋烨,刘金豹,王孝娣,等.苹果加工品种的糖积累与蔗糖代谢相关酶活性[J].果树学报,2006,23(1):1-4
SONG Ye, LIU Jin-bao, WANG Xiao-di, et al. Sugar accumulation and sucrose metabolism related enzyme activities in apple processed varieties [J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(1): 1-4
[24] Fan X T, Blankenship S M, Mattheis J P. 1-methycyclopropene inhibits apple ripening [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1999, 124(6): 690-695
[25] Yamaki S. Roles of four sorbitol related enzymes and invertase in the seasonal alteration of sugar metabolism in apple tissue [J]. J. Amer. Soc. Hort. Sci, 1986, 111(1): 1
[26] 王永章,张大鹏.'红富士'苹果果实蔗糖代谢与酸性转化酶

和蔗糖合酶关系的研究[J].园艺学报,2001,28(3):256-261
WANG Yong-zhang, ZHANG Da-peng. Relationship between sucrose metabolism and acid invertase and sucrose synthase in the fruit of 'Red Fuji' apple [J]. Chinese Journal of Horticulture, 2001, 28(3): 256-261

[27] Yamada K, Oura Y, Mori H, et al. Cloning of NAD-dependent sorbitol dehydrogenase from apple fruit and gene expression [J]. Plant and Cell Physiology, 1998, 39(12): 1375-1375

[28] Suzuki, Yoko, Odanaka S, et al. Fructose Content and fructose-related enzyme activity during the fruit development of apple and Japanese pear [J]. Engei Gakkai Zasshi, 2001, 70(70): 16-20

现代食品科技