

模拟运输振动对新疆杏呼吸途径和品质的影响

潘 俨¹, 车凤斌¹, 董成虎¹, 张 辉², 孟新涛¹, 张 婷¹

(1. 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 乌鲁木齐 830091;

2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 通过建立与实际冷藏运输相近的三轴向模拟运输振动条件和温度条件, 比较振动果实与静置果实不同途径呼吸速率及品质因子的差异和关联, 探知运输振动诱导鲜杏品质劣变的可能途径。以七成熟的小白杏为材料, 3℃环境使用振动平台模拟与冷藏车实际运输过程三轴向振动强度重叠率 57.60%~67.75% 的模拟条件处理果实。观测 3 d 模拟运输和冷藏货架期间, 果实不同途径呼吸速率、硬度、可溶性固形物含量、表面色值与等温条件静置下果实的差异。与静置鲜杏相比, 模拟运输鲜杏总呼吸峰提前 8 d、峰值提高 3.26 倍, 三羧酸循环途径 (tricarboxylic acid cycle) 呼吸峰提前 3 d、峰值提高 1.22 倍, 糖酵解途径 (Embden-Meyerhof-Parnas) 和细胞色素途径 (cytochrome pathway) 的呼吸速率提高 4.62 倍和 9.64 倍, 磷酸戊糖途径 (phosphopentose pathway) 呼吸峰提前 9 d。振动果实硬度偏低 13.18%~19.34%, 可溶性固形物含量偏高 12.26%~27.15%, 色彩饱和度相对增加 7.09 倍~11.49 倍, 果色转黄 3.82。模拟运输振动果实的呼吸主路径由三羧酸循环途径转换为糖酵解途径, 电子传递主链由交替途径 (alternative pathway) 转换为细胞色素途径 (cytochrome pathway), 加快了冷藏鲜杏的后熟劣变。研究结果为鲜杏冷链物流品质调控技术的研发提供参考。

关键词: 水果; 振动; 品质控制; 模拟运输; 新疆杏; 呼吸途径

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.03.044

中图分类号: S609⁺.3; S662.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-03-0325-07

潘 俨, 车凤斌, 董成虎, 等. 模拟运输振动对新疆杏呼吸途径和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 325—331.

Pan Yan, Che Fengbin, Dong Chenghu, et al. Effects of simulated transport vibration on respiratory pathways and qualities of Xinjiang apricot fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 325—331. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

新疆杏属普通杏 (*Prunus armeniaca* L.) 中亚品种群 (Central Asian), 据新疆林果办统计, 至 2013 年栽培面积有 $1.82 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 挂果面积 $1.55 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 年产量 $1.68 \times 10^7 \text{ t}$ 。新疆杏多数光滑无毛、离核、甜仁, 果肉品质好。但新疆杏不仅因呼吸跃变后熟劣变快, 还因皮薄、多汁、比表面积大, 易擦伤、碰伤, 采收运输易快速软腐褐变。果实成熟度越高, 采后机械伤越多、越重。即使在生理成熟期采收, 常温条件的公路短途运输后鲜杏仅有 2 d 的货架期^[1]; 航空物流机械损伤少、配送快, 但成本高、总运量少, 无法提供低温贮藏条件, 难以解决新疆每年近 $2.00 \times 10^7 \text{ t}$ 鲜杏成熟集中、量大难销的问题, 超过 95% 的鲜杏只能在产区干制加工。虽然近 5 a 针对新疆杏的品种耐贮性、冷藏条件、包装方法等开展过有关研究^[1-5], 但鲜杏采后硬度降低、风味褪减、果皮擦伤加深等商品率显著降低的具体途径尚不明确。运输振动是导致果实采后机械损伤、提高果实呼吸强度、加快呼吸

跃变和品质劣变的重要原因之一^[6]。呼吸是一个复杂的能量代谢过程, 调控途径包括糖酵解和三羧酸循环主路径以及磷酸戊糖途径等支路, 经过多途径的电子传递链合成能量或释放热量^[7]。运输振动提高了跃变型核果的呼吸强度, 但具体由何种呼吸途径响应、并诱导品质后熟劣变加快的机理还尚不清楚, 也难以作为果实采后运输品质调控和降低软腐损耗的应用技术研发提供进一步的依据和基础。本文以新疆杏较为典型的鲜食品种—小白杏为材料, 通过建立与实际冷藏运输相近的三轴向振动和温度条件, 比较振动果实与静置果实不同途径呼吸速率及品质因子差异, 探知运输振动诱导鲜杏品质劣变的可能途径, 为鲜杏冷链物流技术的研发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材 料

以七成熟小白杏为试验材料, 平均单果质量为 $(15.10 \pm 2.00) \text{ g}$ 。采收地点为轮台县杏产业技术示范园 ($41^\circ 48' 43.29'' \text{E}$, $84^\circ 11' 45.53'' \text{N}$)。2013 年 6 月 15 日田间采收和包装过程选择果面底色为绿黄色或黄色果实共 1.50 t, 剔除机械伤果、青果和熟果。使用 20 kg 周转筐包装, 采后即在产地冷库预冷至 10°C ; 6 月 16 日载入冷藏车、车内堆码 5 层, 由轮台县约 12 h 冷藏 (10 ± 1) $^\circ \text{C}$ 运输至乌鲁木齐市新疆农业科学院试验冷库。库内货架铺放, 设置贮藏温度 (3 ± 1) $^\circ \text{C}$ 。试验库内每 6.0 kg 杏用

收稿日期: 2014-12-19 修订日期: 2015-01-01

基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAD27B01) 和新疆自治区重大专项 (201130102-4) 联合资助。

作者简介: 潘 俨, 男 (汉), 新疆人, 副研究员, 主要从事农产品贮藏保鲜研究。乌鲁木齐 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 830091。

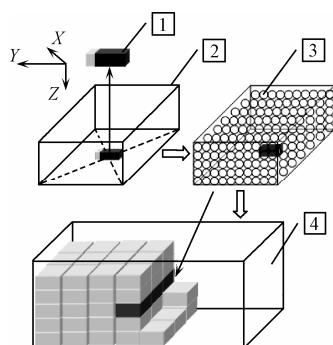
Email: panyan1509@163.com

PE 袋二次分包放入周转筐, 以保持袋内相对湿度 $85\% \pm 5\%$ 、避免果实干耗失水, 再用于冷藏运输模拟试验。

1.2 方法

1.2.1 运输条件

试验车辆为庆铃厢式冷藏车, 额定载质量 2.0 t。鲜杏载量 60 件、约 1.50 t; 途经连霍/G30、吐和/G3012 高速公路运输, 平均时速约 60 km/h。在鲜杏周转筐的底部 (0° 平面) 固定 DT-178A Mini 型三维振动记录仪 (深圳华盛昌机械公司), 每隔 2.0 s 采集实际行驶途中 X (左右)、Y (前后) 和 Z (上下) 三轴向振动加速度数据 (图 1)。



1. DT-178A Mini 型三维振动记录仪 2. 周转筐 3. 填装鲜杏 4. 冷藏车货柜
1. DT-178A type 3-dimensional (3D) acceleration recorders 2. Crate 3. Loaded fruit 4. Container of refrigerated truck

图 1 振动记录仪放置流程

Fig.1 Laying process of acceleration recorders in refrigerated truck

1.2.2 处理设置

试验库 (3 ± 1) $^\circ\text{C}$ 环境内设置模拟运输振动和静置 2 个处理。模拟运输振动使用三轴向振动平台 (新疆农业大学食品与药品学院试制设备), 通过平台水平与垂直轴向的 2 个电机转动偏心轮, 实现平台前后、左右和上下 3 个方向的激振。将处理果实的周转筐载放平台、货运扎袋捆扎固定后, 开启振动平台的电机; 对平台 2 个电机的变频器从 0~8.0 Hz 每隔 5 min 调增振动频率 1.0 Hz。通过平台上固定的三维振动记录仪, 每隔 50 ms 采集平台振动 5 min 内的三轴向振动加速度数据分析, 直至平台的振动强度接近冷藏车高速公路实际行驶过程顶层堆放鲜杏的三轴向振动强度, 以该振动强度连续处理果实 3 d; 模拟运输 3 d 后, 在等温冷藏货架 17 d (运贮累计 20 d)。静置处理的果实在库内货架上堆码贮藏 20 d。2 个处理各使用材料 120 kg。模拟运输 3 d 内每天取样 2 个处理的果实 1 次; 模拟运输结束、静态贮藏期内每 5 d 取样 2 个处理的果实 1 次。

1.2.3 检测指标

氧电极法测定每次取样果实的总呼吸 (total respiration) 速率、糖酵解途径 (Embden-Meyerhof-Parnas, EMP)、三羧酸循环途径 (tricarboxylic acid cycle, TCAC)、磷酸戊糖途径 (phosphopentose pathway, PPP)、交替途径 (alternative pathway, AP)、细胞色素途径 (cytochrome

pathway, CP) 的呼吸速率; 使用仪器为 Oxygtherm 型 Clark 液相氧电极仪 (英国汉莎公司), 测定和计算方法参考史青纯的方法^[8], 从 40~50 个样果中单果扁平果面处割取约 1 cm 厚肉瓣, 切成 3 mm×3 mm 碎块、悬浮于 20 mmol/L pH 值 7.4 的磷酸钾缓冲液中 5 min 后, 称取 2.5~3.0 g 放入氧电极仪的反应室, 反应温度 (25.0 ± 0.1) $^\circ\text{C}$, 转速 85 r/min; 通过加入浓度为 10 mmol/L 正磷酸、10 mmol/L 氟化钠、50 mmol/L 丙二酸、1 mmol/L 氰化钾和 3 mmol/L 水杨基氧肟酸, 分别抑制磷酸戊糖途径、糖酵解途径、三羧酸循环、细胞色素途径和交替途径的呼吸, 测定 5 min 内果肉材料的不同途径耗氧速率, 以及占总呼吸速率的比例。模拟运输结束后, 每隔 5 d 取样处理果实测定硬度、可溶性固形物、表面色值。GY-4 型数显果实硬度计 (浙江托普仪器公司) 测定杏侧面去皮果肉的硬度, WYT-4 型数显折光糖度仪 (浙江托普仪器公司) 测定果肉可溶性固形物 (计算温度补充系数), WSC-2 型色差计 (北京光学仪器厂) 测定果实侧面的色度 h 和饱和度 C 。

1.2.4 数据统计

对 DT-178A Mini 型振动记录仪采集的正、负 (相同纬度的两轴向) 加速度数值转换为正数, 通过 SPSS 20.0 软件的描述性检验工具, 统计不同振动加速度的频率。选择频率大于 100 次的加速度数组计算有效比例和平均值; 使用 Sigma Plot 12.0 软件制图并计算分析实际冷藏运输与模拟运输的振动加速度重叠率, 从而评价模拟运输振动条件的准确度。

通过 SPSS 20.0 软件的回归分析工具, 对采后至贮藏 20 d 内、模拟运输与静置果实的总呼吸速率与 EMP、TCAC、PPP 的呼吸速率进行线性回归; 总呼吸速率与 CP 和 AP 呼吸速率线性回归。根据回归系数确定不同处理果实的呼吸主路径和电子传递主链。

计算模拟运输 3 d 期间, 振动果实与静置果实不同途径呼吸速率的相对变化量。计算贮藏 10 d 期间, 振动果实与静置果实硬度、可溶性固形物含量、色彩饱和度 C 、色度 h 的相对变化量。通过果实不同途径呼吸速率的相对变化量与品质因子相对变化量的相关性检验结果, 分析模拟运输振动对鲜杏呼吸与品质的关联性影响。

2 结果与分析

2.1 模拟运输振动与实际运输振动强度的差异

最终选择模拟振动平台在水平和垂直方向的工作振动频率均为 5.0 Hz。与鲜杏实际冷藏运输振动相比, X 轴向模拟运输 0.01~0.05 g 振动加速度的频率偏高, 0.05~0.10 g 振动频率偏低; 振动加速度均值为 0.03 g, 比实际运输偏低约 49.15%, 模拟与实际运输振动加速度有效比例的重叠率为 67.75% (表 1, 图 2a)。

Y 轴向模拟运输 0.02~0.08 g 振动的频率偏高, 0.01~0.03 g 振动频率偏低; 振动加速度均值为 0.05 g, 比实际运输振动强度偏高约 28.21%, 模拟与实际运输振动加速度有效比例的重叠率为 57.60% (表 1, 图 2b)。

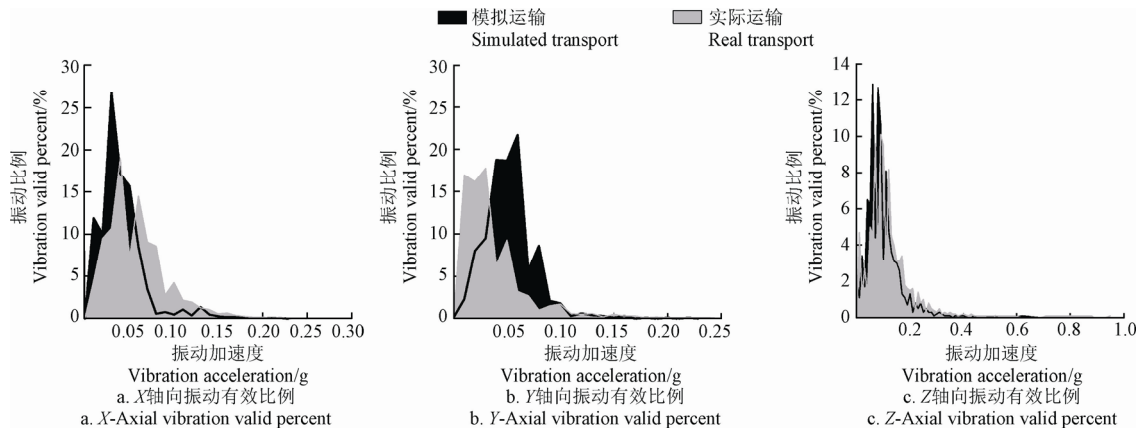


图 2 模拟运输与实际运输 X、Y、Z 轴向振动有效比例的差异

Fig.2 Differences of X-Axial, Y-Axial and Z-Axial vibration valid percent between real transport and simulated transport.

Z 轴向模拟运输 0.04~0.13 g 振动的频率偏高；振动加速度均值为 0.081 g，比实际运输振动强度偏高约 34.94%，模拟与实际运输振动加速度有效比例的重叠率为 66.55%（表 1，图 2c）。模拟运输 X、Y、Z 三轴向的低强度振动频率更为集中，X 和 Z 轴向的振动特征相对接近实际运输。

鲜杏冷藏模拟运输三轴向的振动加速度特征分布，与实际冷藏运输的振动吻合度最高为 67.75%。垂直方向的振动强度明显高于水平方向，与相关模拟振动研究的强度特征较为接近^[9-13]；受实际运输过程载运果实种类、路况、变速和变向行驶实时动态变化的影响，振动加速度变化范围较大^[14]，是实际运输振动特征重现和仿真的难点。

表 1 鲜杏实际运输与模拟运输的振动强度差异

Table 1 Difference between real transport and simulated transport in apricots vibration accelerations.

轴向 Axial	运输方式 Manner of transport	加速度均值 Means of Acceleration/g	重叠率 Overlay percent/%
X-Axial Lateral	实际 Real	0.059	67.75
	模拟 Simulated	0.030	
Y-Axial Longitudinal	实际 Real	0.039	57.60
	模拟 Simulated	0.050	
Z-Axial Vertical	实际 Real	0.125	66.55
	模拟 Simulated	0.081	

2.2 模拟运输振动对鲜杏不同途径呼吸的影响

2.2.1 模拟运输振动对鲜杏总呼吸速率、糖酵解途径、三羧酸循环和磷酸戊糖途径呼吸速率的影响

图 3a 显示，静置鲜杏冷藏 2 d 内总呼吸速率降至最低 31.24 nmol/(mg·min)，贮藏 10 d 回升至峰值 70.74 nmol/(mg·min)。模拟运输鲜杏振动 2 d 后，果实总呼吸速率升高至 301.44 nmol/(mg·min)，较采收时（145.29 nmol/(mg·min)）升高 1.07 倍，是静置果实贮藏 10 d 时呼吸峰的 4.26 倍；振动第 3 天总呼吸速率明显回落，至贮藏 20 d 总呼吸保持约 40 nmol/(mg·min)较低水平。鲜杏呼吸峰提前 8d，缩短冷藏商品期约 53%。

图 3b 显示，模拟运输振动 2 d 后，果实糖酵解途径（EMP）的呼吸速率升高至 58.91 nmol/(mg·min)，较采收时（20.48 nmol/(mg·min)）升高 1.88 倍，比鲜杏静置 2 d 时呼吸速率（10.48 nmol/(mg·min)）提高 4.62 倍。振动第 3 天时 EMP 途径呼吸速率明显回落，20 d 贮期内基本保持约 10 nmol/(mg·min)较低水平呼吸，与静置鲜杏的 EMP 途径呼吸速率相近（ $P>0.05$ ）。

图 3c 显示，模拟运输振动 2 d 后，果实三羧酸循环（TCAC）的呼吸速率升至峰值 34.93 nmol/(mg·min)，较采收时（3.18 nmol/(mg·min)）升高 9.98 倍。振动处理结束后、至贮藏第 15 天呼吸速率降至约 5.0 nmol/(mg·min)较低水平。静置鲜杏在贮藏 3~5 d 时出现 TCAC 的呼吸峰值（15.75 nmol/(mg·min)），模拟运输鲜杏比静置鲜杏 TCAC 呼吸峰提前约 3 d、峰值高 1.22 倍；静置鲜杏贮藏 10~15 d 保持 5.0 nmol/(mg·min)较低水平。

图 3d 显示，模拟运输振动 1 d 时，果实出现磷酸戊糖途径（PPP）呼吸速率峰值 45.55 nmol/(mg·min)，较采收时（13.25 nmol/(mg·min)）升高 2.44 倍。振动 2 d 时 PPP 呼吸速率快速下降，贮藏 5~20 d 呼吸速率保持约 5.0 nmol/(mg·min)较低水平。静置鲜杏在贮藏 10 d 时出现 PPP 途径呼吸峰，峰值与模拟运输果实基本一致，但振动果实的呼吸峰相对提前 9 d。

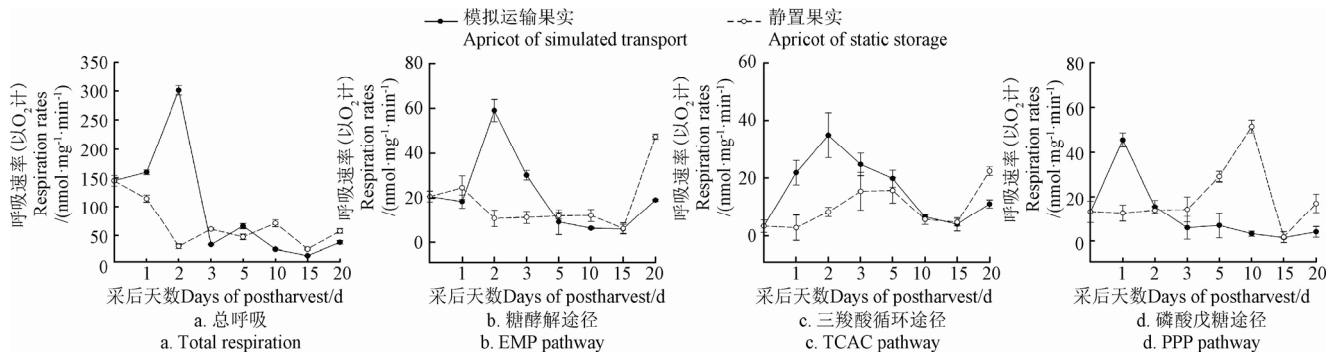
2.2.2 模拟运输振动对鲜杏细胞色素途径和交替途径呼吸速率的影响

图 4a 显示，模拟运输振动当天，果实细胞色素途径（CP）呼吸速率快速升高，模拟振动 2d 时达到峰值 98.42 nmol/(mg·min)，较采收时（32.80 nmol/(mg·min)）高 2.00 倍，比鲜杏静置 2 d 时呼吸速率（9.25 nmol/(mg·min)）高 9.64 倍。振动 3d 时 CP 呼吸速率快速下降，贮藏 5~20 d 呼吸速率保持约 7.5 nmol/(mg·min)较低水平。静置鲜杏贮藏 1~15 d，果实 CP 呼吸速率直线下降至 3.0 nmol/(mg·min)较低水平。CP 途径的细胞色素氧化酶（cytochrome oxidase）对低温敏感，低温应导致 CP 呼吸受抑制^[15-16]，但鲜杏受振动诱导 CP 在低温条件下激升明显。

图 4b 显示，3℃ 条件下果实的交替途径（alternative pathway）呼吸速率由 74.27 nmol/(mg·min)直线下降，贮

藏 15 d 降至最低 2.16 nmol/(mg·min); 模拟运输果实和静置果实在 3d 处理期、20d 贮期内交替呼吸途径呼吸保持相近的水平 ($P>0.05$)。交替呼吸是果实后熟过程诱导

表达、启动呼吸跃变的电子传递主途径^[17]。模拟振动未对七成成熟鲜杏的交替呼吸产生显著的影响, 与鲜杏采收时成熟度略高有关。



注: 1~3 d 为模拟振动的处理时间, 以下相同。

Note: 1~3 d are duration of simulation runs, following the same.

图 3 模拟运输与静置鲜杏贮期总呼吸、糖酵解、三羧酸循环、磷酸戊糖途径呼吸速率的差异

Fig.3 Difference between simulated transport and static storage in total respiration rates, in EMP respiration rates, in TCAC respiration rates and in PPP respiration rates

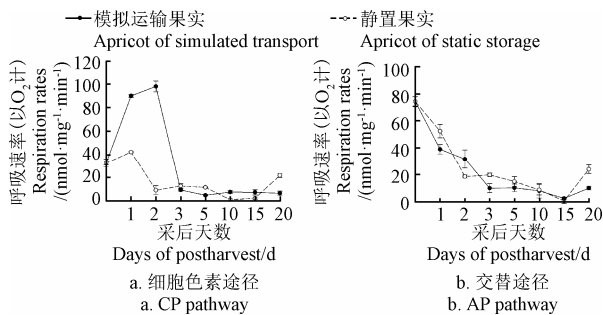


图 4 模拟运输与静置鲜杏贮期细胞色素途径和交替途径呼吸速率的差异

Fig.4 Difference between simulated transport and static storage in CP respiration rates and in AP respiration rates

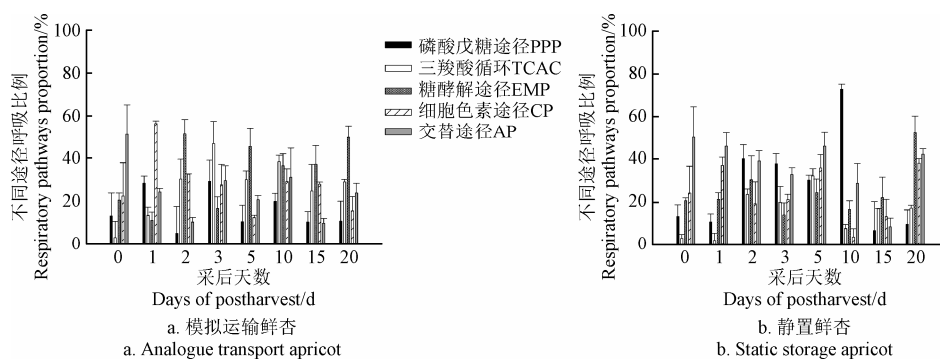


图 5 模拟运输和静置鲜杏贮期不同呼吸途径比例差异

Fig.5 Different respiratory pathways proportion of apricots in simulated transport and in static storage

跃变型果实以糖酵解、三羧酸循环、细胞色素电子传递链作为呼吸主要的环节提供能量和代谢中间产物; 通过交替电子传递链转变为少量热量散失, 维持三羧酸循环的运行和代谢通路^[18]。CP 呼吸的增强与果实后熟跃变过程完成香气、色泽、质地、糖酸的改变密切相关。相关研究^[19-23]指出, 无论是否受到低温抑制, 果实发育趋于成熟或采后后熟过程存在 EMP、TCAC、CP 代谢的

增强; 同时蔗糖代谢的酸性转化酶活性升高, 果实或组织的还原型己糖含量增加。鲜杏在模拟运输振动条件下升高 EMP 和 CP 呼吸强度, 是促进能量代谢、加快完成后熟的响应。

无论静置还是模拟运输果实, 贮藏 20 d 时不同途径的呼吸速率具有明显回升, 与该时期始发根霉和青霉病害有关; 与毕阳等人观测甜瓜病害果实微生物病害的

发病初期，PPP、EMP 和末端电子传递呼吸速率增强的结果类似^[24]。

表 2 模拟运输与静置鲜杏总呼吸和不同途径呼吸的线性关系
Table 2 Liner relationship between total respiration rates and different pathways respiration rates in apricots of simulated transport or static storage

处理 Treatment	呼吸途径 Respiratory pathways	与总呼吸的线性回归 Liner regression with total respiration rate	R ²
模拟运输 Simulated transport	糖酵解 EMP, 磷酸戊糖 PPP, 三羧酸循环 TCAC	$Y_{(Total)}=5.283X_{(EMP)}+2.734X_{(PPP)}-2.184X_{(TCAC)}-2.622$	0.881
	细胞色素途径 CP, 交替途径 AP	$Y_{(Total)}=2.012X_{(CP)}+0.703X_{(AP)}+19.587$	0.836
静置 Static storage	糖酵解 EMP, 磷酸戊糖 PPP, 三羧酸循环 TCAC	$Y_{(Total)}=5.827X_{(TCAC)}+0.184X_{(PPP)}-0.868X_{(EMP)}-5.545$	0.816
	细胞色素途径 CP, 交替途径 AP	$Y_{(Total)}=1.658X_{(AP)}-0.202X_{(CP)}+29.06$	0.868

注：Y 为果实总呼吸速率，X 为果实不同途径的呼吸速率，nmol/(mg·min)。
Note: Y represents fruit total respiration rate, X represents respiration rate of different respiratory pathway, nmol/(mg·min).

2.3 模拟运输振动对鲜杏感官品质的影响

贮藏 20 d 内，模拟运输鲜杏从贮藏初期起比静置果实的硬度偏低 13.18%~19.34%（图 6a），说明果实质地

在模拟运输 3d 内已明显变软。果实硬度的下降与 TCAC（ $P<0.05$ ）和 CP（ $P<0.01$ ）呼吸速率的振动激升显著负相关（表 3）。生理成熟的核果类果实，果肉质构构成以果胶为主，振动加快后熟果实的硬度下降，与多聚半乳糖酸酶（PG）、果胶酯酶（PE）活性升高，原果胶减少、水溶性果胶增加有关^[25]。

贮期模拟运输果实的可溶性固形物含量缓慢降低，而静置果实 SSC 快速下降；贮藏 10 d 后模拟运输果实比静置果实的 SSC 高 12.26%~27.15%（图 6b）。模拟运输果实 SSC 相对偏高，与 TCAC（ $P<0.05$ ）、EMP（ $P<0.05$ ）和 CP（ $P<0.01$ ）呼吸速率的振动激升显著正相关。振动促进呼吸跃变型鲜杏后熟加快、含糖量相对增加，与相关研究结果一致^[4]。核果类果实后熟 SSC 升高，与多糖降解^[26]有关；新疆杏成熟增加的糖分主要为还原型葡萄糖^[27]。

静置鲜杏的果面色度 C（色彩饱和度）仅比采收时变化 0.29~0.47，模拟运输鲜杏的果面色度 C 在贮藏 10~15 d 明显升高，饱和度比采收时最高增加 3.33，变化幅度是静置鲜杏的 7.09 倍~11.49 倍（图 6c）；果面色彩饱和度的相对提高，与 EMP（ $P<0.05$ ）和 CP（ $P<0.05$ ）呼吸速率的振动激升显著正相关。

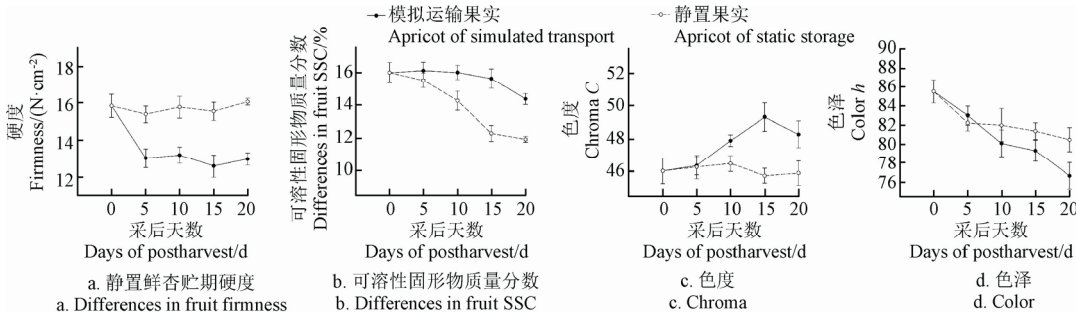


图 6 模拟运输与静置鲜杏贮期硬度、可溶性固形物含量、色度、色泽的差异

Fig.6 Differences between simulated transport and static storage in firmness, SSC, pericarp chroma and pericarp color of apricots

表 3 模拟运输与静置鲜杏的品质相对变化量与不同途径呼吸速率相对变化量的相关分析

Table 3 Correlation of relative changes between simulated transport and static storage in apricot quality factors and different pathway respiration rates.

品质因子 Quality factor	呼吸途径 Respiratory pathways				
	磷酸戊糖 PPP	三羧酸循环 TCAC	糖酵解 EMP	细胞色素途径 CP	交替途径 AP
硬度 Firmness	0.017	-0.772*	-0.665	-0.944**	-0.251
可溶性固形物含量 SSC	-0.172	0.777*	0.701*	0.887**	0.356
色度 Chroma	-0.297	0.646	0.725*	0.796*	0.281
色泽 Color	.674*	-0.205	-0.743*	-0.472	-.807**

注：**在 0.01 水平（双侧）显著相关；*在 0.05 水平（双侧）显著相关。
Note: **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); *. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

鲜杏采收时的果皮色泽度均值为 85.56，色泽为绿黄色或黄色。贮藏 20 d 时模拟运输果实色泽 h 比静置果实偏低 3.82（图 6d），果色偏橙黄。贮期果色转黄与 EMP

（ $P<0.05$ ）呼吸速率的振动激升显著负相关，色泽 h 的降低与果实 AP 呼吸速率减弱呈正相关（ $P<0.01$ ），只是变化趋势一致的表现。

目前新疆鲜杏长途运输基本采用容量 2~10 kg 的瓦楞纸箱包装，少数使用泡沫箱。冷藏高湿条件下瓦楞纸箱易吸潮后明显降低堆压强度，一方面难以起到缓冲和降低振动的作用；另一方面纸箱变形后易造成果实静压机械伤^[6]。可采用容量≤0.5 kg 的多孔 PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯）盒内包装、瓦楞纸箱外包装的方式，降低包装材料吸潮变形的运输风险，同时增强对果实机械伤保护和降低振动的作用。从本试验结果来看，模拟运输振动诱导七成熟鲜杏 EMP 和 CP 呼吸速率升高、果肉质明显变软，应选择成熟度略低，色泽 $h\geq 90$ 、果色尚未明显转黄，采收硬度 ≥ 17 N/cm² 的果实用于冷藏运输，减少运输至终端果实品质后熟劣变的程度。

3 结 论

1) 鲜杏冷藏模拟运输的三轴向振动，与实际冷藏运

输的振动加速度较为吻合, 重叠率为 57.60%~67.75%。

2) 3℃冷藏条件、与静置鲜杏相比, 模拟运输鲜杏振动 1~2 d 后, 总呼吸峰提前 8 d、峰值提高 3.26 倍; 三羧酸循环途径的呼吸峰提前 3 d、峰值提高 1.22 倍; EMP 和 CP 呼吸速率提高 4.62 倍和 9.64 倍; PPP 呼吸峰提前 9 d。

3) 受模拟运输振动的影响, 鲜杏的呼吸主路由三羧酸循环途径转换为糖酵解途径, 电子传递链由交替途径转换为细胞色素途径。

4) 与静置鲜杏相比, 模拟运输振动加快了冷藏鲜杏的后熟, 果实受三羧酸循环途径和细胞色素途径呼吸的振动激升, 硬度相对偏低 13.18%~19.34%; 受糖酵解途径、三羧酸循环途径和细胞色素途径呼吸的振动激升, 可溶性固形物含量相对偏高 12.26%~27.15%; 受糖酵解途径和细胞色素途径呼吸的振动激升, 果皮色彩饱和度相对增加 7.09~11.49 倍; 受糖酵解途径呼吸的振动激升, 果色转黄 3.82。应选择适宜贮运的成熟度采收果实并更换包装, 减少鲜杏运输品质劣变的程度。

参 考 文 献

- [1] 张婷, 车凤斌, 马燕翔, 等. 新疆主栽杏品种动态运输模拟试验[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(8): 1485—1491.
Zhang Ting, Che Fengbin, Ma Yangxiang, et al. A brief summary on dynamic transportation simulation of the major commercial varieties of Xinjiang apricot[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(8): 1485—1491. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘华英, 王大地, 包东东, 等. 库车小白杏对振动胁迫的生理反应研究[J]. 北方园艺, 2012(12): 176—179.
Liu Huaying, Wang Dadi, Bao Dongdong, et al. Physiological reactions of Kuqa apricot to mechanical vibration[J]. Northern Horticulture, 2012(12): 176—179. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘华英, 张锐利, 秦俊凤. 机械伤害对库车小白杏贮藏品质的影响[J]. 塔里木大学学报, 2012, 24(2): 14—18.
Liu Huaying, Zhang Ruili, Qin Junfeng. Effect of mechanical injury on storage quality of Kuqa Apricot[J]. Journal of Tarim University, 2012, 24(2): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘峰娟, 秦宗权, 沈艾彬, 等. 振动胁迫对杏果实品质的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(10): 266—270.
Liu Fengjuan, Qin Zongquan, Shen Aibin, et al. Effect of mechanical vibration stress on the quality of apricot fruits[J]. Food Science, 2011, 32(10): 266—270. (in Chinese with English abstract)
- [5] 钱龙, 崔宽波, 孙丽娜, 等. 不同处理对杏果实长途运输后贮藏品质的影响[J]. 中国食物与营养, 2010(9): 47—50.
Qian Long, Cui Kuanbo, Sun Lina, et al. Effects of different treatments on storage quality of apricot after long distance transport[J]. Food and Nutrition in China, 2010(9): 47—50. (in Chinese with English abstract)
- [6] Vigneault C, Thompson J, Wu S, et al. Transportation of fresh horticultural produce[J]. Postharvest technologies for horticultural crops, 2009, 2: 1—24.
- [7] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [8] 史青纯. 外源水杨酸处理对采后黄冠梨果实呼吸途径的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
Shi Qingchun. Effects of salicylic acid on respiratory pathway of postharvest Huang-guan pear[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [9] Vursavus K, Ozguven F. Determining the effects of vibration parameters and packaging method on mechanical damage in golden delicious apples[J]. Turk J Agric For. 2004, 28(5): 311—320.
- [10] Chonhenchob V, Sittipod S, Swasdee D, et al. Effect of truck vibration during transport on damage to fresh produce shipments in thailand[J]. Industrial Technology. 2009, 3(1): 27—38.
- [11] 卢立新, 黄祥飞, 华岩. 基于模拟运输条件的梨果实包装振动损伤研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 110—114.
Lu Lixin, Huang Xiangfei, Hua Yan. Effect of packaging methods on vibration bruising of pear fruits by simulated transport tests[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2009, 25(6): 110—114. (in Chinese with English abstract)
- [12] Ranathunga C L, Jayaweera H, Suraweera S, et al. Vibration Effects in Vehicular Road Transportation[C]//Physics, Institute of Sri Lanka, 2010.
- [13] Nugroho W A, Lutfi M, Prasetyo D D. Damage Level Determination of Mango on Simulation Transport Position, Operated on Various Vibration[J]. Jurnal Teknologi Pertanian. 2012, 12(1): 16—22.
- [14] Jarimopas B, Singh S P, Saengnil W. Measurement and Analysis of Truck Transport Vibration Levels and Damage to Packaged Tangerines during Transit[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(4): 179—188.
- [15] Rw F, Cy W, Dl S, et al. Characterization of alternative oxidase (AOX) gene expression in response to methyl salicylate and methyl jasmonate pre-treatment and low temperature in tomatoes[J]. Journal of plant physiology, 2006, 163(10): 1049—1060.
- [16] 孙文泰. 外源水杨酸对采后鸭梨果实呼吸途径的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
Sun Wentai. Effects of Salicylic Acid on Respiratory Pathway of Ya-li pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd.cv.Yali) [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [17] Xu F, Yuan S, Zhang D, et al. The role of alternative oxidase in tomato fruit ripening and its regulatory interaction with ethylene[J]. Journal of Experimental Botany. 2012, 63(15): 5705—5716.
- [18] 田世平, 罗云波, 王贵禧. 园艺产品采后生物学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [19] 成善汉. 马铃薯块茎低温糖化机理及转化酶抑制子基因的克隆与功能鉴定[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
Chen Shanhan. Mechanism of Cold Sweetening of Stored Potato Tubers and Cloning and Functional Identification of Invertase Inhibitor Gene[D]. Wuhan: Hua Zhong Agricultural University Olericulture, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘明池, 陈杭, 小岛孝之. 不同土壤水分条件下草莓果实采后在模拟贮运中的损伤易感性[J]. 果树学报, 2005, 22(3): 238—242.
Liu Minchi, Chen Hang, Kojimo Takayuki. Study on the fruit injury susceptibility of strawberry grown under different soil moisture in storage and transportation[J]. Journal of Fruit Science, 2005, 22(3): 238—242. (in Chinese with English abstract)
- [21] Gandin A, Lapointe L, Dizengremel P. The alternative respiratory pathway allows sink to cope with changes in carbon availability in the sink-limited plant *Erythronium americanum*[J]. Journal of experimental botany, 2009, 60(15): 4235—4248.
- [22] 阚娟, 王红梅, 金昌海, 等. 桃果实成熟过程中活性氧和线粒体呼吸代谢相关酶的变化[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 275—279.

- Kan Juan, Wang Hongmei, Jin Changhai, et al. Changes of active oxygen and mitochondria respiratory metabolism-related enzymes during maturation of peach fruit[J]. Food Science, 2009, 30(8): 275–279. (in Chinese with English abstract)
- [23] 方辉. *StGAPC* 和 *StEnolase* 在马铃薯块茎低温贮藏过程中的作用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- Fang Hui. Functions of *StGAPC* and *StEnolase* genes in the cold storage of potato tubers[D]. Wuhan: Hua Zhong Agricultural University Olericulture, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [24] 毕阳, 张维一. 感病甜瓜果实的呼吸、乙烯及过氧化物酶变化的研究[J]. 植物病理学报, 1993, 23(1): 69–73.
- [25] 李萍. 黄花梨模拟运输振动引起的机械损伤与品质损害[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Li Ping. Studies on the Mechanical Damage and Quality Deterioration of Huanghua Pears Caused by Simulating Transport Vibration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [26] 阚娟, 王贺, 金昌海. 不同溶质型桃果实成熟软化过程中细胞壁多糖分子质量的分布变化[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 10–16.
- Kan Juan, Wang He, Jin Changhai. Changes in the molecular weight distribution of cell wall polysaccharides during peach fruit ripening and softening[J]. Food Science, 2013, 34(5): 10–16. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孙家正, 张大海, 张艳敏, 等. 南疆栽培杏风味物质组成及其遗传多样性[J]. 园艺学报, 2010, 37(1): 17–22.
- Sun Jiazheng, Zhang Dahai, Zhang Yanmin, et al. Genetic diversity and constituents of flavor in southern Xinjiang apricot cultivars[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(1): 17–22. (in Chinese with English abstract)

Effects of simulated transport vibration on respiratory pathways and qualities of Xinjiang apricot fruit

Pan Yan¹, Che Fengbin¹, Dong Chenghu¹, Zhang Hui², Meng Xintao¹, Zhang Ting¹

(1. Institute of Agro-production storage and processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;

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

Abstract: Effects of simulated transport vibration on respiratory pathways and qualities in Xinjiang apricot were studied based on the similarity simulation. About 1.50 t fresh apricots (Xiao baixing) in physiological maturity stage were packaged in plastic crates and transported in a refrigerated truck at the average velocity of 60 km/h. X-axial (lateral), Y-axial (longitudinal) and Z-axial (vertical) vibration accelerations of apricot crates in refrigerated truck were measured using digital 3-dimensional (3D) acceleration recorders with a sampling rate of once every 2.0 seconds during the 10-hour highway transportation. A vibration simulation platform (self-triturating equipment) loaded 120 kg apricots packaged in plastic crates where the vibration of horizontal direction and vertical direction both initiated from 0 to 8.0 Hz with 1.0 Hz rise every 5 minutes. During the simulation, vibration was measured with 3D acceleration recorders sampling once every 50 ms to select the proper vibration frequency close to the real transportation. According to the repeatable measurements, the simulated vibration was 57.60%-67.75% similar to real transportation at 0.5 Hz. Frequencies of low acceleration vibrations on lateral, longitudinal and vertical directions were higher than real transport. Apricots were divided into 2 groups: one group was stored in static state for 20 d at 3°C; the other group was stored for 17 days 3 days after the simulated transport under the selected vibration condition at 3°C. The differences between simulated transport and static storage in respiratory pathways, firmness, SSC (soluble solid content) and pericarp color of apricots were analyzed. The total respiration rate of apricot reached peak in the first 2-day simulated transport vibration, which was earlier 8 days than the apricot in static storage, and the peak value raised by 3.26 times. Apricot TCAC (tricarboxylic acid cycle) respiration rate reached peak in first 2-day simulated transport vibration, which was earlier 3 days than the apricot in static storage, and the peak value raised by 1.22 times. Apricot EMP (Embden - Meyerhof - Parnas) and CP (cytochrome pathway) respiration rates also reached peaks in first 2-day simulated transport vibration; the peak values were respectively 4.62 times and 9.64 times higher than that of the apricot in static storage. Apricot PPP (phosphopentose pathway) respiration rate reached peak in the first day of simulated transport vibration, which was earlier 9 days than the apricot in static storage, but peak values were similar. The apricot's major respiratory pathway of simulated transportation was switched from TCAC pathway to EMP pathway, and the major electron transport chain was switched from AP (alternative pathway) to CP. The shift of major respiratory pathway resulted in further maturity and quality deterioration in the apricots at late storage. 13.18%-19.34% loss of firmness was significantly correlated with the increases of TCAC respiratory rate and CP respiratory rate during the simulation transport. 12.26%-27.15% rise of SSC was the consequence of the increases of EMP, TCAC and CP respiratory rate during the simulation transport. The pericarp chroma was increased by 7.09-11.49 times, which was significantly correlated with the increases of EMP respiratory rate and CP respiratory rate during the simulation transport. The pericarp color turned yellow by 3.82, which was significantly correlated with the increase of EMP respiratory rate during the simulation transport. Results provide a reference for developing quality-control techniques of the cold-chain transport of the apricot.

Key words: fruits; vibrations; qualities control; simulated transport; Xinjiang apricot; respiratory pathways