

减压贮藏技术对水蜜桃采后能量代谢的影响*

陈文炬^{1,2} 宋丽丽² 廖小军¹

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 杭州 310021)

摘要: 研究了(10 ± 5) kPa 和(80 ± 5) kPa 2个不同减压压力处理及常规冷藏条件下水蜜桃贮藏期间能量相关物质三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、磷酸腺苷(AMP)含量和能荷(EC)以及H⁺-ATPase、Ca²⁺-ATPase、琥珀酸脱氢酶(SDH)、细胞色素氧化酶(CCO)等线粒体呼吸代谢相关酶活性变化。结果表明,减压贮藏能较好地保持SDH、CCO、H⁺-ATPase和Ca²⁺-ATPase等酶活性,使ATP含量和能荷在整个贮藏期间均维持在较高水平;采用(10 ± 5) kPa压力处理更有利于维持采后贮藏的能量水平并保持相关酶活性。减压技术在采后保鲜上的作用与能量代谢相关。

关键词: 水蜜桃 减压贮藏 能量代谢

中图分类号: S609⁺.3; S662.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0226-05

引言

桃(*Prunus persica* L. Batsch)是我国栽培的第四大水果,其产量及面积均居世界第一^[1],特别是南方软溶质水蜜桃甜蜜多汁、香气浓郁,深受消费者喜爱。但水蜜桃属于跃变型果实,高温季节采收,采后果实成熟衰老进程较快,极不耐贮运。常规低温贮藏易发生冷害,表现为絮败、褐变、不能正常后熟、失去固有风味等症状。跃变型果实贮藏过程中需要减少乙烯对采后果实的催熟作用,降低果实的呼吸强度^[2]。水蜜桃贮藏不仅要控制果实内源乙烯的产生,及时去除贮藏环境中的乙烯,还要防止发生冷害、生理紊乱及风味丧失;常规保鲜方法很难达到理想的贮藏效果。

减压贮藏(Hypobaric storage)通过降低果蔬贮藏环境的气体分压,创造低O₂环境,同时促进果蔬内部有害气体的向外扩散,从而减少由这些物质引起的衰老和生理病害。减压技术是有利于食品安全的一项非常有效的物理技术,使保鲜效果比现有的常规贮藏方法有大幅提高,被称为保鲜史上的第三次革命^[3-4]。目前减压保鲜技术正处于发展初期,在水蜜桃上的应用研究还鲜见报道。本文通过在较难贮藏的软溶质水蜜桃上应用减压保鲜技术,研究减压贮藏对采后水蜜桃能量代谢的影响,以期达到延长软溶质水蜜桃保鲜时间和提高商业保鲜品质的目的,并了解减压保鲜的作用机理,为减压贮藏技术

的应用提供新的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验仪器

以“湖景蜜露”水蜜桃为试验材料,采自浙江省嘉兴市,采收后3 h内运回实验室,挑选成熟度90%左右(果实表面粉红)、大小基本一致、无机械损伤的水蜜桃作为试验材料。

试验仪器包括:低气压多室异压保鲜贮藏试验设备,上海善如水保鲜科技有限公司;Series 1200 HPLC,美国Agilent公司;Cintra404型紫外分光光度计,澳大利亚GBC公司;Biofuge Stratos型冷冻离心机,德国Heraeus公司。

1.2 方法

试验分减压贮藏组和常压对照组进行。减压贮藏组水蜜桃直接进入减压罐贮藏,压力分别采用(10 ± 5) kPa和(80 ± 5) kPa。常压对照组水蜜桃装入0.02 mm厚打孔PE薄膜袋,每袋装果实15个。所有处理贮于0℃保鲜库中。每6 d取样检测。

三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、一磷酸腺苷(AMP)和能荷(EC)的测定参照Liu等方法^[5]。取2 g果肉液氮研磨后加入6 mL 0.6 mol/L高氯酸冰浴提取,在4℃下16 000 g离心15 min,取3 mL的上清液用KOH调至pH值为6.5~6.8,定容到4 mL,并用0.45 μm滤膜过滤。HPLC法测定ATP、ADP和AMP含量,条件为C18反相柱(ODS,

收稿日期:2014-05-07 修回日期:2014-05-31

* 国家自然科学基金资助项目(31340053)和国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB127103)

作者简介:陈文炬,博士生,浙江省农业科学院研究员,主要从事农产品物流保鲜与加工研究,E-mail:hzwx888@163.com

通讯作者:廖小军,教授,博士生导师,主要从事农产品加工及贮藏工程研究,E-mail:liaojun@hotmail.com

250 mm × 4.6 mm), 检测波长 254 nm, 流动相为甲醇(A)和 0.1 mol/L pH 值为 7.0 磷酸钾缓冲液(B)。线性梯度洗脱, 时间为 10 min, 延迟 2 min, 流速 1.0 mL/min, 柱温 20℃, 流动相 A 在第 0、7、9、10 min 所占比例分别是: 0、20%、25%、0, 进样量为 20 μL。

能荷计算公式为

$$E_c = \frac{X + 0.5Y}{X + Y + Z}$$

式中 X——ATP 含量 Y——ADP 含量

Z——AMP 含量

果肉线粒体的提取参照 Liang 等方法^[6]。琥珀酸脱氢酶(SDH)活性的测定参照 Ackrell 等的方法^[7]。细胞色素氧化酶(CCO)活性的测定参照 Errede 等的方法^[8]。H⁺-ATPase 酶活性测定参照 Zhang 等的方法^[9]。Ca²⁺-ATPase 酶活性的测定参照何龙飞等的方法^[10]。

1.3 数据统计

采用 Statistica 软件进行数据统计, 所有数据为 3 次重复的平均值和标准误差。P < 0.05 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 减压贮藏中 ATP、ADP、AMP 含量的变化

从图 1 可见, 桃果实贮藏过程中 ATP、ADP 含量持续下降。CK 贮藏下降最显著(P ≤ 0.05), ATP 含量由 58.34 nmol/g 下降到 14.75 nmol/g。减压贮藏下的桃果实, ATP 和 ADP 含量前 6 d 下降比 CK 快, 但之后下降缓慢, 而 CK 第 6 天后 ATP 和 ADP 开始快速下降, 30 d 时 CK 果实 ATP 含量只有 10 kPa 减压处理的 35.2%。3 个处理 AMP 含量都是升高的, 以 CK 贮藏增加最多, 10 kPa 减压贮藏的增加最少。果蔬的衰老劣变与能量代谢有着密切关系^[11], Saquet 等^[12]认为园艺作物采后衰老和褐变的发生可能与能量供应不足和生成效率下降有关, Su 等^[13]发现龙眼果皮褐变可能是能量亏缺造成的; Saquet 等^[14]报道 ATP 在保持细胞膜的完整性中有重要作用, ATP 含量的下降是引起梨果心褐变的重要原因。苹果、梨^[14]、荔枝^[15]等的采后衰老与 ATP 含量和能荷呈负相关性, 其机制可能是 ATP 参与了脂质的合成与脂肪链的去饱和, 影响膜的理化性质和完整性, 进而影响到抗病性^[16-18]; 陈京京等^[19]研究表明桃果实冷害发生与能量亏缺有密切关系。本试验 ATP 含量等的结果表明减压处理可以维持较高的 ATP 等, 从而保证了能量供应。

2.2 减压贮藏中能荷的变化

不同减压贮藏下桃果实能荷变化如图 2 所示,

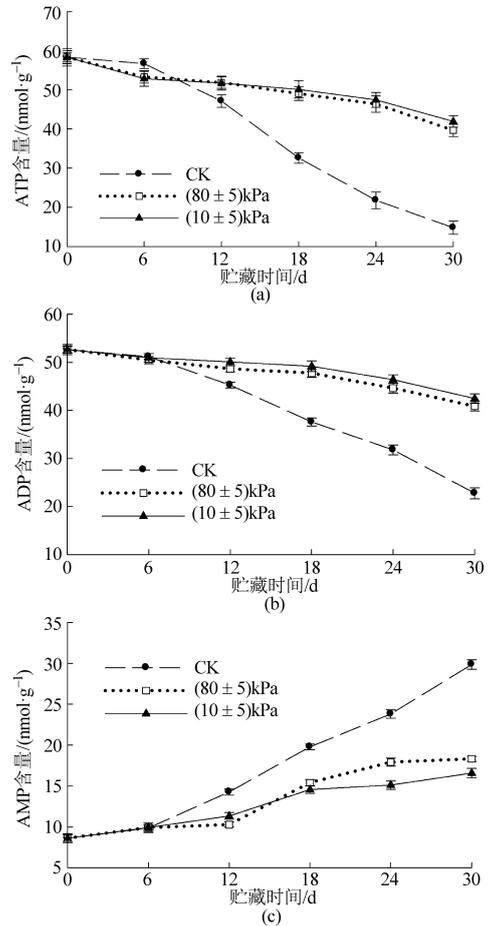


图 1 减压贮藏中桃果实 ATP、ADP、AMP 含量的变化
Fig. 1 Changes of ATP, ADP and AMP of juice peach fruit during storage

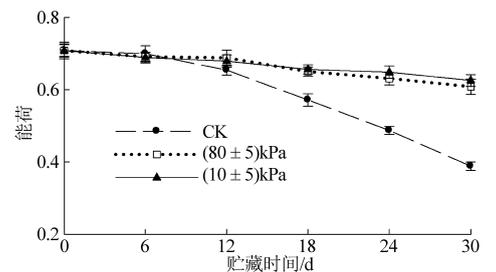


图 2 减压贮藏中桃果实能荷的变化
Fig. 2 Changes of EC of juice peach fruit during storage

所有处理桃果实能荷呈下降趋势, 减压处理果实能荷前 6 d 比 CK 下降略快, 之后 CK 开始快速下降, 这与 ATP 含量变化相一致, 可能与果实进入减压贮藏后快速抑制呼吸作用有关。与减压处理相比, CK 果实能荷下降显著(P ≤ 0.05), 从采收时到贮藏末期由 0.71 降到 0.39, 30 d 时 CK 能荷只有 10 kPa 减压贮藏的 62.0%, 整个贮藏过程中, 6 d 之后 CK 贮藏果实能荷始终低于减压果实, 说明 CK 贮藏果实能量水平最低, 能量亏缺最严重。减压处理能荷在整个贮藏期间均维持在较高水平, 而 CK 处理能荷快速下降, 说明桃的衰老劣变过程受 ATP 水平和能荷水平的调节, 而刘亭等^[18]研究表明荔枝采后衰老

和品质劣变受 ATP 水平影响而不受能荷水平调节,这可能是由于能力状态对呼吸跃变型果实和非跃变型果实作用不同造成。已有研究表明减压贮藏能保持水蜜桃较高的可溶性固形物,减少贮藏期可滴定酸、维生素 C 的损失,可抑制呼吸代谢,说明减压处理能较好地减少营养物质的消耗,使贮藏过程中的能量消耗处于较低水平^[22]。

2.3 减压贮藏中桃果实 SDH 和 CCO 活性的变化

线粒体是细胞能量代谢和物质转化的中枢,线粒体通过呼吸链的单电子载体产生活性氧,是呼吸作用和能量物质 ATP 产生的重要场所,线粒体能量的生成与活性氧水平的平衡对于维持细胞的稳定是必需的^[20]。

SDH 酶是线粒体内膜的结合酶,是连接氧化磷酸化与电子传递的枢纽之一,可为呼吸链提供电子,为线粒体的一种标志酶。不同条件贮藏下桃果实 SDH 活性变化如图 3a 所示,CK 贮藏中 SDH 前期先下降再上升,12 d 后开始快速下降,SDH 在前 12 d 还能保持较高的酶活性,表明此阶段的果实内线粒体处于较好的功能状态,而后期线粒体功能开始受损。减压处理 SDH 在整个贮藏过程中保持了较高的活性,2 种减压压力对 SDH 活性影响差异不大。

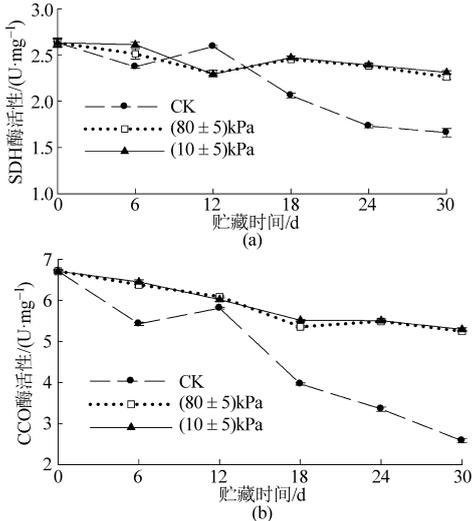


图 3 减压贮藏中桃果实 SDH 和 CCO 活性的变化
Fig. 3 Changes of SDH activity and CCO activity of juice peach fruit during storage

CCO 酶主要通过氧化磷酸化为细胞提供能量,是线粒体电子传递链末端氧化酶,其活性与生物体组织的耗氧率呈正相关。如图 3b 所示,不同贮藏下桃果实 CCO 活性随着贮藏时间增加逐渐下降,其中减压贮藏果实 CCO 活性下降较缓慢,CK 下降显著,30 d 时已下降了 61.4%,而 10 kPa 减压贮藏仅下降 21.0%。SDH 和 CCO 活性的下降会阻碍三羧酸循环和呼吸链的顺利进行,从而导致线粒体功能障碍,

影响能量生成效率。

在本试验研究中 CK 果实贮藏中后期 SDH 酶活性快速下降,同时 CCO 酶活性也是在果实中后期快速减小,这表明 CK 在果实贮藏的后期,SDH 和 CCO 酶活性受到抑制,从而可能引起细胞能量障碍,使得细胞的功能活动不能正常进行,加剧细胞衰老。而减压处理可以较好地保持 SDH 和 CCO 酶活性,从而维持细胞的正常功能。

2.4 减压贮藏中桃果实 H⁺-ATPase 和 Ca²⁺-ATPase 活性的变化

H⁺-ATPase 能水解 ATP,产生能量,并把细胞质内的 H⁺ 泵出膜外,产生跨膜 pH 梯度和电势梯度,形成质子电化学势 ΔpH ,提供细胞生长所需的驱动力。由图 4a 可见,贮藏过程中 H⁺-ATPase 酶活性一直呈下降趋势,CK 贮藏果实 H⁺-ATPase 下降要显著快于减压处理,CK 果实第 30 天时是入贮的 29.0%,减压处理的 H⁺-ATPase 活性下降虽然比 CK 慢,但活性的下降也十分明显,30 d 时 10 kPa 和 80 kPa 减压贮藏的 H⁺-ATPase 活性分别是入贮时的 63.6% 和 53.7%。这可能是由于随着贮藏时间的延长,呼吸代谢受到了抑制,导致 ATP 合成减少,从而降低了 H⁺-ATPase 酶活性。

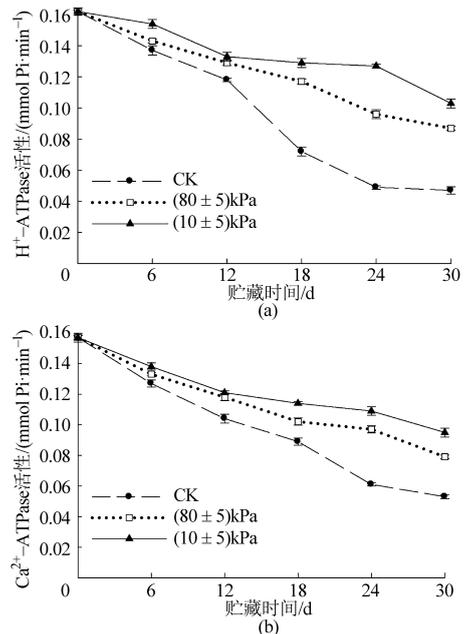


图 4 减压贮藏中桃果实 H⁺-ATPase 和 Ca²⁺-ATPase 活性的变化
Fig. 4 Changes of H⁺-ATPase activity and Ca²⁺-ATPase activity of juice peach fruit during storage

Ca²⁺-ATPase 是细胞器膜上的 Ca²⁺ 泵,可水解 ATP,使细胞内 Ca²⁺ 泵到细胞外,以维持细胞内较低的 Ca²⁺ 浓度,这是维持细胞稳态的重要机制之一。所以 Ca²⁺-ATPase 酶活性将影响到细胞内 Ca²⁺ 浓

度^[21]。如图 4b 所示, Ca^{2+} -ATPase 酶活性在 3 个处理下都呈持续下降趋势, 以 CK 贮藏 Ca^{2+} -ATPase 酶活性下降最显著, 表明 CK 贮藏中果实线粒体合成 ATP 能力下降, 线粒体内环境平衡遭到破坏。而 10 kPa 的减压处理 Ca^{2+} -ATPase 酶活性下降要低于 80 kPa 的减压处理。

3 结论

(1) 果蔬的衰老劣变与能量代谢有着密切关系, 桃果实在贮藏过程中 ATP、ADP 含量和能荷值持续下降, 减压处理可以显著保持 ATP、ADP 含量, 30 d 时 10 kPa 减压处理果实的 ATP 含量和能荷分别是 CK 的 2.84 倍和 1.61 倍, 说明减压处理保证

了能量供应。

(2) SDH、CCO、 H^{+} -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase 是线粒体中重要的呼吸相关酶, 其酶活性变化能够反映线粒体的功能特性。CK 处理这 4 种酶活性在贮藏过程中快速下降, 这说明了此时细胞维持能量的能力不断下降, 而减压处理可以减缓 4 种酶活性的下降, 能更好地维持线粒体功能。

(3) 本研究表明减压能在贮藏过程中较好地保持 SDH、CCO、 H^{+} -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase 等酶活性, 使 ATP 含量和能荷在整个贮藏期间均维持在较高水平, 可以认为减压保鲜能保持细胞的正常结构, 保护果实正常代谢机能, 有较好保鲜效果, 从而延缓了果实贮藏期衰老和品质劣变进程。

参 考 文 献

- 郭晓成, 邓琴凤, 高小宁, 等. 论我国桃产业发展的优势、品种和栽培技术[J]. 西北园艺, 2004(3): 5-7.
Guo X C, Deng Q F, Gao X N, et al. Theory of the advantage, variety and cultivation technique of the peach industry development in our Country[J]. Northwest Horticulture, 2004(3): 5-7. (in Chinese)
- 李江阔, 林洋, 张鹏, 等. 1-甲基环丙烯处理时间对苹果贮藏效果的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 190-194.
Li J K, Lin Y, Zhang P, et al. Effects of various 1-methylcyclopropene treatment durations on storage quality of apple fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 190-194. (in Chinese)
- Burg S P, 郑先章. 中西方减压贮藏研究概述[J]. 制冷学报, 2007, 28(2): 1-7
Burg S P, Zheng X Z. Summary of hypobaric research in China and the west[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(2): 1-7. (in Chinese)
- 王莉, 张平, 王世军. 果蔬减压保鲜理论与技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2001(5): 3-6.
Wang L, Zhang P, Wang S J. Advances in research on theory and technology for hypobaric storage of fruit and vegetable[J]. Storage and Process, 2001(5): 3-6. (in Chinese)
- Liu H, Jiang Y M, Luo Y B, et al. A simple and rapid determination of ATP, ADP and AMP concentrations in pericarp tissue of litchi fruit by high performance liquid chromatography[J]. Food Technology and Biotechnology, 2006, 44(4): 531-534.
- Liang W S, Pan J, Liang H G. Activation of cyanide-resistant respiration by pyruvate in mitochondria of aged potato tuber slices[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2003, 29(4): 317-321.
- Ackrell B A, Keamery E B, Singer T P. Mammalian succinate dehydrogenase[J]. Methods in Enzymology, 1978, 53: 466-483.
- Errede B, Kamen M D, Hatefi Y. Preparation and properties of complex IV (ferrocytochrome c: oxygen oxidoreductase EC 1.9.3.1)[J]. Methods in Enzymology, 1978, 53: 40-47.
- Zhang J H, Liu Y P, Pan Q H, et al. Changes in membrane-associated H^{+} -ATPase activities and amounts in young grape plants during the cross adaption to temperature stresses[J]. Plant Science, 2006, 170(4): 768-777.
- 何龙飞, 沈振国, 刘友良. 铝胁迫对小麦根系液泡膜 ATP 酶、焦磷酸酶活性和膜脂组成效应[J]. 植物生理学报, 1999, 25(4): 350-356.
He L F, Shen Z G, Liu Y L. The responses of ATPase and PPase activities and lipid composition of tonoplast in roots of two wheat cultivars to aluminium stress[J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1999, 25(4): 350-356. (in Chinese)
- Jiang Y, Qu H, Duan X, et al. Energy aspects in ripening and senescence of harvested horticultural crops[J]. Stewart Postharvest Review, 2007, 3(2): 1-5.
- Saquet A A, Streif J, Bangerth F. Changes in ATP, ADP and pyridine nucleotide levels related to the incidence of physiological disorders in Conference pears and Jonagold apples during controlled atmosphere storage [J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2000, 75(2): 243-249.
- Su X G, Jiang Y M, Duan X W, et al. Effects of pure oxygen on the rate of skin browning and energy status in Longan fruit [J]. Food Technology and Biotechnology, 2005, 43(4): 359-365.
- Saquet A A, Streif J, Bangerth F. Energy metabolism and membrane lipid alterations in relation to brown heart development in Conference pears during delayed controlled atmosphere storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 30(2): 123-132.
- Duan X W, Jiang Y M, Su X G, et al. Role of pure oxygen treatment in browning of litchi fruit after harvest[J]. Plant Science, 2004, 167(3): 665-668.
- Rawlyer A, Arpagaus S, Braendle R. Impact of oxygen stress and energy availability on membrane stability of plant cells[J]. Annals of Botany, 2002, 90(4): 499-507.

- 17 Yi C, Qu H X, Jiang Y M, et al. ATP-induced changes in energy status and membrane integrity of harvested litchi fruit and its relation to pathogen resistance[J]. *Journal of Phytopathology*, 2008, 156(6):365-371.
- 18 刘亭,钱政江,杨恩,等. 呼吸活性和能量代谢与荔枝果实品质劣变的关系[J]. *果树学报*, 2010, 27(6):946-951.
Liu T, Qian Z J, Yang E, et al. Respiratory activity and energy metabolism of harvested litchi fruit and their relationship to quality deterioration[J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(6):946-951. (in Chinese)
- 19 陈京京,金鹏,李会会,等. 低温贮藏对桃果实冷害和能量水平的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4):275-281.
Chen J J, Jin P, Li H H, et al. Effects of low temperature storage on chilling injury and energy status in peach fruit[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4):275-281. (in Chinese)
- 20 Dietrich M O, Horvath T L. The role of mitochondrial uncoupling proteins in lifespan[J]. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 2010, 459(2):269-275.
- 21 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 J, Wang H M, Jin C H, 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)
- 22 陈文炬,郝海燕,陈杭君,等. 减压贮藏对软溶质水蜜桃采后生理和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9):108-112.
Chen W X, Gao H Y, Chen H J, et al. Effects of hypobaric storage on postharvest physiology and quality of flesh-melting textured juicy peach[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9):108-112. (in Chinese)
- 23 张敏,袁海涛,黄汝国,等. 果蔬活组织冰点测试系统设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3):223-226.
Zhang M, Yuan H T, Huang R G, et al. Design and test of measurement system for freezing point of living tissue of fruits and vegetable[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(3):223-226. (in Chinese)
- 24 刘战丽,王淑玲,王相友,等. 高氧气调包装双孢蘑菇呼吸速率预测模型建立与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11):180-184.
Liu Z L, Wang S L, Wang X Y, et al. Prediction model of respiration rate for mushroom with high oxygen modified atmosphere packaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11):180-184. (in Chinese)

Effects of Hypobaric Storage on Postharvest Energy Metabolism in Juicy Peach

Chen Wenxuan^{1,2} Song Lili² Liao Xiaojun¹

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021, China)

Abstract: The effect of hypobaric storage under different pressures on the energy metabolism of juicy peach fruit were studied. The pressures were controlled at (10 ± 5) kPa and (80 ± 5) kPa, respectively with air storage as control. Contents of ATP, ADP, AMP and energy charge, and the activities of mitochondria respiratory metabolism-related enzyme H^+ -ATPase, Ca^{2+} -ATPase, succinic dehydrogenase (SDH), cytochrome C oxidase (CCO) were determined during storage. The results indicated that the hypobaric storage significantly maintained higher H^+ -ATPase, Ca^{2+} -ATPase, SDH and CCO activities, and inhibited the decreases of contents of ATP and energy charge level. Hypobaric storage under (10 ± 5) kPa pressure was more conducive to maintain energy level and the activities of mitochondria respiratory metabolism-related enzyme. These results suggested that the benefits of hypobaric storage associated with energy metabolism.

Key words: Juicy peach Hypobaric storage Energy metabolism