

采后果蔬呼吸代谢途径及其调控研究进展

高红豆^{1,2}, 胡文忠^{1,2}, 管玉格^{2,3}, 姬亚茹^{2,3}, 冯可^{1,2}, 张艳慧^{1,2}, 于皎雪^{1,2}

(1.大连民族大学 生命科学学院, 辽宁 大连 116600; 2.生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁 大连 116600; 3.大连理工大学 生命科学与技术学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 介绍采后果蔬呼吸代谢途径及其调控的研究进展, 为采后果蔬生理生化及其贮藏保鲜技术研究提供一定的理论依据。**方法** 综述国内外采后果蔬呼吸关键代谢途径、酶、中间产物和保鲜技术对采后果蔬呼吸代谢途径的影响, 总结采后果蔬呼吸代谢的产生机理及其受保鲜技术调控的影响。**结果** 总结了采后果蔬呼吸代谢途径中关键酶和中间产物的产生机制及其调控方法, 归纳出利用保鲜技术控制采后果蔬的呼吸代谢途径可达到降低呼吸代谢的目的。**结论** 呼吸代谢作为采后果蔬主要的代谢方式, 通过相应的物理、化学和生物保鲜技术对其进行调控, 能够明显抑制褐变、冷害和品质下降的发生, 由此可见, 对呼吸代谢进行调控将在采后果蔬贮藏和销售方面起到重要作用。

关键词: 果蔬; 呼吸代谢; 调控

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)15-0030-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.15.004

Research Achievements in Respiration Metabolism Way and Control Methods of Post-Harvest Fruits and Vegetables

GAO Hong-dou^{1,2}, HU Wen-zhong^{1,2}, GUAN Yu-ge^{2,3}, JI Ya-ru^{2,3},
FENG ke^{1,2}, ZHANG Yan-hui^{1,2}, YU Jiao-xue^{1,2}

(1.College of Life Science, DalianMinzu University, Dalian 116600, China; 2.Key Laboratory of Biotechnology and Bioresources Utilization, Ministry of Education, Dalian 116600, China; 3.College of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: This paper aims to introduce the research achievements in respiration metabolism way and control methods of post-harvest fruits and vegetables and provide theoretical basis for its physiology & biochemistry and preservation-technology. This paper reviewed the effects of key pathways, enzymes, intermediates and preservation technologies on the respiration metabolism way of post-harvest fruits and vegetables in domestic and foreign literatures, and it also summarized the mechanism of respiration metabolism of post-harvest fruits and vegetables and its effects regulated by preservation technology. By summarizing the production mechanism and regulation methods of key enzymes and intermediates in the respiratory metabolic pathway of post-harvest fruits and vegetables, this paper concluded that using preservation technology to control the respiratory metabolic pathway of post-harvest fruits and vegetables can reduce the respiratory metabolism. Respiratory metabolism as a main metabolic method of post-harvest fruits and vegetables, it can be regulated by physical, chemistry and biological preservation technology, which can significantly decrease the occurrence of browning, cold damage and quality degradation. It can be seen that the regulation of respiration metabolism will play

收稿日期: 2020-11-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0400903); 国家自然科学基金 (31471923)

作者简介: 高红豆 (1994—), 女, 大连民族大学硕士生, 主攻食品加工与质量安全控制。

通信作者: 胡文忠 (1959—), 男, 博士, 大连民族大学教授, 主要研究方向为食品科学。

an important role in the storage and sales of post-harvest fruits and vegetables.

KEY WORDS: fruits and vegetables; respiration metabolism; regulation

果蔬中含有丰富的碳水化合物、维生素、膳食纤维和多种微量元素,对人体健康有很多益处。据统计,我国果蔬产量目前已居世界首位。我国果蔬采后大多只经过简单的预冷处理后直接运输,致使其损耗率较大,每年损耗率在 30%左右。果蔬损耗受多种外因和内因影响(外因:微生物侵染、机械损伤、贮藏环境的变化,内因:果蔬生理生化反应)。通常,果蔬采后仍处于鲜活的状态,需消耗能量来维持自身的生命活动。呼吸代谢作为果蔬采后最主要的代谢途径为果蔬提供了大量能量和前体物质,以此维持机体组织必需的代谢反应^[1]。延长果蔬贮藏期主要以维持其正常生理生化过程为前提,最大限度地降低其呼吸代谢水平来实现^[2]。呼吸代谢速率过高会引起果蔬内部有机物加速消耗,促进氧化酶类活性的提高,进而加速活性氧(ROS)的产生,破坏细胞膜结构,加快物质氧化分解,使果蔬更易发生内源性控制的退化现象,其会明显降低果蔬的贮藏品质,缩短贮藏时间^[3-4]。

目前果蔬保鲜技术主要对果蔬呼吸代谢进行调控,实现延长产品贮藏期。例如,赵云峰等^[5]研究发现,低温贮藏能抑制采后龙眼果实贮藏过程中呼吸速率提高的目的,从而延缓采后龙眼果实的衰老。用外源磷酸三钠处理采后苹果,其呼吸强度得到有效抑制^[6]。此外,通过对砀山酥梨进行低聚糖素涂膜处理后,也可以明显看出低聚糖素可抑制梨果呼吸强度的上升和硬度的下降,最终抑制腐烂的发生^[7]。文中将对采后果蔬呼吸代谢途径及其调控的研究进展进行综述,旨在为果蔬运输贮藏的开发和利用提供理论依据。

1 果蔬呼吸代谢途径

果蔬呼吸主要在线粒体、细胞质和质体中进行,通常果蔬呼吸过程涉及多种代谢途径,主要包括 2 类:物质的氧化分解,主要有糖酵解-三羧酸循环(EMP-TCA)、磷酸戊糖(PPP)等途径;线粒体的电子传递,主要为呼吸末端氧化途径(CCP)等^[8]。关键途径见图 1^[9-10]。果蔬呼吸的能量来源包括淀粉、储存在液泡中的蔗糖和己糖。淀粉可水解转化为葡萄糖,或经磷酸化酶作用转化为葡萄糖-磷酸酯,蔗糖可水解成葡萄糖和果糖,或通过蔗糖合酶形成尿苷二磷酸葡萄糖(UDP-葡萄糖)和果糖^[11]。该过程包括几个重要特征:具有多个切入点;焦磷酸复制;对腺苷三磷酸(ATP)具有依赖性;细胞质、质体与线粒体之间会发生互补效应;动力学引起的磷酸果糖激酶(PFK)和丙酮酸激酶(PK)变化会对糖酵解进

行调控,以及非磷酸化转运系统的执行^[12]。

1.1 EMP-TCA, PPP 和 CCP 途径

EMP-TCA, PPP 和 CCP 是果蔬呼吸代谢过程中的重要途径。其中 EMP 途径发生在细胞质中,主要是将葡萄糖分解为丙酮酸、乳酸或乙醇,并释放出—部分能量,同时合成 ATP 的代谢过程^[13]。通常来说,由于动物线粒体经常吸收脂肪酸和丙酮酸,果蔬线粒体很少吸收脂肪酸,因此糖酵解在果蔬中至关重要,它是推动果蔬呼吸代谢的主要途径^[14]。糖酵解主要具有 2 个代谢功能:当末端电子受体不可用时,糖酵解会提供维持细胞活性所需的所有 ATP 分子;糖酵解过程中产生的中间体为许多细胞提供直接前体物^[10]。同时 EMP 途径产生的磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)会作为 TCA 途径的反应底物参与 TCA 途径的进一步反应。TCA 途径主要发生在线粒体中,该反应将 PEP 转化为细胞质中的苹果酸或丙酮酸,随后这些有机酸通过载体进入线粒体,进行相互转化,每个丙酮酸分子最终可以产生 15 个 ATP^[12]。该循环开始阶段由异柠檬酸脱氢酶和乌头酸酶进行催化,此过程能够起到维持 2-氧化戊二酸水平(用于调节氮同化能力)作用^[15-17]。PPP 在细胞质中进行,由 6-磷酸葡萄糖(G-6-P)开始直接氧化脱氢和脱羧,其生理功能是产生还原型辅酶Ⅱ(NADPH)、磷酸戊糖、脂肪酸、氨基酸等中间产物,这些物质可供生物合成和核酸代谢,同时在氧化还原平衡方面也起着重要作用^[18]。电子传递主要集中在非磷酸化旁路的其他成分上,该过程涉及一系列酶(包括内部和外部还原型辅酶Ⅰ、Ⅱ脱氢酶,交替氧化酶(AOX)),这些酶会引起膜电位消除和解偶联蛋白(UCP),从而影响电子传递^[19-22],并且此过程主要通过 CCP 途径来实现。CCP 将底物产生的电子传递给 O₂,形成 H₂O₂ 或 H₂O,该过程发生范围较广,涉及多种氧化酶类,除了线粒体内膜上的细胞色素氧化酶(CCO)和 AOX 之外,还有细胞质中的 PPO、抗坏血酸氧化酶(AAO)和乙醇酸氧化酶等。

1.2 呼吸代谢途径中的关键酶和中间产物

1.2.1 己糖激酶

己糖(例如葡萄糖和果糖)普遍存在于大多数生物中,是自然界中大多数有机物的来源。己糖激酶(HxK)的活性主要受制于其产物葡萄糖-6-磷酸,并且己糖转化为其他有机物之前必须先进行磷酸化。目前在植物中仅鉴定出能够使葡萄糖和果糖磷酸化的 2 个酶家族——HxK 和果糖激酶(FRK)^[23]。在酵母

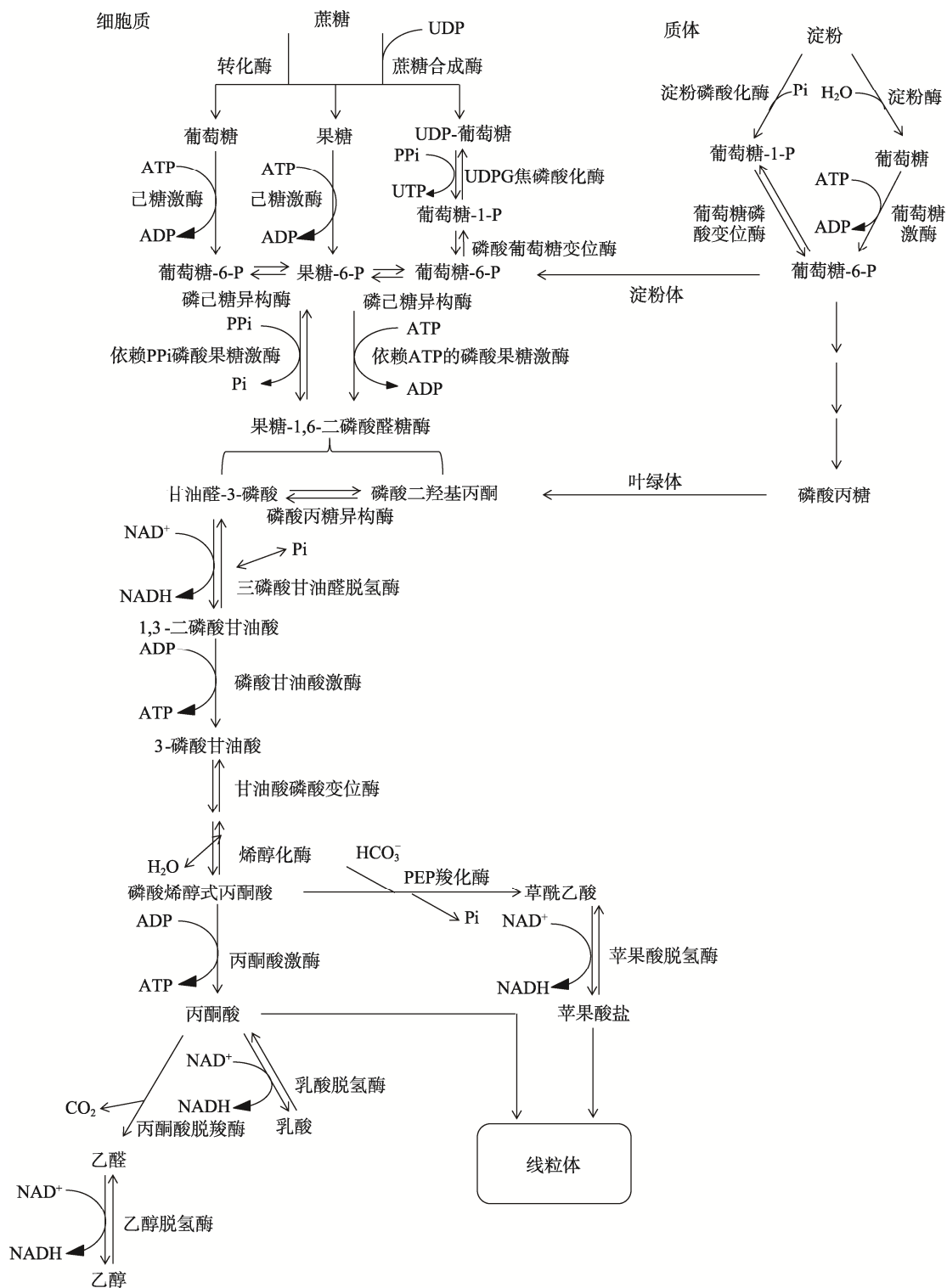


图 1 果蔬呼吸代谢途径

Fig.1 Respiration metabolic pathway of fruits and vegetables

中发现 2 种天然存在的己糖激酶同工酶,在哺乳动物和植物中大致有 4 种 HxK: 其中 3 种被称为己糖激酶,1 种是葡萄糖激酶^[24]。虽然 HxK 既催化 D-葡萄糖也催化 D-果糖和 D-甘露糖的磷酸化,但当糖酵解过程中的葡萄糖-6-磷酸来源于糖原时,不需 HxK 参与反应。

1.2.2 PFK 和 PK

PFK 和 PK 均处于 EMP 途径的中间位置,对整个代谢过程影响较大,其中 ATP 为 PFK 的反应底物,同时 ATP 也是 PFK 的别构抑制剂。PFK 作为一种四聚体酶,兼具 R 和 T 这 2 种异构体,并且每个亚基上都有 2 个 ATP 结合位点:底物结合位点和抑制剂

结合位点, 且仅当其处于 T 状态时抑制位点才会与 ATP 结合。PK 则以细胞质和质体同工型存在, 该酶催化 PEP 不可逆转的磷酸化反应以及腺苷二磷酸 (ADP) 向丙酮酸和 ATP 的转化, 并且 PK, PFK 和 HxK 对糖酵解的速度具有调控作用^[25], 从而对整个呼吸代谢起到调控作用。

1.2.3 乙醇脱氢酶和 L-乳酸脱氢酶

在低氧或缺氧条件下, 植物中有许多糖酵解末端产物 (乙醛、乙醇、有机酸和氨基酸等) 积累, 其中乙醛和乙醇对细胞有直接伤害作用, 同时引起细胞 pH 值下降的乳酸、谷氨酸、天冬氨酸等也会造成细胞损伤^[26]。乙醇脱氢酶 (ADH) 是一种中链脱氢酶/还原酶 (MDR) 超家族酶。它是由人类基因组中的 9 个不同含锌基因 MDR 形成的 5 类 ADH (I 至 V)。I 类和 II 类主要存在于肝脏中^[27-28]。I 类 ADH 编码 3 个不同亚基中的 3 个相同基因: α 是唯一在胎儿期表达的亚基, β 的表达在胚胎形成前进行, γ 的表达在出生后开始, 并且这些亚基可形成同源二聚体或异源二聚体 (II 至 V 类仅形成同源二聚体), 使 ADH 成为人体中最常见的 MDR^[19]。在 ADHs 中, III 类和非 III 类酶也存在差别, 前者具有甲醛活性, 而后者具有乙醇活性^[27, 29-30]。在胰腺癌和胰腺炎患者中 III 类同工酶活性增加, 且具有上述任何一种疾病的重度饮酒者也会出现较高的 I 类 ADH 活性^[31-32]。

L-乳酸脱氢酶 (LDH) 可以利用 NAD^+ 或还原型辅酶 I (NADH) 作为辅助因子, 将乳酸转化为丙酮酸。其催化机制主要发生在 3 个阶段, 其中第 1 阶段涉及辅助因子结合、底物结合, 主要通过封闭活性位点来实现^[33]。尽管机理明确, 但过渡态和化学步骤的顺序仍取决于生物体。与 ADH 相似, LDH 在乳酸乳球菌中也被 ADP 和 ATP 抑制^[34]。LDH 的编码基因是 LDHA 和 LDHB, 这 2 个基因表达的蛋白质能够形成从 LDHA (同工酶 LDH5) 到 LDHB (同工酶 LDH1) 的四聚体, 其中 LDHA 结合丙酮酸的能力较强, 并且主要在进行糖酵解的组织中表达^[35]。

1.2.4 琥珀酸脱氢酶和细胞色素氧化酶

琥珀酸脱氢酶 (SDH) 和 CCO 都是位于线粒体内膜的重要呼吸酶, 也是线粒体呼吸中的标志性酶。SDH 是 TCA 和有氧呼吸链中的重要物质, 它可将丙酮酸氧化成延胡索酸, 并伴随着泛醌的减少。在植物中, SDH 易被底物、ATP、泛醌、阴离子和酸性物质激活^[36]。CCO 是 CCP 的关键酶, CCO 催化电子从亚铁细胞色素 c 转移到氧分子, 在氧化磷酸化过程中的有氧代谢和能量产生中起关键作用, 并与质子泵运输以及 ADP 磷酸化产生 ATP 的关系密切^[37-38]。

1.2.5 Ca^{2+} -腺苷三磷酸酶

腺苷三磷酸酶 (ATPase) 的活性是能量代谢的重要指标, 它在细胞膜、内质网和液泡上发挥作用, 其

中 Ca^{2+} -腺苷三磷酸酶 (Ca^{2+} -ATPase) 不仅参与压力和激素的信号传导, 还参与果实成熟和衰老的调控, 高水平的 Ca^{2+} -ATPase 有利于将胞质 Ca^{2+} 维持稳定状态^[39]。过高水平的 Ca^{2+} 可引起线粒体功能障碍, 并导致能量代谢和离子转移紊乱, Ca^{2+} -ATPase 是调节线粒体内 Ca^{2+} 平衡的主要酶之一, Ca^{2+} -ATPase 活性的降低会影响 Ca^{2+} 的跨膜转运, 诱导 Ca^{2+} 的积累, 并进一步刺激 ROS 的产生^[40-41]。

1.2.6 丙酮酸

丙酮酸是糖酵解过程中的重要产物, 其有 2 个主要去向: 有氧条件下, 丙酮酸进入线粒体并转化为乙酰辅酶 A, 然后进入 TCA 途径, 通过电子传递和氧化磷酸化作用将葡萄糖完全氧化, 从而产生 ATP^[42]; 在厌氧条件下, 丙酮酸转化成乳酸或者乙醇, 在转化为乳酸的过程中, 丙酮酸通过 LDHA 转化为乳酸, 随后将乳酸输出到细胞外, 这一过程称为厌氧糖酵解。虽然厌氧糖酵解过程产生 ATP 的效率较低, 但厌氧糖酵解可以使细胞在没有氧气的情况下再生糖酵解早期所需的 NAD^+ 。在有氧条件下, NAD^+ 可以通过电子传输链再生^[43]。大多数植物在厌氧条件下会通过丙酮酸脱羧酶、ADH 等酶将丙酮酸转化为乙醇发生发酵反应。

1.2.7 ATP

ATP 由 ADP 与磷酸根离子结合形成, 是各种生物过程的主要能量来源, 如生物发光, 离子分子跨细胞膜的运输, 肌肉收缩, 碳水化合物、脂肪、蛋白质和核酸的合成, 以及 N_2 和 CO_2 的固定等过程。厌氧生物合成 ATP 的唯一途径是制造“超高能量”的磷酸盐, 这种磷酸盐的水解稳定性相对于 ATP 或 ADP 较低。糖酵解的大部分步骤都是为了生成高能量的磷酸中间体, 如 PEP 和 1,3-二磷酸甘油酸, 它们具有足够的能量可以将 ADP 转化为 ATP^[44]。ZHOU 等^[45]研究发现, ATP 的消耗加快了细胞膜完整性和功能的损失进程, 此时低水平 ATP 和能量消耗会影响膜电位变化, 阻碍呼吸链末端电子转移, 激活凋亡信号, 加速细胞坏死, 从而加速机体衰老^[46]。

除上述酶和中间体外, 呼吸代谢途径中许多其他重要的酶和中间体同样发挥着重要作用 (例如 PPO, AAO, AOX 和 PEP 等)。由于整个呼吸代谢过程受多重外界条件影响, 因此对呼吸代谢的调控方法有待做进一步探究。

2 呼吸代谢途径的调控

呼吸代谢过程涉及较长的反应序列, 并且在整个过程中化合物结构会发生改变。对于酶而言, 催化底物 (如葡萄糖) 变化要比酶结合葡萄糖氧化 6 个碳原子更容易实现。呼吸代谢一般分为许多步骤, 整个过

程中细胞会合成许多中间体,这些中间体包括多糖、蛋白质和核酸的前体物,同时该过程中也出现了促进或抑制反应的多个位点,可以为代谢反应的速率控制提供结合位点^[47]。此过程会导致线粒体和过氧化物酶类中产生 ROS,同时 ROS 作为信号分子也会对蛋白质、DNA 和脂质造成氧化损伤^[48]。从 H₂O₂ 对龙眼果实的能量状态、呼吸代谢和果皮褐变的影响研究中发现, H₂O₂ 会加快 ROS 的产生速率,从而加速龙眼果皮褐变,造成能量缺乏,这表明 ROS 的产生与呼吸之间存在密切的关系^[4]。通过对呼吸代谢过程中关键酶、中间体和 ROS 的调节可以实现对呼吸代谢的调控。目前已出现许多果蔬保鲜技术,主要有物理保鲜技术、化学保鲜技术和生物保鲜技术,这些保鲜技术均能对果蔬的呼吸代谢途径产生一定的影响,从而达到延长果蔬贮藏时间的效果。

2.1 物理保鲜技术对呼吸代谢途径的影响

果蔬的物理保鲜技术是通过改变贮藏环境中的部分条件来实现延长果蔬货架期的方法,一般不会产生对人体有害的物质,是一类较易得到消费者认可的果蔬保鲜技术,主要有气调贮藏、低温贮藏、射线辐照法等。

2.1.1 气调贮藏

气调贮藏作为近些年来较为普遍的一种物理保鲜技术,其主要通过调整环境中的气体成分和比例,以及温度和湿度,来实现延长果蔬货架期的目的,目前已广泛应用在果蔬和肉制品的贮藏中。通过对西兰花进行 5 种不同浓度的 O₂ 和 CO₂ 处理发现,体积分数为 50% 的 O₂+体积分数为 50% 的 CO₂ 处理可以降低呼吸速率,抑制 ATP 和能量水平下降,提高 SDH 和 CCO 活性,并增强葡萄糖-6-磷酸脱氢酶 6-磷酸葡萄糖酸脱氢酶活性,从而达到提高 TCA, CCP 和 PPP 等 3 个途径的速率,实现通过调节呼吸途径的变化来增强西兰花对高浓度 CO₂ 的耐受能力和延迟西兰花的衰老作用^[47]。在对荔枝果实进行 6 h 的纯 N₂ 前处理实验中,得到 N₂ 处理的荔枝果实表现出更高的 ATP、ADP 和腺苷一磷酸 (AMP) 浓度,以及更高的能荷水平,较低的褐变指数和膜通透性水平,明显延缓了荔枝果皮酶促褐变过程发生的细胞区室化,延长了荔枝果实的贮藏时间^[49]。李栋等^[50]在对鲜切莲藕进行 CO₂ (体积分数为 20%) 气调贮藏时,发现经处理后, NAD 激酶 (NADK) 活性和烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 (NADP⁺) 含量得到明显提高,烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 (NAD⁺) 含量降低,这些变化表明体积分数为 20% 的 CO₂ 处理削弱了 EMP-TCA 途径产生的 ROS,同时也激活了 PPP 途径产生大量 NADPH,最终达到抑制鲜切莲藕呼吸代谢、提高抗氧化能力的作用。对甜樱桃进行气调贮藏的实验也证实了在一定范围内的 O₂ 和 CO₂ 能够很好地降低呼吸速率,提高

果蔬品质^[51]。

2.1.2 低温贮藏

低温贮藏是一种开发较早的保鲜技术,通过减缓果蔬生理活动,实现延缓衰老腐烂,大多数果蔬运用物理或化学保鲜技术时均会结合低温贮藏,几者结合会发挥更好的保鲜效果。通过桃果实低温贮藏的研究发现,在 5 °C 贮藏条件下的果实呼吸相关酶 (SDH, CCO 和 Ca²⁺-ATPase) 活性提高,呼吸代谢受到抑制, ROS 产生降低,可以推断,低温通过抑制 ROS 和相关酶有助于延缓桃果实的衰老,保持线粒体中 Ca²⁺ 更好的稳态 (Ca²⁺ 是线粒体相关功能的关键调节剂,在多个细胞器上有作用,能够刺激 ATP 的合成。若线粒体基质中 Ca²⁺ 超载会导致 ROS 种类的产生增强,以及渗透性过渡孔的触发和细胞色素 c 的释放,导致细胞凋亡),从而改善线粒体的功能^[37]。在对龙眼进行低温贮藏实验时也发现,通过提高呼吸代谢相关酶活性,ATP 含量等呼吸代谢相关物质可以降低冷害发生,进而延缓果实衰老^[52]。

2.1.3 射线辐照

射线辐照是利用 γ 和 X 射线辐照,使果蔬内部产生游离基团,清除有害物质。通过对西兰花进行 1.5, 4.5, 9.0 和 15 kJ/m 等 4 种剂量的紫外辐照前处理时发现,一定范围内紫外辐照剂量越高,总抗氧化能力越大,这在很大程度上增强了其清除 ROS 的能力,有效地延长了鲜切西兰花的贮藏时间^[53]。在 5 °C 贮藏条件下,对蓝莓采用 0~3.0 kGy 剂量的 ⁶⁰Co-γ 辐照处理时发现,经 1.0~2.5 kGy 辐照处理后,蓝莓的腐烂率和营养损耗得到明显抑制,同时其呼吸速率均低于对照组。此实验结果表明,一定剂量的 ⁶⁰Co-γ 辐照能够抑制蓝莓的呼吸作用,延缓生理功能的下降^[54]。

2.2 化学保鲜技术对呼吸代谢途径的影响

果蔬的化学保鲜技术主要运用一些化学保鲜剂和植物生长调节剂对果蔬进行熏蒸、浸泡、涂膜等操作来实现。

2.2.1 熏蒸法

熏蒸法主要利用化学试剂的挥发性或将不易挥发的化学试剂利用一些方法转化成易挥发状态,以分子态气体的形式抑制或杀死果蔬表面的病原微生物,并渗透到果实细胞中^[55]。枇杷在贮藏过程中,ADP 和 ATP 含量下降明显,SDH、CCO、H⁺-腺苷三磷酸酶 (H⁺-ATPase) 和 Ca²⁺-ATPase 的活性也会发生下降现象,这些现象表明线粒体功能受损会导致枇杷能荷水平降低,当枇杷果实进行 15 和 25 μL/L NO 熏蒸时,NO 能够较好地保持枇杷果实线粒体功能^[56]。分别对接拟茎点霉的龙眼进行二硝基苯 (DNP) 和 ATP 减压真空渗透处理时,得到 ATP 在降低果实病害和果皮褐变的同时,降低呼吸速率和果皮 CCO, AAO,

PPO 活性, 以及 NAD 和 NADH 含量, 果皮 NADK 活性和 NADP^+ 、NADPH 含量有所提升, 推断出 ATP 处理能够增强 PPP 代谢途径, 降低呼吸末端氧化酶活性, 进而提高龙眼的贮藏时间^[57]。

2.2.2 浸泡法

浸泡法一般将果蔬浸泡在一定浓度的保鲜处理液中一段时间后取出进行贮藏, 通过相应的浸泡处理能够实现延长果蔬贮藏期的效果。研究表明, 能量不足或低能量会破坏膜的完整性, 导致果蔬冷害发生^[58]。在草酸对番茄果实的冷害、能量代谢和番茄红素代谢发育的影响实验中, 草酸浸泡番茄能维持较高的 ATP 和 ADP 水平, 增加 SDH, Ca^{2+} -ATPase 和 H^+ -ATPase 的活性, 保持线粒体功能和细胞膜完整性, 改善 TCA 循环和电子传输链的效率, 维持更高的能量水平, 增强番茄贮藏期间的耐冷性^[59]。对桃果实施以间歇升温和草酸复合处理明显抑制了线粒体中 SDH, CCO, H^+ -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase 酶活性的降低, 维持了较高的 ATP, ADP, AMP 含量和能荷水平, 相应的酶活性和物质含量反映了桃果实线粒体功能的完整性和正常的呼吸代谢, 从而对抗冷害发生^[60]。在对荔枝果实进行 1.0 mmol/L ATP 溶液浸泡处理 3 min 后接种荔枝霜疫霉菌的研究中得出, ATP 处理可保持荔枝内部较高 ATP 含量和能量水平, 有效地抑制了磷脂酶 D、酸性磷酸酶和脂氧合酶的活性, 起到减少膜脂质过氧化, 维持细胞膜在贮藏初期完整性的作用, 从而抵御了霜疫霉菌的侵染^[61]。

2.2.3 涂膜法

果蔬涂膜后表面会形成一层极薄的涂层, 可抵御接触空气发生的氧化反应, 更好地保持果蔬的营养成分和外观品质。近年来, 人们对可食性涂膜应用在果蔬贮藏方面的关注度增加, 由于可食性涂膜的应用可减少不可降解包装材料的使用量, 对环境保护起到了积极效果^[62], 因此可食性涂膜相对于包装材料得到更广泛的关注。用 0.01, 0.03, 0.05 g/L 这 3 种质量浓度的海藻酸钠涂膜处理甜樱桃, 能有效地延迟果实衰老, 降低呼吸速率, 保持较高浓度的总酚和总抗氧化活性, 抑制 ROS 的产生^[63]。芦荟凝胶涂膜也产生了相似的贮藏效果, Martínez-Romero 等^[64]对甜樱桃进行芦荟凝胶涂膜处理后, 其质量损失率、亮度和软化程度的下降受到抑制, 呼吸速率、茎褐变和微生物数量的增加也较对照组有很大差别, 同时也保持了较好的果实外观。由此可见, 芦荟凝胶涂膜也对果实风味和香气均有较积极的作用。漂白紫胶涂膜甜樱桃也起到了类似的作用, 甜樱桃在贮藏过程中呼吸速率得到了抑制, 并且减弱了甜樱桃生理品质的下降速率^[65]。以上研究表明, 果蔬进行涂膜后, 呼吸速率得到明显的抑制, 同时抗氧化能力显著提高, 对 ROS 的清除能力加强, 果蔬氧化损伤程度减弱, 实现了提高果蔬

贮藏品质的目的。

2.3 生物保鲜技术对呼吸代谢途径的影响

生物保鲜是一种新兴的保鲜技术, 其利用自然或人工控制的微生物菌群及其产生的抗菌物质抵抗病原菌的侵害, 或使果蔬细胞结构发生变化, 增加抗病能力, 主要包括添加繁殖快且产生抗菌物质的菌株、纯化的抗菌物质、发酵液、嗜温乳酸菌作为安全的温度保护剂^[66]。魔芋多糖作为一种抗菌物质, 能够在龙眼果皮表面形成一层膜, 减少外部空气进入龙眼果实内部, 从而降低果实的呼吸速率, 抑制果皮褐变和微生物生长速率, 可见魔芋多糖对龙眼果实达到了较好的保鲜效果^[67]。除了魔芋多糖外还有许多如 B-CHD 芽孢杆菌发酵液、纳他霉素、乳酸链球菌素等生物保鲜剂均对果蔬贮藏保鲜具有积极作用。生物保鲜技术目前主要集中在微生物防治方面, 对呼吸代谢途径的研究相对较少。

以上研究表明, 物理、化学和生物保鲜技术对果蔬呼吸代谢关键调节酶、中间产物以及在此过程中产生的 ROS 均有一定的影响, 正确地运用保鲜技术能有效地调控呼吸代谢速率, 起到延长果蔬贮藏期的效果, 从而有利于果蔬的深加工和在其他方面的应用。

3 结语

果蔬采后极易腐烂变质, 其中呼吸代谢对腐烂变质具有一定的影响。呼吸代谢无法终止, 只能通过一些保鲜技术对呼吸代谢过程中的关键酶和中间产物进行调节控制, 来实现延缓果蔬呼吸代谢的作用。呼吸代谢是一个较为复杂的过程, 涉及多种代谢途径, 在该途径会产生多种酶和中间产物, 这些酶类对呼吸代谢途径的影响还需要做进一步研究, 同时中间产物是否会对机体的其他代谢途径产生促进或者抑制效果也未得到明确的验证。

参考文献:

- [1] 李美玲, 林育钊, 王慧, 等. 能量状态在果蔬采后衰老中的作用及其调控研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 298—303.
LI Mei-ling, LIN Yu-zhao, WANG Hui, et al. Recent Advances in the Role and Regulation of Energy Status in Senescence of Harvested Fruits and Vegetables[J]. Food Science, 2019, 40(9): 298—303.
- [2] 刘愚, 吴有梅. 果蔬贮藏中的逆境效应及应用[J]. 中国农业科学, 1992, 25(5): 1—5.
LIU Yu, WU You-mei. Stress-Effects and Application on Storage of Fruits and Vegetables[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1992, 25(5): 1—5.
- [3] LEE L, ARUL J, LENCKI R, et al. A Review on Modified Atmosphere Packaging and Preservation of Fresh

- Fruits and Vegetables: Physiological Basis and Practical Aspects-Part I[J]. *Packaging Technology and Science*, 1995, 8(6): 315—331.
- [4] LIN Yi-xiong, LIN Yi-fen, CHEN Yi-hui, et al. Hydrogen Peroxide-Induced Changes in Energy Status and Respiration Metabolism of Harvested Longan Fruit in Relation to Pericarp Browning[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2016, 64(22): 4627—4632.
- [5] 赵云峰, 林河通, 林娇芬, 等. 龙眼果实采后呼吸强度、细胞膜透性和品质的变化[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2005, 34(2): 263—268.
- ZHAO Yun-feng, LIN He-tong, LIN Jiao-fen, et al. Changes of Respiration Rate, Cell Membrane Permeability and Quality in Post-Harvest Longan Fruit[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2005, 34(2): 263—268.
- [6] GE Yiong-hong, CHEN Yan-ru, LI Can-ying, et al. Effect of Trisodium Phosphate Dipping Treatment on the Quality and Energy Metabolism of Apples[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 324—329.
- [7] 唐皖悦. 低聚糖素对砀山酥梨品质及贮藏特性的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018: 6—7.
- TANG Wan-yue. Oligosaccharides Element of Dang-Shan Showed the Influence of the Quality and Storage Characteristics[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018: 6—7.
- [8] 李玲. O_2/CO_2 气调对西兰花保鲜效果的影响[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014: 17—18.
- LI Ling. The Effects of O_2/CO_2 Controlled Atmospheres on Storage Quality of Broccoli[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014: 17—18.
- [9] JOHNSON X, ALRIC J. Central Carbon Metabolism and Electron Transport in *Chlamydomonas Reinhardtii*: Metabolic Constraints for Carbon Partitioning Between Oil and Starch[J]. *Eukaryotic Cell*, 2013, 12(6): 776—793.
- [10] BAR-EVEN A, FLAMHOLZ A, NOOR E, et al. Re-thinking Flycolysis: on the Biochemical Logic of Metabolic Pathways[J]. *Nature Chemical Biology*, 2012, 8(6): 509—517.
- [11] RENZ A, STITT M M. Partial Purification from Potato Tubers of Three Fructokinases and Three Hexokinases Which Show Differing Organ and Developmental Specificity[J]. *Planta*, 1993, 190(2): 156—165.
- [12] FERNIE A R, CARRARI F, SWEETLOVE L J. Respiratory Metabolism: Glycolysis, the TCA Cycle and Mitochondrial Electron Transport[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2004, 7(3): 254—261.
- [13] 王镜岩, 朱圣庚, 徐长法. 生物化学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 315—330.
- WANG Jing-yan, ZHU Sheng-geng, XU Chang-fa. *Essential Biochemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 315—330.
- [14] PLAXTON W C. The Organization and Regulation of Plant Glycolysis[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1996, 47(1): 185—214.
- [15] CARRARI F, NUNES-NESE A, GIBON Y, et al. Reduced Expression of Aconitase Results in an Enhanced Rate of Photosynthesis and Marked Shifts in Carbon Partitioning in Illuminated Leaves of Wild Species Tomato[J]. *Plant Physiology*, 2003, 133: 1322—1325.
- [16] LANCIEN M, FERRARIO-MERY S, ROUX V, et al. Simultaneous Expression of NAD-Dependent Isocitrate Dehydrogenase and Other Krebs Cycle Genes after Nitrate Resupply to Short-Term Nitrogenstarved Tobacco[J]. *Plant Physiology*, 1999, 120: 717—725.
- [17] STITT M, FERNIE A R. From Measurement of Metabolites to Metabolomics: an 'On The Fly' Perspective Illustrated by Recent Studies of Carbon-Nitrogen Interactions[J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2003, 14: 136—144.
- [18] 刘丽杰. 低温下 ABA 调控冬小麦糖代谢及抗寒基因表达的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013: 23—24.
- LIU Li-jie. Effects of ABA on Sugar Metabolism and Expression of Antifreeze Genes of Winter Wheat[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2013: 23—24.
- [19] MOLLER I M. Plant Mitochondria and Oxidative Stress: Electron Transport, NADPH Turnover, and Metabolism of Reactive Oxygen Species[J]. *Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology*, 2001, 52: 561—591.
- [20] MOLLER I M. A New Dawn for Plant Mitochondrial NAD(P)H Dehydrogenases[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7: 235—237.
- [21] VANLERBERGHE G C, MCINTOSH L. Alternative Oxidase: from Gene to Function[J]. *Annual Review of Plant Physiology & Plant Molecular Biology*, 1997, 48: 703—734.
- [22] RICQUIER D, BOUILLAUD F. The Uncoupling Protein Homologues: UCP1, UCP2, UCP3, StUCP and AtUCP[J]. *Biochem Journal*, 2000, 345: 161—179.
- [23] GRANOT D, DAVID-SCHWARTZ R, KELLY G. Hexose Kinases And Their Role in Sugar-Sensing and Plant Development[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 44.
- [24] TURNER J F, COPELAND L. Hexokinase II of Pea Seeds[J]. *Plant Physiology*, 1981, 68(5): 1123—1127.
- [25] MA ENRIQUETA MUÑOZ, PONCE E. Pyruvate Kinase: Current Status of Regulatory and Functional Properties[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B Biochemistry and Molecular Biology*, 2003, 135(2): 197—218.
- [26] 陈强, 郭修武, 胡艳丽, 等. 淹水对甜樱桃根系呼吸和糖酵解末端产物的影响[J]. *园艺学报*, 2008, 35(2): 169—174.
- CHEN Qiang, GUO Xiu-wu, HU Yan-li, et al. Effects of Waterlogging on Respiration and Glycolytic End Products in Roots of Sweet Cherry[J]. *Acta Horticul-*

- turaeSinica, 2008, 35(2): 169—174.
- [27] NIEDERHUT M S, GIBBONS B J, PEREZ-MILLER S, et al. Three-Dimensional Structures of the Three Human Class I Alcohol Dehydrogenases[J]. Protein Science: A Publication of the Protein Society, 2001, 10: 697—706.
- [28] VENKATARAMAIAH T H, PLAPP B V. Formamides Mimic Aldehydes and Inhibit Liver Alcohol Dehydrogenases and Ethanol Metabolism[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2003, 278: 36699—36706.
- [29] NORDLING E, JÖRNVALL H, PERSSON B. Medium-Chain Dehydrogenases/Reductases (MDR)[J]. European Journal of Biochemistry, 2002, 269: 4267—4276.
- [30] NORDLING E, PERSSON B, JÖRNVALL H. Differential Multiplicity of MDR Alcohol Dehydrogenases: Enzyme Genes in the Human Genome Versus those in Organisms Initially Studied[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2002, 59: 1070—1075.
- [31] JELSKI W, KUTYLOWSKA E, LANIEWSKA-DUNAJ M, et al. Alcohol Dehydrogenase (ADH) Isoenzymes and Aldehyde Dehydrogenase (ALDH) Activity in the Sera of Patients with Acute and Chronic Pancreatitis[J]. Experimental and Molecular Pathology, 2011, 91: 631—635.
- [32] JELSKI W, LANIEWSKA-DUNAJ M, ORYWAL K, et al. The Activity of Alcohol Dehydrogenase (ADH) Isoenzymes and Aldehyde Dehydrogenase (ALDH) in the Sera of Patients with Brain Cancer[J]. Neurochemical Research, 2014, 39: 2313—2318.
- [33] QUAYTMAN S, SCHWARTZ S D. Comparison Studies of the Human Heart and Bacillus Stearotherophilus LDH by Transition Path Sampling[J]. The Journal of Physical Chemistry. A, 2009, 113: 1892—1897.
- [34] CAO R, ZEIDAN A A, RÅDSTRÖM P, et al. Inhibition Kinetics of Catabolic Dehydrogenases by Elevated Moieties of ATP and ADP-Implication for a New Regulation Mechanism in Lactococcus Lactis[J]. FEBS Journal, 2010, 277: 1843—1852.
- [35] SERINA J, FERNANDES M X, CASTILHO P C. Effects of Hydroxycinnamic Acids on the Glycolysis Pathway[J]. South African Journal of Botany, 2019, 120: 219—229.
- [36] AFFOURTIT C, KRAB K, LEACH G R, et al. New Insights in the Regulation of the Plant Succinate Dehydrogenase - on the Role of the Protonmotive Force[J]. Journal of Biological Chemistry, 2001, 276(35): 32567—32574.
- [37] KAN Jian, WANG Hong-mei, JIN Chang-hai. Changes of Reactive Oxygen Species and Related Enzymes in Mitochondrial Respiration during Storage of Harvested Peach Fruits[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10: 149—158.
- [38] SOTO I C, FONTANESI F, LIU J, et al. Biogenesis and Assembly of Eukaryotic Cytochrome C Oxidase Catalytic Core[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2012, 17: 883—897.
- [39] BUSH D S. Calcium Regulation in Plant Cells and Its Role in Signaling[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1995, 46(1): 95—122.
- [40] BOWLER C, FLUHR R. The Role of Calcium and Activated Oxygen as Signals for Controlling Cross-Tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2000, 5: 241—246.
- [41] 宗会, 胡文玉. 涂膜苹果在贮藏期间钙信使组分的变化[J]. 园艺学报, 1998, 25(2): 187—188.
- ZONG Hui, HU Wen-Yu. Changes of Calcium Messenger Component during Storage of Apple with Sodium Alginate Coating[J]. Acta HorticulturaeSinica, 1998, 25(2): 187—188.
- [42] CHAUHAN A S, ZHUANG L, GAN B. Antagonism Between Antiviral Signaling and Glycolysis[J]. Trends in Endocrinology & Metabolism, 2019, 30(9): 571—573.
- [43] VANDER HEIDEN M G, CANTLEY L C, THOMPSON C B. Understanding the Warburg Effect: the Metabolic Requirements of Cell Proliferation[J]. Science, 2009, 324(5930): 1029—1033.
- [44] BODNER G M. Metabolism Part I: Glycolysis for the Embden-Meyerhof Pathway[J]. Journal of Chemical Education, 1986, 63(7): 566—570.
- [45] ZHOU Qian, ZHANG Chun-lei, CHENG Shun-chang, et al. Changes in Energy Metabolism Accompanying Pitting in Blueberries Stored at Low Temperature[J]. Food Chemistry. 2014, 164: 493—501.
- [46] PARTRIDGE R S, MONROE S M, PARKS J K, et al. Spin Trapping of Azidyl and Hydroxyl Radicals in Azide-Inhibited Rat Brain Submitochondrial Particles[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics. 1994, 310: 210—217.
- [47] LI Ling, LYU Feng-yan, GUO Yan-yin, et al. Respiratory Pathway Metabolism and Energy Metabolism Associated with Senescence in Postharvest Broccoli (*Brassica Oleracea* L var *Italica*) Florets in Response to O₂ / CO₂ Controlled Atmospheres[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 330—336.
- [48] APEL K, HIRT H. Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress and Signal Transduction[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55(1): 373—399.
- [49] LIU Hai, SONG Li-li, JIANG Yue-ming, et al. Short-Term Anoxia Treatment Maintains Tissue Energy Levels and Membrane Integrity and Inhibits Browning of Harvested Litchi Fruit[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2007, 87(9): 1767—1771.
- [50] 李栋, 占智豪, 周心悦, 等. 高浓度二氧化碳气调抑制鲜切莲藕酶促褐变的机制[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 101—110.
- LI Dong, ZHAN Zhi-hao, ZHOU Xin-yue, et al. Mechanism of the Inhibition of Elevated CO₂ Atmosphere

- on Enzymatic Browning of Fresh-Cut Lotus Roots[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2020, 46(1): 101—110.
- [51] WANG Y, LONG L E. Respiration and Quality Responses of Sweet Cherry to Different Atmospheres during Cold Storage and Shipping[J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 92(2): 62—69.
- [52] JIN Peng, ZHANG Yu, SHAN Ti-min, et al. Low-Temperature Conditioning Alleviates Chilling Injury in Loquat Fruit and Regulates Glycine Betaine Content and Energy Status[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2015, 63(14): 3654—3659.
- [53] GINÉS BENITO MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, PERLA A GÓMEZ, PRADAS I, et al. Moderate UV-C Pretreatment as A Quality Enhancement Tool in Fresh-Cut Bimi Broccoli[J]. Postharvest Biology & Technology, 2011, 62(3): 327—337.
- [54] 姚远, 王琛, 陶烨, 等. ^{60}Co - γ 辐照对冷藏期间蓝莓果实品质和生理的影响[J]. 辽宁农业科学, 2017(5): 32—39.
- YAO Yuan, WANG Chen, TAO Ye, et al. Effect on Quality and Physiological of Blueberry Fruits Irradiated by ^{60}Co - γ during Cold Storage[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2017(5): 32—39.
- [55] 廖嘉, 胡文忠, 权春善, 等. 采后浆果熏蒸保鲜技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 277—284.
- LIAO Jia, HU Wen-zhong, QUAN Chun-shan, et al. Fumigation Preservation Technology for Postharvest Berries: A Review[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 277—284.
- [56] 陈发河, 张美姿, 吴光斌. NO 处理延缓采后枇杷果实木质化劣变及其与能量代谢的关系[J]. 中国农业科学, 2014, 47(12): 2425—2434.
- CHEN Fa-he, ZHANG Mei-zi, WU Guang-bin. Study of Lignification's Delaying and Its Relationship with Energy Metabolism in Loquat Fruits after Nitric Oxide Fumigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(12): 2425—2434.
- [57] 陈梦茵, 林河通, 洪延康, 等. DNP 和 ATP 对 *Phomopsis Longanae* Chi 侵染的龙眼果实病害发生、能荷状态和呼吸代谢的调控[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 56—65.
- CHEN Meng-yin, LIN He-tong, HONG Yan-kang, et al. Regulation of 2,4-Dinitrophenol and Adenosine Triphosphate on Disease Development, Energy Status and Respiratory Metabolism of *Phomopsis Longanae* Chi-Infected Longan Fruit[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(5): 56—65.
- [58] JIN Peng, ZHU Hong, WANG Lei, et al. Oxalic Acid Alleviates Chilling Injury in Peach Fruit by Regulating Energy Metabolism and Fatty Acid Contents[J]. Food Chemistry, 2014, 161: 87—93.
- [59] LI Pei-yan, YIN Fei, SONG Li-jun, et al. Alleviation of Chilling Injury in Tomato Fruit by Exogenous Application of Oxalic Acid[J]. Food Chemistry, 2016, 202: 125—132.
- [60] 朱虹. 间歇升温 and 草酸复合处理减轻桃果实冷害的作用及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 6—7.
- ZHU Hong. Study on the Effect of Intermittent Warming Peach Combined with Oxalic Acid on Kee Fresh After Harvest[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 6—7.
- [61] 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.
- [62] CAMPOS C A, GERSCHENSON L N, FLORES S K. Development of Edible Films and Coatings with Antimicrobial Activity[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(6): 849—875.
- [63] HUERTAS M D, MARÍA S, VALERO D. Alginate Coatings Preserve Fruit Quality and Bioactive Compounds during Storage of Sweet Cherry Fruit[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(8): 2990—2997.
- [64] MARTÍNEZ-ROMERO D, ALBURQUERQUE N, VALVERDE J M, et al. Postharvest Sweet Cherry Quality and Safety Maintenance by Aloe Vera Treatment: A New Edible Coating[J]. Postharvest Biology & Technology, 2006, 39(1): 93—100.
- [65] 甘瑾, 马李一, 张弘, 等. 漂白紫胶涂膜对甜樱桃常温贮藏品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(3): 650—654.
- GAN Jin, MA Li-yi, ZHANG Hong, et al. Effect of Bleached Shellac Coating on Quality of Sweet Cherry during Storage at Room Temperature[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2009, 25(3): 650—654.
- [66] 熊涛, 乐易林. 生物保鲜技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(2): 111—144.
- XIONG Tao, LE Yi-lin. The Advance of Biological Technique of Preserving Fresh Produce[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(2): 111—144.
- [67] 庞杰, 邹少强, 李艺雄, 等. 生物保鲜膜低温贮藏龙眼及其保鲜机理[J]. 延边大学农学学报, 2000, 22(4): 250—255.
- PANG Jie, ZOU Shao-qiang, LI Yi-xiong. Effect of Biological Fresh-Keeping Film on Storage and Fresh-Keeping Mechanics of Longan Fruits at Low Temperature[J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2000, 22(4): 250—255.