

邓红军,刘芳,杨明飞,等. 采后桃果实耐冷性机理研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):6-12.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.16.002

采后桃果实耐冷性机理研究进展

邓红军¹, 刘芳², 杨明飞³, 黄悦⁴, 刘伟¹, 李光凤¹, 杨小娥¹

(1. 贵阳康养职业大学医学技术系, 贵州贵阳 550081; 2. 贵州省贵阳市花溪区人民医院口腔科, 贵州贵阳 550025;

3. 贵阳康养职业大学卫生管理系, 贵州贵阳 550081; 4. 贵阳康养职业大学科研处, 贵州贵阳 550081)

摘要:桃是我国主要水果之一,种植规模和产量全球第一。桃果实富含多种糖、酸和维生素,肉多皮薄,口感独特,营养丰富,深受消费者喜爱。通常于高温季节采收,采后易腐烂,不耐贮藏。采后低温冷藏保鲜是主要措施之一,但桃果实对低温敏感,易出现褐变、汁液减少、革质化、风味和成熟软化异常等冷害症状,影响采后贮藏品质和商用价值,而桃果实耐冷性的强弱对采后果实品质具有重要的影响。本文阐述了桃果实的冷害症状、耐冷性机理,综述了近年来国内外研究人员对桃果实抗氧化体系、细胞壁代谢、细胞膜代谢、能量代谢、糖代谢等在冷藏过程中对耐冷性的影响机制。最后对未来桃果实耐冷性机理研究进行了展望,皆在为研发采后桃果实冷藏保鲜技术提供参考。

关键词:桃果实;耐冷性机理;抗氧化体系;细胞膜代谢;细胞壁代谢;能量代谢;糖代谢

中图分类号:S662.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)16-0006-06

桃原产于我国,距今已有4 000多年的栽培历史,我国桃种植面积和年产量分别为89.0万hm²和1 599.3万t,均居世界第1位^[1-2]。桃果肉鲜美多汁,色泽艳丽,富含多种营养物质^[2];除蟠桃外,多为圆形或长圆形;除油桃外,表皮均有茸毛;肉质柔软、脆硬或密韧。桃果实肉多皮薄,在采后易受到机械损伤,引起病原菌的侵染,加速腐烂变质的进程,降低桃果实商品和食用价值^[3]。桃果实是一种典型的冷敏型果实,采后易出现冷害症状,引起品质劣变,耐冷性是评价桃果实耐贮性能的重要指标^[4]。低温冷害是制约桃产业发展的瓶颈之一,研究人员对桃果实冷藏过程中的耐冷性机理及其调控措施进行了探究,以期通过阐明耐冷性调节机制,采取有效措施,提高桃果实对冷害的抵抗力,增强耐冷性,减轻冷害,延缓品质劣变。本文综述了近年来国内外研究人员对桃果实耐冷性机制调节方面的研究进展,以期研究桃果实冷藏保鲜技术

提供进一步参考。

1 桃果实冷害症状

桃属于典型的呼吸跃变型果实,对低温敏感性高,8℃以下贮藏2周以上就易发生冷害^[3-4],冷害症状主要有絮败、革质化、果肉褐变、风味异常、不能正常成熟等^[5-6]。

絮败属于典型的冷害症状,指后熟过程中出现果肉质地绵化、汁液变少、固有风味丧失、成熟软化异常、果肉褐变、果肉分离难度增大等一系列生理异常现象^[7]。絮败与细胞壁果胶关系紧密,多聚半乳糖醛酸酶(PG)、果胶甲酯酶(PME)是参与果胶质降解的主要酶,冷藏导致桃果实细胞壁代谢相关的酶异常,打破了细胞壁新陈代谢的平衡^[8]。絮败是冷胁迫破坏了果胶质的增溶作用,在PME的作用下,形成了大量的低酯高分子量CDTA-果胶^[9]。果实软化异常、硬度提高的原因也与原果胶增加及细胞间层发生果胶质凝胶有关,导致果实棉化、汁液流失、不能正常成熟软化,发生絮败现象^[10-11]。革质化与絮败相比,果肉汁液更少,褐变更深,果肉组织非棉化,细胞壁异常增厚,硬度明显增加。郜海燕等研究指出,七八成熟的水蜜桃冷藏期间硬度增加,贮藏一段时间后出汁率下降,后熟异常,出现革质化,冷害特征明显^[12]。

采后桃果实冷藏期间的褐变现象主要与酚类物质、多酚氧化酶、氧气等因素相关。Liu等研究发

收稿日期:2021-11-02

基金项目:贵州省地方标准研制项目(编号:2018-046);贵康大科研项目(编号:贵康大K2022-12);贵州省遵义市科技计划(编号:遵市科合成转NS(2021)4号);贵州省贵阳市科技计划(编号:筑科合同[2020]-16-3)。

作者简介:邓红军(1989—),男,贵州铜仁人,硕士,讲师、工程师,研究方向为食品贮藏保鲜技术。E-mail:denghjun06@163.com。

通信作者:刘芳,硕士,主治医师,研究方向为口腔健康与食品营养、口腔黏膜疾病诊治。E-mail:ye_ling168@sina.com。

现,0~6℃低温冷藏均促进了桃果实果肉褐变程度,不同温度对桃果实褐变的影响不同,4、6℃冷藏比0.2℃贮藏褐变更严重^[13]。冷害会使桃果实贮藏期间后熟出现异常,不能正常成熟软化^[12,14]。

因此,桃果实冷藏期间冷害症状因贮藏温度、果实品种、成熟度、贮藏时间、贮藏微气候组成环境等而各异。

2 桃果实耐冷性机理

桃果实的耐冷性(cold tolerance, CT)是指果实对冷害的抵抗力和冷胁迫的耐受能力,在低温胁迫下保持膜脂的液晶状态或可溶性蛋白质的适当活性,以使膜和代谢不被扰乱^[15]。冷害是冷敏型果实低温贮藏过程中的主要障碍,桃果实的耐冷性是指果实对冷胁迫的抵抗力,抵御冷害损伤,保护果实采后品质的重要性能。冷害的发生是受多种因素共同作用的复杂过程(图1),故耐冷性也受多种因素的多重影响,现有报道显示:桃果实的耐冷性主要与贮藏过程中抗氧化体系、细胞壁代谢、细胞膜代谢、能量代谢、糖代谢等因素有关。

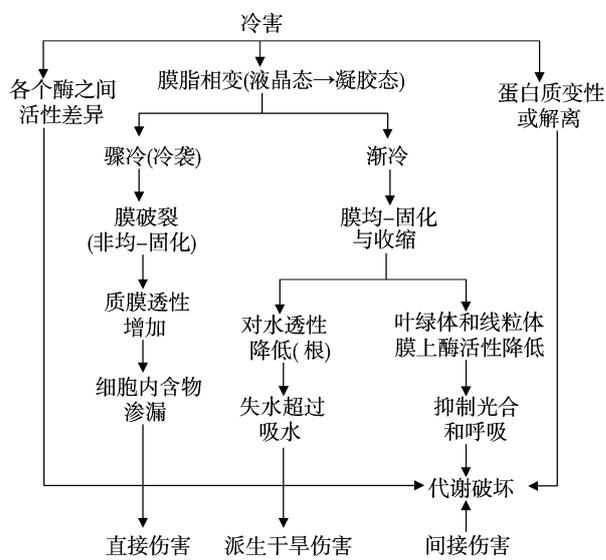


图1 冷害的发生机理^[16]

2.1 桃果实耐冷性与抗氧化体系的关系

采后果实抗氧化体系由酶促抗氧化体系和非酶促抗氧化体系组成^[17]。关于桃果实采后抗氧化体系的研究报道主要集中于酚类物质、超氧阴离子($O_2^- \cdot$)、过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化物质对耐冷性的影响。

不同外源物质处理对桃果实抗氧化体系调节

耐冷性的影响机制不尽相同。冷害胁迫会诱导果实产生过量的 H_2O_2 和 $O_2^- \cdot$ 对果实产生氧化损伤,降低果实的耐冷性。Song等研究发现,经NO处理的冷藏桃果实PpAOX基因表达量和PpPOD1/2基因表达量与 H_2O_2 含量的变化趋势一致,说明AOX(alternative oxidase)可能是通过清除 H_2O_2 达到有效降低过量 $O_2^- \cdot$ 对桃果实的伤害,表明基因PpPOD1/2、PpAOX与果实耐冷性密切相关^[18]。热水(HW)和热空气(HA)处理均可以降低活性氧自由基量(ROS),增强抗氧化酶活性,提高耐冷性。HA处理对抗坏血酸(ASA)和谷胱甘肽(GSH)均无作用,HW处理则加强了贮藏前期ASA代谢和后期GSH的代谢,增强了ASA-GSH循环系统的代谢和PpaSOD5、PpaCAT1和PpaAPX2基因的上调表达,这可能是冷藏期间HW处理组桃果实ROS的量减少和褐变程度更轻的重要原因^[19]。

不同外源物质浓度处理对桃果实耐冷性的影响各异。0.1 mmol/L外源褪黑素(MT)处理桃果实后贮藏于0℃中发现,MT处理增加了葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(GPD)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)和莽草酸脱氢酶(SKD)的活性,但抑制了PPO和POD的活性,这可能有助于激活总酚和内源性水杨酸(SA)的积累,对增强果实耐冷性、降低冷害有直接作用^[20]。SA处理桃果实后于0℃贮藏35 d发现,所有SA处理组桃果实均表现出较高的SOD、CAT、POD和自由基清除活性(RSA),但SA处理组PPO活性降低;经2.0 mmol/L SA处理组桃果实抗氧化酶活性最高,质量损失最少,硬度最大、pH值最小,果实的耐冷性更强,有利于保持果实的采后品质^[21]。草酸(OA)处理通过调节CAT、POD、SOD活性及还原型抗坏血酸(AsA)、谷胱甘肽(GSH)含量的变化,提高桃果实低温贮藏下抗氧化防御系统的能力和PPO活性,增强桃果实抵抗冷胁迫的能力,从而延缓果实的成熟和衰老^[22]。

酚类物质对桃果实耐冷性的调节作用受到外源物质的影响较大,不同外源物质处理的效果各异。HW处理通过调节酚类和氨基酸代谢,维持较高水平的酚类和氨基酸含量,以增强桃果实的抗氧化能力,提高桃果实的耐冷性,减轻冷害^[6]。1-甲基环丙烯(1-MCP)和间歇加热处理后2℃冷藏,2种方法单独或者联合处理均提高了桃果实冷藏期和货架期总酚物质的量和抗氧化能力,二者联合处理更有利于增强果实耐冷性,降低果实冷害,保

持最好的果实品质^[23]。外源甜菜碱(GB)可以有效减轻拟南芥和草莓的冷害^[24],越来越多的证据表明外源 GB 通过增加香蕉^[25]、枇杷^[26]果实的抗氧化酶活性来提高耐冷性,增强对冷害的抵抗力,而对桃果实的研究发现,外源 GB 主要是通过调节酚和糖的代谢,保持较高的酚类物质和蔗糖的量来增强桃果实的耐冷性^[27],Gao 等用 24-油菜素内酯(24-EPI)处理桃果实^[28]也发现类似结论。

采后桃果实耐冷性与抗氧化体系的关系已有较多的研究报道,酶促抗氧化体系和非酶促抗氧化体系对桃果实耐冷性的影响机制也不尽相同,且外源物质(外界刺激)种类、处理方式方法、使用剂量、贮藏温度和方式等因素都对抗氧化体系产生不同的影响,从而影响桃果实的耐冷性。

2.2 桃果实耐冷性与细胞壁代谢的关系

果实细胞壁主要由纤维素、半纤维素和果胶质组成,纤维素和果胶质的酶解程度对果实软化有直接的影响。果胶质的代谢主要受到果胶酶的调节作用,但纤维素酶对果胶质降解也有一定的影响,低温胁迫引起桃果实冷害絮败是因细胞壁果胶质溶解不完全、降解过程受阻所致^[29]。冷藏桃果实经外源乙烯处理后通过诱导编码扩张蛋白和细胞壁水解酶基因的表达上调,尤其是提高木糖苷酶(XYL)和半乳糖苷酶(GAL)基因的表达量来提高采后桃果实耐冷性,减轻冷害,但也加速了果肉的软化^[30]。

冷藏期间桃果实的细胞壁代谢与果胶质代谢酶密切相关。在冷藏成熟过程中,粉状桃果实(mealy fruit)中的内源 β -1-4-葡聚糖酶(β -1,4-GLU)、内源 β -1-4-甘露聚糖酶(β -1,4-MAN)、 α -阿拉伯糖苷(α -ARA)、 β -半乳糖苷酶(β -GAL)、多聚半乳糖醛酸酶内切酶(endo-PG)活性比多汁果实(juicy fruit)更低,而 PME 活性在轻度粉状果实中较低,在完全粉状果实中较高,说明冷藏会影响多种细胞壁修饰酶的活性,对果胶代谢产生重要的影响^[31]。表面毛绒对桃果实冷藏期间品质有不利影响,导致细胞壁溶解受阻,从而引起冷害加剧,发生棉化^[32]。冷藏桃果实细胞壁中共价结合型和离子结合型果胶质的溶解不平衡,水溶性果胶含量显著下降,耐冷性降低^[33]。冷藏期间桃果实果胶质和纤维素的降解受阻,纤维素逐渐减少,导致高分子量的果胶质过量积累,果汁黏度升高^[34]。桃果实果胶质降解代谢的异常与

PME 和 PG 活性的变化密切相关,二者的不平衡是导致细胞壁中果胶质代谢异常,产生本文所述冷害症状的主因^[29]。

因此,现有研究表明桃果实的耐冷性与果胶质、细胞壁代谢相关的 PG、PME、GAL、XYL、 β -1,4-GLU、 β -GAL、 β -1,4-MAN、 α -ARA 等的活性变化密切相关。但现有研究对纤维素溶解、纤维素、半纤维素分解相关酶的变化与果实耐冷性的关系、果实细胞壁结构改变与果实耐冷性的关系及桃果实细胞壁代谢相关酶在冷藏过程中互动机制的研究较少,后期应加强对这几方面的研究。

2.3 桃果实耐冷性与细胞膜代谢的关系

脂质是构成细胞膜的主要成分之一,稳定的膜脂结构能够保持细胞的正常生命活动并维持其基本形态。细胞膜是最先感受到果实冷害的,低温首先对细胞膜造成伤害,冷害胁迫会诱导细胞膜构象和结构作出响应,也是最初的应激反应。

冷害胁迫导致细胞膜的相变平衡被破坏,使膜脂从液晶态向凝胶态转变,脂肪酸饱和度降低,膜的外形和厚度也发生改变^[35]。细胞膜透性和丙二醛(MDA)含量的变化可作为植物的耐冷性指标^[36]。低温冷藏环境破坏细胞膜相变平衡后,细胞膜透性增强,电导率(EI)增大和 MDA 含量增加,细胞内物质流动性异常,与细胞膜结构稳定性相关的酶活性发生改变,导致细胞膜代谢失调和结构功能异常,产生有毒物质,对细胞产生毒害,使果实的耐冷性降低,加重冷害^[37-39]。

温度是影响细胞膜流动性的最直接因素之一。低温胁迫因产生大量有害自由基对细胞膜产生毒害作用,破坏细胞膜,导致果实耐冷性降低,是冷害发生的主要原因。Liu 等研究指出,0、2、4、6℃冷藏期间所有桃果实的 EI 都平稳增加,表明细胞膜的完整性逐渐丧失,但 0、2℃冷藏的桃果实显著低于 4、6℃。同时 4、6℃冷藏也使 MDA 含量更高,表明适宜低温冷藏可以延迟 MDA 水平的升高,利于保护果实细胞膜结构的完整性和保持抗冷性^[13]。外源 NO 处理能够提高细胞膜流动性,降低膜脂相变温度和细胞膜的通透性,最大限度地维持细胞膜的正常结构和功能,从而提高其抗冷性^[40]。不同热处理方式和温度对细胞膜代谢也有不同的影响。与对照相比,HA 和 HW 处理均显著抑制了桃果实冷藏 14 d 后的 MDA 含量^[19],可能是热处理减轻了膜脂过氧化,保持了细胞膜更好的完整性。

不同外源物质处理对桃果实细胞膜代谢的调节机制各异,但主要与细胞膜结构完整性和细胞膜透性相关。NO 处理降低了桃果实 0 °C 冷藏期间细胞膜的通透性和膜脂过氧化程度,减轻了冷胁迫对细胞膜的伤害^[37]。对冷藏桃果实的研究发现,1-MCP 处理组 EI 和 MDA 含量水平最低,这与 1-MCP 处理组桃果实耐冷性更高^[41]一致。连续的乙烯处理降低了冷藏期间桃果实细胞膜渗透率和 MDA 含量,进一步研究发现,连续的乙烯处理可以通过调节酚类和脂类代谢,特别是磷脂和鞘磷脂的全面重构来减轻果实冷害,增加细胞膜结构的稳定性^[42]。

综上,现有研究表明,采后桃果实细胞膜的完整性、细胞膜的渗透率、MDA 含量、膜脂代谢等都可以作为衡量细胞膜抵抗冷害,感受冷胁迫的重要信号物质,是桃果实耐冷性强弱的重要标志,而 HW、HA、NO、1-MCP 等外源物质可以通过调节细胞膜的代谢来增强桃果实的耐冷性,减轻果实冷害的发生。

2.4 桃果实耐冷性与能量代谢的关系

能量代谢是采后果实生命活动的重要特征,能量代谢状态与采后果实成熟、衰老、腐烂、褐变、损伤修复、冷藏品质、耐冷性等相关。果实冷害的发生与能量状态有关,不同温度对能量代谢的影响各异^[43-44]。陈京京等研究指出,与 5 °C 相比,贮藏于 0 °C 下的桃果实三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)含量和能荷值更高,细胞能量亏缺少,果实的耐冷性最高,冷害程度最轻,表明桃果实冷害发生可能与能量供应不足有关,能量亏损越多,耐冷性越弱,冷害越严重^[43]。

ATP 是生物细胞的直接能量物质,线粒体是产生 ATP 的主要场所,ATP 从一定程度上反映了果实的能量水平。低温预贮可以有效抑制桃果实线粒体 $H^+ - ATPase$ 、 $Ca^{2+} - ATPase$ 酶活性的下降,使线粒体琥珀酸脱氢酶(SDH)和细胞色素氧化酶(CCO)活性保持较高的水平,维持较高能量水平,减轻果实冷害^[44]。

适当的外界刺激可以对冷藏桃果实的能量代谢发挥调节作用进而影响果实的耐冷性^[45-48]。Jin 等对桃果实用外源 OA 处理后于 0 °C 贮藏发现,OA 处理桃果实中 ATP、能荷量及能量代谢关键酶 $H^+ - ATPase$ 、 $Ca^{2+} - ATPase$ 、SDH、CCO 的活性显著提高,表明外源 OA 对桃果实冷害的减轻作用可能

是由于提高了与能量代谢相关酶的活性有关^[45]。冷锻炼处理可以通过调节桃果实 $H^+ - ATPase$ 、 $Ca^{2+} - ATPase$ 、SDH、CCO 酶活性,维持较高的能量水平,增强耐冷性,减轻冷害^[46]。0 °C 贮藏和 $CaCl_2$ 处理增加了桃果实 ATP、ADP、能荷量,增加了 $Ca^{2+} - ATPase$ 及其他能量代谢相关酶的活性,促进了 PpCaM 的表达,增加了 PpCaM 蛋白含量,说明 PpCaM 通过参与能量代谢和 γ -氨基丁酸(GABA)代谢的调控,增强耐冷性,减轻冷害^[47]。NO 通过维持桃果实冷藏期间的能量代谢,达到延缓细胞膜脂过氧化进程,增强果实的耐冷性^[48]。减压结合 1-MCP 处理能够维持中华寿桃较高的 ATP 和 ADP 量,显著降低一磷酸腺苷(AMP)含量水平,延缓了 SDH 和 CCO 活性的下降,从而保证了能量生成速率,为桃果实冷藏过程提供能量支持,增强了果实耐冷性^[49]。

综上所述,桃果实冷藏过程的能量状况与耐冷性密切相关,外源物质(外界刺激)主要通过调控能量代谢过程中的关键酶 $H^+ - ATPase$ 、 $Ca^{2+} - ATPase$ 、SDH、CCO 的活性及相关蛋白的表达量,调节 ATP、ADP、能荷值的量,为桃果实冷藏过程提供能量支持,增强果实耐冷性,减轻冷害的发生。

2.5 桃果实耐冷性与糖代谢的关系

糖代谢是果实采后主要的物质代谢之一,可溶性糖的代谢会影响采后桃果实的品质和耐冷性能^[50]。外源激素(物质)处理可以调节采后桃果实可溶性糖的代谢,进而调控果实的耐冷性。HA 和茉莉酸甲酯(MeJA)通过增加桃果实蔗糖的含量,提高蔗糖磷酸化酶(SPS)的活性和基因表达量,降低酸性转化酶(AI)的活性和基因表达量,从而增强果实耐冷性,缓解冷害胁迫^[50]。桃果实蔗糖的代谢也受 SA 的影响,SA 通过大量增加蔗糖含量来提高总可溶性糖的量,同时发现蔗糖生物合成和降解相关基因转录水平的变化与蔗糖含量的变化一致,SA 处理还增加了冷胁迫蛋白转录因子的表达,表明 SA 通过提高蔗糖含量和激活冷胁迫蛋白基因表达水平等多种机制协同作用缓解桃冷害^[51]。进一步研究发现,SA 和茉莉酸(JA)联合处理也是通过调节蔗糖生物合成和降解相关基因的转录量,增加蔗糖含量,发挥协同增效作用,提高桃果实的耐冷性^[52]。单独的 JA 处理桃果实则是通过调节乙烯和可溶性糖的代谢,增强耐冷性^[53]。外源物质处理对桃果实可溶性糖含量的影响机制不同。GB 处理促进桃果

实蔗糖含量的积累,而果糖和葡萄糖含量较低,总酚和黄酮量保持在较高水平,GB通过调节酚和糖的代谢,维持单个酚和蔗糖处于较高水平,提高果实耐冷性^[27]。

糖代谢对桃果实耐冷性的影响还与成熟度有关,未成熟桃果实蔗糖含量越低,对低温的敏感性越高^[54]。水蜜桃果实的抗冷性与不同成熟度果实中可溶性糖的含量相关,在一定成熟度范围内,成熟度越低可溶性糖含量越少,耐冷性也越弱^[12]。

综上所述,现有研究表明糖代谢对桃果实耐冷性的影响主要与蔗糖含量和果实成熟度相关,外源SA、JA、GB、MeJA、HA可以通过单独作用或共同作用,调节桃果实冷藏过程中蔗糖生物合成和降解相关基因的表达量、蔗糖代谢相关酶的活性及桃果实抗冷胁迫相关蛋白的表达量来增强果实耐冷性,而蔗糖对桃果实的耐冷性起到关键调控作用。

3 小结与展望

低温冷藏是果蔬采后贮藏保鲜的主要措施之一,桃果实作为典型呼吸跃变型冷敏型果实,成熟期正值高温,不耐贮藏,采后易受到冷害,出现果肉褐变、絮败、革质化、失去固有芳香和风味、成熟软化异常等症状,使采后贮藏品质下降,造成商品价值损失。综合国内外研究报道,桃果实遭受冷害胁迫后会诱发自身的耐冷性机制发挥作用,增强抗冷性,减轻果实冷害。现有研究表明,桃果实的耐冷性主要与果实抗氧化系统^[19-22]、细胞壁代谢^[31-34]、细胞膜代谢^[37,39-40]、能量代谢^[16,43-44]、糖代谢^[50-51,53-54]等相关,研究人员已采用外源激素如JA^[52-53]、SA^[51-52]、MeJA^[50]、MT^[20]等,化学物质如GB^[27]、24-EPI^[28]、NO^[18,41]、1-MCP^[41]等,物理方法如低温^[43-44,46]、HA^[50]、HW^[6,19]等处理采后桃果实,探究对果实耐冷性的调控机制。不同类型桃果实,亦或同一类型桃果实的不同品种、不同成熟度的果实,采后冷藏期间品质劣变症状、生理生化特点差异较大,尤其是对低温的敏感性、发生冷害的时间节点,品质劣变综合表征、对外界调控的响应机制各异。

综合本文所述,建议研究人员从以下几方面加强对桃果实耐冷性机理的研究:(1)不同成熟度、不同肉质类型的桃果实对低温的敏感性、耐冷性机理及综合冷害症状的研究;(2)用2种或多种方法联合处理对采后桃果实的耐冷性影响机理;(3)外源

激素和果实内源激素物质互作调节桃果实耐冷性的机制;(4)针对同一品种的桃果实,采用酶学、蛋白质组学、基因组学、分子生物学等现代生物技术手段,研究调控桃果实耐冷性的关键基因和蛋白质分子,系统阐明桃果实耐冷性机制的生物学途径;(5)植物天然提取物质处理对桃果实耐冷性的影响机制;(6)桃果实冷链物流配套技术研发。相信随着对上述问题研究的不断深入,开发出安全、高效、节能、便捷的桃果实采后保鲜技术,对减少桃果实采后品质劣变、提升产业链价值、推动桃产业高质量发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王力荣. 我国桃产业现状与发展建议[J]. 中国果树, 2021(10): 1-5.
- [2] 周慧娟, 苏明申, 叶正文, 等. 桃果实采后生理生化及冷害研究进展[J]. 果树学报, 2017, 34(9): 1204-1212.
- [3] 陈克明, 陈伟, 杨震峰. 桃果实采后可溶性糖和果胶类物质的变化与低温冷害的关系[J]. 核农学报, 2013, 27(5): 647-652.
- [4] 凌晨, 谢兵, 洪羽婕, 等. 外源钙和钙调素拮抗剂对冷藏桃果实耐冷性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 240-248.
- [5] Lurie S, Crisosto C H. Chilling injury in peach and nectarine[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(3): 195-208.
- [6] Wang L, Wang Y, Hou Y Y, et al. Physiological and metabolomic analyses of hot water treatment on amino acids and phenolic metabolisms in peach cold tolerance[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 179: 111593.
- [7] 邵兴锋, 屠康, 曹燕, 等. 桃果实絮败机理及减缓措施[J]. 果树学报, 2005, 22(2): 149-153.
- [8] 茅林春, 张上隆. 果胶酶与桃果实冷害的关系[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(3): 266-271.
- [9] Ben-Arie R, Lavee S. Pectic changes occurring in elberta peaches suffering from woolly breakdown[J]. Phytochemistry, 1971, 10(3): 531-538.
- [10] 茅林春, 应铁进, 张上隆. 桃果实絮败与果胶质变化和细胞壁结构的关系[J]. 植物生理学报, 1999, 25(2): 121-126.
- [11] Zhou H W, Ben-Arie R, Lurie S. Pectin esterase, polygalacturonase and gel formation in peach pectin fractions[J]. Phytochemistry, 2000, 55(3): 191-195.
- [12] 邵海燕, 陈杭君, 陈文炬, 等. 采收成熟度对冷藏水蜜桃果实品质和冷害的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 612-618.
- [13] Liu H, Jiang W B, Cao J K, et al. Effect of chilling temperatures on physiological properties, phenolic metabolism and antioxidant level accompanying pulp browning of peach during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 255: 175-182.
- [14] 金微微, 徐昌杰, 李鲜, 等. 采后玉露桃果实冷害发生与ROP基因的表达调控[J]. 果树学报, 2009, 26(5): 608-613.
- [15] 第二届植物学名词审定委员会. 植物学名词[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2019: 256.

- [16]白欢,李岳桦,魏征,等. 桃果实冷害与能量代谢关系研究进展[J]. 湖南农业科学,2010(23):144-146,150.
- [17]邓红军,杨明飞,刘伟,等. 短波紫外线法处理对鲜切果蔬抗氧化系统影响的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(14):5713-5719.
- [18]Song C C,Zhao Y Y,Li A, et al. Postharvest nitric oxide treatment induced the alternative oxidase pathway to enhance antioxidant capacity and chilling tolerance in peach fruit[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2021,167:113-122.
- [19]Huan C,Han S,Jiang L, et al. Postharvest hot air and hot water treatments affect the antioxidant system in peach fruit during refrigerated storage[J]. Postharvest Biology and Technology,2017,126:1-14.
- [20]Gao H,Lu Z M,Yang Y, et al. Melatonin treatment reduces chilling injury in peach fruit through its regulation of membrane fatty acid contents and phenolic metabolism[J]. Food Chemistry,2018,245:659-666.
- [21]Tareen M J,Abbasi N A,Hafiz I A. Postharvest application of salicylic acid enhanced antioxidant enzyme activity and maintained quality of peach cv. 'Flordaking' fruit during storage[J]. Scientia Horticulturae,2012,142:221-228.
- [22]郑小林,田世平,李博强,等. 草酸对冷藏期间桃果实抗氧化系统和PPO活性的影响[J]. 园艺学报,2005,32(5):788-792.
- [23]Liu H,Jiang W B,Cao J K, et al. A combination of 1-methylcyclopropene treatment and intermittent warming alleviates chilling injury and affects phenolics and antioxidant activity of peach fruit during storage[J]. Scientia Horticulturae,2018,229:175-181.
- [24]Giri J. Glycinebetaine and abiotic stress tolerance in plants[J]. Plant Signaling & Behavior,2011,6(11):1746-1751.
- [25]Chen L L,Shan W,Cai D L, et al. Postharvest application of glycine betaine ameliorates chilling injury in cold-stored banana fruit by enhancing antioxidant system[J]. Scientia Horticulturae,2021,287:110264.
- [26]Zhang Y,Jin P,Huang Y P, et al. Effect of hot water combined with glycine betaine alleviates chilling injury in cold-stored loquat fruit[J]. Postharvest Biology and Technology,2016,118:141-147.
- [27]Wang L,Shan T M,Xie B, et al. Glycine betaine reduces chilling injury in peach fruit by enhancing phenolic and sugar metabolisms[J]. Food Chemistry,2019,272:530-538.
- [28]Gao H,Zhang Z K,Lü X G, et al. Effect of 24-epibrassinolide on chilling injury of peach fruit in relation to phenolic and proline metabolisms[J]. Postharvest Biology and Technology,2016,111:390-397.
- [29]茅林春,张上隆. 果胶酶和纤维素酶在桃果实成熟和絮败中的作用[J]. 园艺学报,2001,28(2):107-111.
- [30]Zhu Y C,Wang K,Wu C X, et al. Effect of ethylene on cell wall and lipid metabolism during alleviation of postharvest chilling injury in peach[J]. Cells,2019,8(12):1612.
- [31]Brummell D A,dal Cin V,Lurie S, et al. Cell wall metabolism during the development of chilling injury in cold-stored peach fruit; association of mealiness with arrested disassembly of cell wall pectins[J]. Journal of Experimental Botany,2004,55(405):2041-2052.
- [32]Pegoraro C,Chaves F C,Manica-Berto R, et al. Transcript accumulation of cell wall metabolism and endomembrane transport genes in woolly and non-woolly peach[J]. Scientia Horticulturae,2010,126(3):366-370.
- [33]Manganaris G A,Vasilakakis M,Diamantidis G, et al. Cell wall physicochemical aspects of peach fruit related to internal breakdown symptoms[J]. Postharvest Biology and Technology,2006,39(1):69-74.
- [34]茅林春,张上隆. 间歇低温胁迫对桃果实细胞壁代谢的影响[J]. 植物生理学报,2001,27(2):151-155.
- [35]金鹏,王静,朱虹,等. 果蔬采后冷害控制技术及机制研究进展[J]. 南京农业大学学报,2012,35(5):167-174.
- [36]王秀云. 热处理提高桃果实耐冷性的机理研究及相关磷脂酶D基因的电子克隆[D]. 泰安:山东农业大学,2010.
- [37]吕小华,陈长宝,尚鹏鹏,等. 一氧化氮和冷胁迫对桃果实细胞膜脂过氧化的影响[J]. 保鲜与加工,2019,19(2):8-15.
- [38]Lyons J M. Phase transitions and control of cellular metabolism at low temperatures[J]. Cryobiology,1972,9(5):341-350.
- [39]Wolfe J. Chilling injury in plants - the role of membrane lipid fluidity[J]. Plant,Cell and Environment,1978,1(4):241-247.
- [40]高彬. 一氧化氮和冷信号对桃果实细胞膜脂肪酸代谢及膜脂相变温度的调控作用[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
- [41]Qian C L, Ji Z J, Zhu Q, et al. Effects of 1-MCP on proline, polyamine, and nitric oxide metabolism in postharvest peach fruit under chilling stress[J]. Horticultural Plant Journal,2021,7(3):188-196.
- [42]Chen S Q, Chen M S, Li Y L, et al. Adjustments of both phospholipids and sphingolipids contribute to cold tolerance in stony hard peach fruit by continuous ethylene[J]. Postharvest Biology and Technology,2021,171:111332.
- [43]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.
- [44]赵颖颖,陈京京,金鹏,等. 低温预贮对冷藏桃果实冷害及能量水平的影响[J]. 食品科学,2012,33(4):276-281.
- [45]Jin P,Zhu H,Wang L, 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.
- [46]祝美云,白欢,梁丽松,等. 冷锻炼处理减轻低温贮藏桃果实冷害的能量代谢机理[J]. 农业工程学报,2012,28(23):257-264.
- [47]Xie B,Ling C,Hu S Q, et al. CaM enhances chilling tolerance of peach fruit by regulating energy and GABA metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology,2021,181:111691.
- [48]张小康,上官相超,陈长宝,等. 一氧化氮对冷藏桃果实能量代谢的调控作用[J]. 保鲜与加工,2019,19(4):1-9.
- [49]曹继璇,张颖,娄湘琴,等. 减压结合1-甲基环丙烯处理通过调控中华寿桃能量代谢控制其采后冷害[J]. 食品与发酵工业,2020,46(12):213-219.
- [50]Yu L N,Liu H X,Shao X F, et al. Effects of hot air and methyl

陈 岳,寇卫利,李 莹,等. 农作物遥感灾损评估研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):12-20.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.16.003

农作物遥感灾损评估研究进展

陈 岳¹,寇卫利²,李 莹³,尹 雄²,张雨果⁴,费建国¹,岳彩荣⁴

(1. 西南林业大学机械与交通学院,云南昆明 650224; 2. 西南林业大学大数据与智能工程学院,云南昆明 650224;

3. 中国航天科工信息技术研究院,北京 100000; 4. 西南林业大学林学院,云南昆明 650224)

摘要:农作物灾损评估在一定程度上能够降低农户从事农事活动的风险,而遥感技术是实现大范围对地精准观测的重要技术,可及时、准确地评估农作物的灾损发生情况,因此遥感技术在农作物灾损评估领域的应用成为遥感应用领域内的研究热点。在农作物灾损评估数据来源介绍的基础上,概述农作物灾损评估中农作物受灾面积的估算方法,介绍基于光谱特征、物候特征和遥感影像纹理特征的农作物受灾面积估算模型,对农作物长势监测、农作物受损产量估算、农作物灾害风险评估的国内外研究进展进行评述。并对农作物灾损评估研究及其应用技术作出进一步展望,结合当前农作物遥感灾损评估中存在的问题和发展趋势,提出农作物遥感灾损评估未来重点发展的 3 个方向,即构建多源多尺度长时间序列农作物灾损评估遥感数据集、发展多因子协同的农作物灾损评估遥感综合模型、研究智能化农作物灾损评估遥感算法和技术。

关键词:遥感;农作物;灾损评估;面积估算;长势监测;研究进展

中图分类号: X43;TP79;S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)16-0012-09

农业是提供支撑国民经济建设和发展的基础产业,农作物的生产与气候变化和生物侵染紧密相关。但由于全球极端天气和生物侵害频发,气象灾害(涝灾、旱灾、风灾、冻灾)和病虫害(虫害、病害、草害)严重威胁了作物的生长,致使作物减产、农户经济收入下降。对受灾的农作物进行灾损评估,不

仅有利于准确开展救灾工作,减少损失,还有利于对农作物的灾害进行预防。遥感技术具有数据量大、覆盖面广、获取迅速等优势,能够及时预测气象信息、监测农作物长势、判读自然灾害发生等,是开展农作物灾损评估的可靠手段。本文基于遥感技术从农作物灾损评估数据源、农作物受灾面积及其受损产量估算、农作物长势监测、农作物灾害风险评估等对农作物灾损评估进行梳理、总结,以期有效利用遥感技术评估农作物灾损提供参考。

收稿日期:2021-09-12

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0600903-4);国家自然科学基金(编号:31760181、31400493);云南省农业基础研究联合专项面上项目(编号:2018FG001-059、2018FG001-055、2017FG001-034);云南省生物资源数字化开发应用项目(编号:202002AA10007)。

作者简介:陈 岳(1996—),男,云南昆明人,硕士研究生,主要从事遥感与信息技术研究。E-mail:chenyue960504@163.com。

通信作者:寇卫利,博士,教授,博士生导师,主要从事地理信息系统、遥感与信息技术研究。E-mail:kwl_eric@163.com。

1 农作物灾损评估数据源

1.1 基于航天遥感平台的农作物灾损评估数据源

在农作物灾损评估中,卫星是航天遥感平台的主要设备。美国的 Terra 和 Aqua 合成观测可得到中分辨率 MODIS 影像数据。合成观测的 2 颗卫星

jasmonate treatment on the metabolism of soluble sugars in peach fruit during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016,113:8-16.

[51] Zhao Y Y, Song C C, Brummell D A, et al. Salicylic acid treatment mitigates chilling injury in peach fruit by regulation of sucrose metabolism and soluble sugar content[J]. Food Chemistry, 2021, 358:129867.

[52] Zhao Y Y, Song C C, Qi S N, et al. Jasmonic acid and salicylic acid induce the accumulation of sucrose and increase resistance to

chilling injury in peach fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(10):4250-4255.

[53] Zhao Y Y, Song C C, Brummell D A, et al. Jasmonic acid treatment alleviates chilling injury in peach fruit by promoting sugar and ethylene metabolism[J]. Food Chemistry, 2021, 338:128005.

[54] Zhang P, Shao X F, Wei Y Y, et al. At-harvest fruit maturity affects sucrose metabolism during cold storage and is related to chilling injury in peach[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(6):2000-2009.