



李喜宏,杨梦娇,梁富浩,等. 非热加工技术调控果蔬产品内源酶活性研究进展[J]. 轻工学报,2023,38(4):11-19.
LI X H, YANG M J, LIANG F H, et al. Research progress on regulation of endogenous enzyme activities of fruit and vegetable products by non-thermal processing technology[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(4): 11-19.
DOI: 10. 12187/2023. 04. 002

非热加工技术调控果蔬产品内源酶活性研究进展

李喜宏,杨梦娇,梁富浩,林子沁,李娇,吕芳娥,苗泽,姜瑜倩

天津科技大学 食品科学与工程学院/天津科技大学省部共建食品营养与安全国家重点实验室,天津 300457

摘要:基于非热加工技术具有低温杀菌、能更好保持果蔬产品原有营养成分、色泽、新鲜度等优势,着重就5种常用非热加工技术对果蔬产品内源酶活性的调控效果和调控机制进行综述。认为,超高压、超声波、大气压冷等离子体、紫外线辐射和脉冲电场技术通过破坏内源酶的空间结构,可显著降低内源酶的活性。这些非热加工技术在调控果蔬产品内源酶活性时各具优势,不仅可提高果蔬产品的品质,同时也可作为果蔬产品加工、贮藏等提供有效的手段和方案。果蔬产品内源酶的失活动力学模型主要包括一阶模型、双相模型、Weibull模型、Hülsheger's和Fermi's经验模型等,通过研究这些模型可更深入地了解非热加工技术调控果蔬产品内源酶活性的机制,进而优化果蔬产品的加工方案以保障产品的品质和安全。然而,非热加工技术的研究仍处于实验阶段,其调控果蔬产品内源酶活性的机制尚不完全明确,在实际生产中还存在设备成本高昂、安全隐患较明显等问题。未来应进一步改进和优化非热加工技术的工艺参数,深入探究非热加工技术对果蔬产品内源酶活性的调控机制,协同应用多种非热加工技术,尽量减少对果蔬产品品质的影响,以期为非热加工技术应用于果蔬深加工及产品工业化生产提供参考。

关键词:非热加工技术;果蔬产品;内源酶;酶活调控机制

中图分类号:TS205 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2023)04-0011-09

0 引言

内源酶是动植物体内各种酶类的统称,其对相应底物具有高度特异性和催化效能。果蔬产品内源酶是指存在于水果和蔬菜中的酶类物质,其催化活性强,易受温度、湿度、氧气浓度等因素影响。因此,

在果蔬产品的加工和贮藏过程中需要控制这些因素以保证产品品质。目前,常见的果蔬产品内源酶包括多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、果胶甲酯酶(Pectin Methyl Esterase, PME)、聚半乳糖醛酸酶(Polygalacturonase, PG)、脂肪氧化酶(Lipoxygenase, LOX)等。其中,

收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-05-29;出版日期:2023-08-15

基金项目:山东省重点研发计划项目(2021CXGC010809)

作者简介:李喜宏(1960—),男,辽宁省东港市人,天津科技大学教授,博士,主要研究方向为农产品保鲜与加工。E-mail:lixihong@tust.edu.cn

通信作者:姜瑜倩(1987—),女,天津市人,天津科技大学教授,博士,主要研究方向为农产品保鲜与加工。E-mail:jiangyuqian@tust.edu.cn

PPO可促进果蔬中多酚类物质氧化形成黑色素,影响产品的感官品质^[1];POD与果蔬的呼吸作用、光合作用、生长素氧化等相关;PME可水解果汁中的果胶,使果汁发生分层现象^[2];PG可催化果胶分子多聚 α -(1,4)-聚半乳糖醛酸裂解,使细胞壁结构解体,进而导致果实软化^[3];LOX广泛分布于果蔬中,可催化不饱和脂肪酸的氧化分解,影响果蔬产品的口感和品质^[4]。在加工和贮藏过程中有效调控内源酶的活性,对保持果蔬产品的感官品质和营养价值至关重要。

目前,食品企业多采用传统的热处理技术(如焙烤、油炸、蒸馏等)加工果蔬产品^[5],虽可杀灭细菌等微生物、减缓酶的催化速度、改善果蔬产品的质地等,但也会产生营养物质流失、挥发性风味物质损失等问题。为了避免传统热处理技术对果蔬产品带来的不良影响,近年来非热加工技术成为新兴的研究热点。非热加工技术是通过非传统加热的方法进行杀菌与钝酶的技术,主要包括超高压(Ultra High Pressure Processing, UHP)、超声波(Ultrasound, US)、大气压冷等离子体(Atmospheric Cold Plasma, ACP)、紫外线辐射(Ultraviolet Radiation, UV)、脉冲电场(Pulsed Electric Field, PEF)等,具有杀菌温度低、污染小、能耗少等特点,主要应用于果蔬食品等加工行业。本文拟针对目前较热门的5种非热加工技术,综述其调控果蔬产品内源酶活性的研究进展,以期为非热加工技术在果蔬产品加工、保鲜等领域的应用提供参考。

1 超高压技术

超高压技术是把液体或气体加压到100 MPa以上的技术。超高压处理会引起果蔬产品中非共价键的形成或破坏,使酶的分子构象发生变化,进而导致酶失活^[6]。

1.1 超高压对果蔬产品内源酶活性的调控效果

超高压技术可通过降低PME活性使果汁变澄清,且可通过降低PPO活性减少果汁发生酶促褐变。Ó. Benito-Román等^[6]在300 MPa、20℃条件下处理橙汁30 s, PME活性降低了47%,且浊度降低。

果汁产品经超高压处理后可延长贮藏期,延缓风味劣变。此外,超高压处理的效果因果蔬本身而异,在400 MPa条件下处理芒果汁, PPO仅降低了6.74%^[7],而相同条件下处理苹果泥, PPO活性降低了35.46%^[8]。有研究^[9-10]发现,超高压处理能破坏细胞组织、释放膜结合酶和诱导蛋白质结构变化,从而激活潜在PPO的活性。如在300 MPa条件下处理柿子汁8 min,柿子汁的PPO活性显著增加至对照组的2.65倍;然而,在550 MPa条件下处理柿子汁5 min,柿子汁的PPO活性即恢复至对照组水平^[11]。超高压处理对PPO的作用是一个动态过程^[11-14],既可使部分PPO失活,也可激活部分潜在PPO的活性,使PPO的活性呈现两种形式的相互作用。

近年来,国内外学者开始拟合超高压处理下酶的失活动力学,寻找超高压调控酶活的最优条件。PPO和POD的失活是保持果蔬产品品质的必要条件,根据果蔬基质的不同,这两种酶通常表现出可变的稳定性或气压稳定性,因此需要动力学数据优化加工参数。经超高压处理后,多数内源酶的活性-压力变化曲线呈钟形。N. S. Terefe等^[15]研究发现,蓝莓POD的活性在所有加工温度下均偏离了一级失活动力学,故采用一级双相失活动力学模型进行描述。但“简单”的动力学模型并不足以描述酶的失活情况,故I. Bleoanca等^[16]采用三阶多项式方程描述桃泥PPO的失活,并通过一系列统计检验确定了该模型的有效性。因此,需要根据不同果蔬产品,不断研究合适的动力学模型,更好地拟合果蔬产品内源酶的失活情况,从而保证其在贮藏过程中的优良品质。

超高压技术可在较低温度下进行果蔬加工,不仅能最大限度地保留果蔬产品的营养成分、天然色素等,还能有效杀灭微生物和调控酶活性,延长果蔬产品的货架期。相较于传统热处理和化学处理方法,超高压技术不需要额外添加任何化学物质或防腐剂,能确保产品的纯净性和天然性,满足消费者对健康和安全的诉求。但超高压设备的投资和运营成本相对较高,在小规模生产和加工中的应用可能会受到限制。

1.2 超高压对果蔬产品内源酶的调控机制

超高压对果蔬产品内源酶的调控机制主要是通过破坏蛋白质的次级键,使内源酶的构象发生变化甚至失去活性中心,进而影响内源酶的活性^[17]。150~200 MPa的高压会导致内源酶的四级结构被破坏,使低聚酶解离成单个亚基;在更高压力下,静电和疏水相互作用会使酶的三级结构被破坏。此外,温度和压力可影响蛋白质的氨基酸侧链官能团与水相互作用,以及分子内相互作用(如氢键的相反作用),进而影响内源酶的结构、稳定性和功能性。需要注意的是,超高压处理对内源酶的调控机制仍需要深入研究,且可能因果蔬产品的类型、处理压力、处理时间等因素而有所差异。因此,在使用超高压技术处理果蔬产品时,需要综合考虑上述因素,寻找最佳处理条件来调控内源酶的活性以保证果蔬产品的品质。

2 超声波技术

超声波是一种频率高、波长短且穿透力强的特殊声波。在低频、适当的环境下,超声波能产生空穴、磁致伸缩等作用,不但能改变内源酶的结构,而且能促进内源酶与底物的结合。

2.1 超声波对果蔬产品内源酶活性的调控效果

近年来,应用超声波灭活 PPO、POD 已成为较活跃的研究领域。以低频超声波处理果蔬产品时,对内源酶活性的调控效果有限。在 20 kHz 条件下处理木瓜汁和草莓饮料,二者 PPO 的活性分别降低了 35.00% 和 44.90%^[18-19];在 22 kHz 条件下处理桑葚果汁 10 min, PPO 活性降低了 45.04%^[20],这表明随着超声波频率上升,内源酶活性下降明显。此外,内源酶活性调控效果与超声波处理时的温度有关,20 kHz、冰浴条件下处理芒果 15 min, PPO 活性仅降低了 14.03%^[21],即较低的超声温度可抑制内源酶的活性。相比之下,以高频超声波处理果蔬产品时,对内源酶活性的调控效果更明显。如 378 kHz 条件下处理辣根和双孢蘑菇, POD 和 PPO 均显著失活^[22-23]。综上所述,超声波对内源酶的调控效果主要取决于超声波频率、处理温度、处理时

间、介质等。研究^[24]发现,适当的超声波处理可激活果蔬产品中的内源酶,提高其活性。这可能是因为超声波的机械作用可破坏内源酶分子的空间结构,使其更易与底物结合,同时降低了反应活化能。但超声波频率过高或处理时间过长则会抑制内源酶的活性。因此,在使用超声波处理果蔬产品时,需选择合理的超声波处理条件以降低内源酶的活性。

超声波对内源酶动力学的影响与内源酶的特异性有关。如采用高频超声波处理辣根和杨梅汁,其 POD 的失活动力学与一级模型拟合良好^[25],而 K. Tsikrika 等^[23]研究发现,一阶模型和双相模型的测试结果与数据拟合不佳, Weibull 模型的测试结果与数据拟合良好。A. E. Illera 等^[20]在利用热超声波灭活混浊苹果汁中的内源酶时,也使用 Weibull 模型拟合 PPO 失活动力学数据。这可能是不同内源酶的结构差异所致。因此,选择合适的动力学模型可更准确地描述超声波对内源酶的调控,并确定最佳的灭酶条件。需要注意的是,超声波处理条件及选择的模型均应根据不同内源酶的特性和应用环境进行优化,以获得更准确的结果。

超声波技术在果蔬产品加工中优势明显,加工时无需使用高温,避免了热处理对产品营养成分和质地的破坏,保留了果蔬本身的营养价值和口感。超声波可均匀地传播和穿透果蔬产品的各个部位,从而实现更均一的加工效果。此外,超声波处理速度快,可提高生产效率。但超声波处理效果受超声频率、超声功率、处理时间等参数的影响,需针对果蔬品种和加工目的进行实验研究和参数优化。

2.2 超声波对果蔬产品内源酶活性的调控机制

超声波对果蔬产品内源酶活性的调控机制主要包括 3 种效应。一是空化效应。在超声波作用下,液体会形成空化气泡,增大水气间的界面面积,破坏内源酶分子的周围环境(如氢键和疏水作用),导致内源酶分子的空间构象改变。二是化学效应。超声波处理过程中,空化气泡破裂瞬间会产生局部的高温高压,致使水分子裂解,形成的氢氧根离子和氢离子与内源酶中的氨基酸残基发生反应,从而影响内源酶的稳定性和活性。三是机械效应。稳定的空化

气泡通过液体介质时会产生微射流和剪切力,破坏维持内源酶蛋白质空间构象的氢键、离子键等次级键,导致内源酶分子二级和三级结构改变,从而使其丧失生物活性。综上可知,超声波对果蔬产品内源酶活性的调控机制较复杂,且与超声波的参数(如超声频率、超声功率和处理时间)、果蔬品种等因素有关。

3 大气压冷等离子体技术

等离子体被认为是物质的第4种状态,与固体、液体和气体均不相同^[27]。当施加电压达到击穿电压时,气体会被电离产生电子和离子,并形成等离子体。冷等离子体因中性离子温度低于电子温度而得名。大气压冷等离子体技术具有处理时间短、破坏性小、无残留等优点,已广泛应用于果蔬产品的杀菌保鲜^[28]。

3.1 大气压冷等离子体对果蔬产品内源酶活性的调控效果

由于大气压冷等离子体的处理温度在室温到数十摄氏度之间,与环境温度非常接近,因此该技术适用于鲜切水果、蔬菜等温度敏感产品的加工。大气压冷等离子体调控内源酶的活性与气体类型、功率、处理时间有关。以鲜切苹果为例,经150 W、22 ℃大气压冷等离子体处理30 min和60 min,鲜切苹果的PPO活性分别降低了50%和90%^[29],表明随着处理时间的延长,PPO活性显著降低。在空气、N₂、O₂、Ar和He混合气体环境中,经900 W大气压冷等离子体处理鲜切马铃薯40 min,鲜切马铃薯的PPO失活率为49.5%^[30];在空气中,经900 W大气压冷等离子体处理鲜切马铃薯10 min,鲜切马铃薯的PPO活性降低了77%^[31],表明在空气环境中更能有效抑制PPO的活性。此外,使用45 V的介质阻挡放电等离子体处理小麦芽汁,其POD和PPO活性均显著降低,且其表观黏度和稠度指数均明显降低,流动性增强,稳定性更高^[32]。在适宜的功率下,即使在短时间内,大气压冷等离子体也具有较好的内源酶活性调控效果,如经65 kV大气压冷等离子体处理鲜切梨1 min,其POD和PME的活性均迅速降低^[33];经90 kV大气压冷等离子体处理橙汁120 s,其PME活性降低了82%^[34]。由此可见,大气

压冷等离子体处理能有效抑制PPO、POD、PME的活性,且总体调控效果明显。

研究大气压冷等离子体处理下内源酶的失活动力学,可揭示内源酶在该处理过程中的反应机制和失活过程,为优化和控制等离子体处理条件提供指导。S. Pipliya等^[35]采用不同模型描述内源酶的失活情况,发现与对数线性模型相比,Weibull和logistic动力学模型能更精确地描述PPO和POD的酶失活动力学过程。但Weibull与logistic模型之间仍存在竞争性,且logistic模型的误差更小。

大气压冷等离子体技术能有效降低果蔬产品温度,减少对热敏成分的破坏,从而保持产品的口感和营养价值;能有效杀灭果蔬产品表面的细菌、真菌和其他微生物,降低食品腐败速度,延长产品的保鲜期。但在使用大气压冷等离子体技术时,需使用电极进行放电,而放电过程中会产生电极磨损和氧化问题,故需定期更换电极以确保设备稳定运行,因此该技术的投资和运营成本较高。

3.2 大气压冷等离子体对果蔬产品内源酶活性的调控机制

大气压冷等离子体可能通过以下3种方式破坏内源酶的空间结构。一是活性物质的产生。等离子体可产生一系列自由基和其他反应性物质(如臭氧、过氧化氢等)^[30]。这些活性物质可能会与内源酶中的氨基酸残基相互作用,通过氧化或还原反应导致内源酶结构和功能发生变化。二是离子化和电子转移。等离子体中的电子会通过离子化和电子转移作用与内源酶中的分子相互作用,导致一些重要化学键的断裂或形成,从而使内源酶空间结构和功能发生变化。三是离子束撞击。等离子体可产生带电粒子束(如离子束),这些带电粒子束可能会撞击内源酶分子,使其分子中的原子和化学键发生断裂,从而导致其结构发生变化^[36]。目前,业界广泛认可大气压冷等离子体对果蔬产品内源酶的调控机制是:等离子体产生的活性物质使得侧链氨基酸发生氧化和化学修饰,这会导致 α -螺旋和 β 结构的损失,从而使内源酶失活。

4 紫外线辐射技术

紫外线辐射是一种介于可见光与X射线之间

的电磁波^[37]。在紫外线辐射作用下,细胞核酸的生物活性会受到影响,导致细菌等微生物中蛋白质和酶的合成受阻,造成微生物结构突变,进而导致微生物死亡。近年来,将紫外线辐射技术应用于调控果蔬产品中 PPO 的活性已成为研究热点。

4.1 紫外线辐射对果蔬产品内源酶活性的调控效果

紫外线辐射能有效调控果蔬产品内源酶的活性,适用于鲜切果蔬产品、果蔬饮料等。针对不同类型的果蔬产品,紫外线辐射的参数也有所不同。在处理鲜切果蔬产品时,如经 2 kJ/m^2 紫外线辐射处理鲜切胡萝卜^[38]或经 2.6 kJ/m^2 、 $6 \text{ }^\circ\text{C}$ 紫外线辐射处理鲜切竹笋^[39],均可使其 PPO 显著失活。在处理果蔬饮料时,调控效果不如鲜切果蔬产品,如经 400 mJ/cm^2 紫外线辐射处理椰子水,其 PPO 和 POD 活性分别下降了 6% 和 7%^[40];经 254 nm 紫外线辐射处理小麦草汁,其 PPO 活性降低了 20%^[41]。在整果处理中,如经 254 nm 、 60 W 及不同能量密度 (1 kJ/m^2 、 3 kJ/m^2 和 6 kJ/m^2) 紫外线辐射处理鲜枣,均可显著降低其 PPO 和 POD 的活性^[42]。以上研究结果表明,紫外线辐射可降低果蔬产品内源酶的活性,而具体效果受紫外线波长、能量密度、功率等因素的影响。

研究紫外线辐射处理下内源酶的失活动力学模型,对于降低内源酶活性、提高紫外线辐射技术应用效率及促进酶工业的发展具有重要意义。X. Y. Hong 等^[43]在研究椰子汁溶液的 PPO 和 POD 时,评估了简单一级动力学模型、两部分一级动力学模型和两阶段一级动力学模型,发现两部分一级动力学模型最适合描述 PPO 和 POD 活性变化情况。虽有模型可贴合描述内源酶的失活特性,但无法完全反映所有内源酶的失活特性。研究者需进一步探索和优化实验参数,将紫外线辐射技术更好地应用于果蔬产品的加工领域。

紫外线辐射技术通过合理的辐射参数,可抑制果蔬产品内源酶的活性,从而控制果蔬产品的理化变化,延缓其腐败和衰老过程。此外,紫外线辐射还可提高果蔬产品的抗氧化活性。然而,紫外线辐射对操作人员具有一定的安全风险,长期接触紫外线

可能损伤皮肤和眼睛,因此必须采取适当的安全措施。

4.2 紫外线辐射对果蔬产品内源酶活性的调控机制

紫外线辐射对果蔬产品内源酶的调控机制主要分为直接作用和间接作用。其中,直接作用表现为紫外线辐射能够引起内源酶分子中化学键的断裂、氧化、重排等反应,改变内源酶分子结构和构象^[44];此外,紫外线辐射还可使内源酶中氨基酸残基发生氧化和羧化反应,导致内源酶失活。间接作用表现为紫外线辐射能够激发果蔬产品中的分子产生自由基^[45],这些自由基可与内源酶分子发生反应,使内源酶活性发生改变。紫外线辐射对果蔬产品内源酶的调控机制受紫外线波长、能量密度、果蔬产品成分等因素的影响。因此在果蔬产品加工和贮藏过程中,需根据实际情况选择合适的紫外辐射处理条件。

5 脉冲电场技术

脉冲电场技术是一种利用电场的短暂脉冲作用于果蔬产品的加工技术^[46],它通过施加高压脉冲电场,使物质中的电荷分布和电场强度发生变化,进而导致离子迁移、电荷重新分布和分子极化。这些物理和化学效应可导致蛋白质变性和内源酶活性受到抑制,从而实现了对微生物和内源酶的灭活。

5.1 脉冲电场对果蔬产品内源酶活性的调控效果

脉冲电场常被应用于果蔬汁产品中,J. Saxena 等^[46]研究发现,经 $8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 97 V/cm 的脉冲电场处理甘蔗汁 32 min ,其 PPO 活性降低了 90.5%。脉冲电场在高强度下处理果蔬汁时可迅速降低其内源酶活性。C. Mannozi 等^[47]研究发现,经 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 0.8 kV/cm 的脉冲电场处理苹果汁 $10 \text{ } \mu\text{s}$,其 PPO、POD 的灭活率均达 80%;R. Sánchez-Vega 等^[48]研究发现,经 26.35 kV/cm 的脉冲电场处理西兰花汁 $1235 \text{ } \mu\text{s}$,其 PPO 失活率可达 60%;经 0.9 kV/cm 或 2.7 kV/cm 的脉冲电场处理橙汁 $1000 \text{ } \mu\text{s}$,其 PME 活性显著降低^[49]。相比之下,将脉冲电场直接作用于果蔬时的调控效果欠佳。如经 1.25 kV/cm 的脉冲电场处理鲜杏 30 s ,其对 PPO 活性无影响,POD 活性只下降

了30%^[50]。因此,需根据具体果蔬产品的性质和实际需求选择脉冲电场的处理时间和强度。

有关脉冲电场对微生物失活的动力学研究较多,而对内源酶失活的动力学研究较少。田美玲^[51]研究发现,脉冲电场可使表征催化效率的催化常数和二级速率常数均增大,且内源酶的失活过程遵循一级动力学规律。而J. C. Yapi等^[52]研究发现,一阶模型、Hülshager's和Fermi's经验模型均可很好地描述茄子中PPO、POD的失活现象。通过研究内源酶在不同脉冲电场条件下的失活速率常数,建立不同的动力学模型,有助于了解内源酶分子结构与功能之间的关系,评估内源酶在脉冲电场中的稳定性,为调控果蔬产品中内源酶的活性提供指导。

脉冲电场技术是一种不添加化学物质的非热处理技术,不会在果蔬产品中留下任何化学残留物,能在短时间内调控果蔬产品的内源酶活性,符合消费者对安全和天然食品的需求。然而,脉冲电场技术具有设备和技术要求高、处理规模受限、内源酶失活不可逆等局限性。在实际应用中,需要根据果蔬产品特性和加工规模评估脉冲电场技术的适用性,并结合经济性和操作效果作出决策。

5.2 脉冲电场对果蔬产品内源酶活性的调控机制

脉冲电场主要是通过改变蛋白质结构、增加蛋白质分子振动、引起蛋白质分子内部电解等方式破坏内源酶的结构。一方面,脉冲电场会产生电压梯度,导致内源酶蛋白质分子结构发生变化^[49],如螺旋结构的拉伸和缩短,分子内部电荷分布发生改变,等等。另一方面,脉冲电场会使内源酶蛋白质分子内部运动增加,加速蛋白质分子的振动^[50],导致分子内部化学键的断裂和形变,从而破坏蛋白质结构;再者,脉冲电场可引起内源酶蛋白质分子内部的电解^[51],即电子从一个分子向另一个分子转移,而这种电解会导致蛋白质分子化学键断裂和结构破坏,影响内源酶的活性和稳定性。总之,脉冲电场会改变内源酶的高级结构,而对内源酶的一级结构影响较小。上述研究为深入理解脉冲电场对果蔬产品内源酶的调控机制提供了参考,但具体作用机制仍需深入研究。

6 结论与展望

本文基于非热加工技术的基本原理及优势,综述了5种较常用的非热加工技术调控果蔬产品内源酶活性的研究进展。超高压技术主要通过高压使果蔬细胞膜变形和内源酶分子变性来调控内源酶的活性,其加工时间短,符合环保和健康要求。大气压冷等离子体技术利用电场等手段在大气压下对果蔬进行冷等离子体处理,可显著调控果蔬产品内源酶的活性,但其调控机制尚未完全明确,对人体健康的影响仍需进一步研究和验证。与其他非热加工技术相比,超声波技术不会对食品产生热效应,能够高效杀灭微生物,但不适用于所有类型的果蔬产品,且内源酶活性调控效果相对较差。紫外线辐射技术可显著降低果蔬产品内源酶的活性,已被广泛应用于果蔬产品的内源酶活性调控和杀菌中,但应用过程中需注意操作条件,确保操作人员安全。脉冲电场技术对果蔬产品内源酶活性的调控效果较好、调控时间较短,且无任何化学残留,但在实际应用中需根据果蔬产品特性和加工规模评估其适用性。因此,在选择合适的非热加工技术时,需要具体考虑果蔬产品类型、加工需求、生产成本、生产效率等因素。

非热加工技术能有效调控果蔬产品内源酶的活性,但也会对果蔬产品的营养成分、质构、口感等产生一定影响。因此,在调控果蔬产品内源酶活性的同时,如何尽量减少对果蔬产品品质的影响,是未来研究的方向之一。另外,非热加工技术已在果蔬产品加工中得到广泛应用,但其调控果蔬产品内源酶活性的机制仍不完全清楚,未来应致力于该方面的研究,以推动非热加工技术的工业化应用。再者,当前的研究多集中在单一非热加工技术上,未来的发展趋势将是综合应用多种非热加工技术调控果蔬产品内源酶的活性,例如将超高压技术与脉冲电场技术相结合,达到协同增效的目的,以实现果蔬产品内源酶活性更精确地调控。

参考文献:

[1] 杨晓羽,唐先谱,郭艳利,等.高二氧化碳处理对青柠

- 檬保绿的效果[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 5-8.
- [2] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 23-38.
- [3] 王志华, 贾朝爽, 谭焕光, 等. 采收期结合 1-MCP 对苹果采后生理和贮藏品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 293-300.
- [4] 毛相朝, 李娇, 陈昭慧. 非热加工技术对食品内源酶的控制研究进展 [J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 1-13.
- [5] 闫凤娇. 国内外食品非热加工技术发展状况 [J]. 食品安全导刊, 2020(18): 178.
- [6] BENITO-ROMÁN Ó, SANZ T M, MELGOSA R, et al. Studies of polyphenol oxidase inactivation by means of high pressure carbon dioxide (HPCD) [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 147: 310-321.
- [7] DARS A G, HU K, LIU Q D, et al. Effect of thermo-sonication and ultra-high pressure on the quality and phenolic profile of mango juice [J]. Foods, 2019, 8(8): 298.
- [8] 冯若怡, 王晓钰, 杨云舒, 等. 超高压处理对复合苹果泥微生物和品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 37-44.
- [9] KAUSHIK N, RAO S P, MISHRA H N. Effect of high pressure and thermal processing on spoilage-causing enzymes in mango (*Mangifera indica*) [J]. Food Research International, 2017, 100: 885-893.
- [10] TRIBST A A L, JÚNIOR B R R C L, DE OLIVEIRA M M, et al. High pressure processing of cocoyam, Peruvian carrot and sweet potato; Effect on oxidative enzymes and impact in the tuber color [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 34: 302-309.
- [11] XU J Y, WANG Y L, ZHANG X Y, et al. A novel method of a high pressure processing pre-treatment on the juice yield and quality of persimmon [J]. Foods, 2021, 10(12): 3069.
- [12] HOUSKA M, SILVA F V M, EVELYN, et al. High pressure processing applications in plant foods [J]. Foods, 2022, 11(2): 223.
- [13] DE JESUS A L T, LEITE T S, CRISTIANIANINI M. High isostatic pressure and thermal processing of açai fruit (*Euterpe oleracea* Martius): Effect on pulp color and inactivation of peroxidase and polyphenol oxidase [J]. Food Research International, 2018, 105: 853-862.
- [14] KHALIQ A, CHUGHTAI M F J, MEHMOOD T, et al. High-pressure processing; principle, applications, impact, and future prospective [M]//Sustainable food processing and engineering challenges. Academic Press, 2021: 75-108.
- [15] TEREFE N S, DELON A, VERSTEEG C. Thermal and high pressure inactivation kinetics of blueberry peroxidase [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 820-826.
- [16] BLEOANCA I, NEAGU C, TURTOI M, et al. Mild-thermal and high pressure processing inactivation kinetics of polyphenol oxidase from peach puree [J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(7): e12871.
- [17] WANG P, QUANSAH J K, PITTS K B, et al. Hygiene status of fresh peach packing lines in georgia [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110627.
- [18] CHEN L L, BI X F, CAO X M, et al. Effects of high-power ultrasound on microflora, enzymes and some quality attributes of a strawberry drink [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(14): 5378-5385.
- [19] IQBAL A, MURTAZA A, MARSZALEK K, et al. Inactivation and structural changes of polyphenol oxidase in quince (*Cydonia oblonga* Miller) juice subjected to ultrasonic treatment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2065-2073.
- [20] ILLERA A E, SANZ M T, BENITO-ROMAN O, et al. Effect of thermosonication batch treatment on enzyme inactivation kinetics and other quality parameters of cloudy apple juice [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 47: 71-80.
- [21] 周亨乐, 赵剑雷, 冯小平, 等. 高场强超声波对芒果多酚氧化酶和过氧化物酶钝化效果的研究 [J]. 保鲜与加工, 2020, 20(2): 68-73.
- [22] TSIKRIKA K, CHU B S, BREMNER H D, et al. The effect of different frequencies of ultrasound on the activity of horseradish peroxidase [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 591-595.
- [23] TSIKRIKA K, LEMOS M A, CHU B S, et al. Effect of ultrasound on the activity of mushroom (*Agaricus bisporus*) polyphenol oxidase and observation of structural changes using time-resolved fluorescence [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(3): 656-668.
- [24] CAO X M, CAI C F, WANG Y L, et al. The inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in bayberry juice during thermal and ultrasound treatments [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45: 169-178.
- [25] SUO G W, ZHOU C L, SU W, et al. Effects of ultrasonic treatment on color, carotenoid content, enzyme activity, rheological properties, and microstructure of pumpkin juice during storage [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105974.
- [26] WANG D L, YAN L F, MA X B, et al. Ultrasound promotes enzymatic reactions by acting on different targets: Enzymes, substrates and enzymatic reaction systems [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 119: 453-461.
- [27] WAGHMARE R. Cold plasma technology for fruit based beverages: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 60-69.

- [28] 黄明明, 乔维维, 章建浩, 等. 低温等离子体冷杀菌对生鲜牛肉主要腐败菌及生物胺抑制效应研究[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 17-23.
- [29] TAPPI S, RAGNI L, TYLEWICZ U, et al. Browning response of fresh-cut apples of different cultivars to cold gas plasma treatment[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 53: 56-62.
- [30] KANG J H, ROH S H, MIN S C. Inactivation of potato polyphenol oxidase using microwave cold plasma treatment[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(5): 1122-1128.
- [31] BUßLER S, EHLBECK J, SCHLÜTER O K. Pre-drying treatment of plant related tissues using plasma processed air: Impact on enzyme activity and quality attributes of cut apple and potato[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017, 40: 78-86.
- [32] MANZOOR M F, HUSSAIN A, GOKSEN G, et al. Probing the impact of sustainable emerging sonication and DBD plasma technologies on the quality of wheat sprouts juice[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92: 106257.
- [33] ZHANG Y, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Effects of in-package atmospheric cold plasma treatment on the qualitative, metabolic and microbial stability of fresh-cut pears[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101: 4473-4480.
- [34] XU L, GARNER A L, TAO B, et al. Microbial inactivation and quality changes in orange juice treated by high voltage atmospheric cold plasma[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(10): 1778-1791.
- [35] PIPLIYA S, KUMARR S, SRIVASTAV P P. Inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in pineapple juice by dielectric barrier discharge plasma technology[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2022, 80: 103081.
- [36] GU Y X, SHI W Q, LIU R, et al. Cold plasma enzyme inactivation on dielectric properties and freshness quality in bananas[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021, 69: 102649.
- [37] 杨延音, 杨治国, 胡世国, 等. 水飞蓟素在皮肤科的功效及其在化妆品中的应用进展[J]. 日用化学工业, 2019, 49(4): 259-263.
- [38] LI L, LI C B, SUN J, et al. Synergistic effects of ultraviolet light irradiation and high-oxygen modified atmosphere packaging on physiological quality, microbial growth and lignification metabolism of fresh-cut carrots[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 173: 111365.
- [39] 周成敏, 叶秀萍, 王炳华, 等. UV-C 辐照处理对冷藏鲜切黄甜竹笋品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 178-184.
- [40] YANNAM S K, PATRAS A, PENDYALA B, et al. Effect of UV-C irradiation on the inactivation kinetics of oxidative enzymes, essential amino acids and sensory properties of coconut water[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(10): 3564-3572.
- [41] ALI N, POPOVI V, KOUTCHMA T, et al. Effect of thermal, high hydrostatic pressure, and ultraviolet-C processing on the microbial inactivation, vitamins, chlorophyll, antioxidants, enzyme activity, and color of wheatgrass juice[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(1): e13036.
- [42] DASSAMIOUR S, BOUJOURAF O, SRAOUI L, et al. Effect of postharvest UV-C radiation on nutritional quality, oxidation and enzymatic browning of stored mature date[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(10): 4947.
- [43] HONG X Y, LUO X Q, WANG L H, et al. New insights into the inhibition of hesperetin on polyphenol oxidase: Inhibitory kinetics, binding characteristics, conformational change and computational simulation[J]. *Foods*, 2023, 12(4): 905.
- [44] CACCIARI R D, REYNOSO A, SOSA S, et al. Effect of UVB solar irradiation on laccase enzyme: Evaluation of the photooxidation process and its impact over the enzymatic activity for pollutants bioremediation[J]. *Amino Acids*, 2020, 52(6/7): 925-939.
- [45] SAKIROGLU H, BIRDAL C, BASLAR M, et al. Inactivation kinetics of polyphenol oxidase in an aqueous model system under stand-alone and combined ultrasound and ultraviolet treatments[J]. *International Journal of Food Properties*, 2016, 19(7): 1535-1543.
- [46] SAXENA J, MAKROO H A, SRIVASTAVA B. Effect of ohmic heating on polyphenol oxidase (PPO) inactivation and color change in sugarcane juice[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(3): e12485.
- [47] MANNOZZI C, ROMPOONPOL K, FAUSTER T, et al. Influence of pulsed electric field and ohmic heating pre-treatments on enzyme and antioxidant activity of fruit and vegetable juices[J]. *Foods*, 2019, 8(7): 247.
- [48] SÁNCHEZ-VEGA R, RODRÍGUEZ-ROQUE M J, ELEZ-MARTÍNEZ P, et al. Impact of critical high-intensity pulsed electric field processing parameters on oxidative enzymes and color of broccoli juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(3): e14362.
- [49] TIMMERMANS R A H, ROLAND W S U, VAN KEKEM K, et al. Effect of pasteurization by moderate intensity pulsed electric fields (PEF) treatment compared to thermal treatment on quality attributes of fresh orange juice[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3360.
- [50] HUANG W S, FENG Z S, AILA R, et al. Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties, β -carotene and antioxidant activity of air-dried apricots[J]. *Food Chemistry*, 2019, 291: 253-262.
- [51] 田美玲. 高压脉冲电场 (PEF) 激活 α -淀粉酶/葡萄糖淀粉酶/果胶酶的比较研究[D]. 重庆: 西南大学,

2016.

[52] YAPI J C, EKISSI G S E, YA K C, et al. Inactivation kinetics and thermodynamics parameters of polyphenol

oxidase and peroxidase activities in an extract from of violet eggplant (*Solanum melongena* L.) [J]. European Journal of Nutrition & Food Safety, 2021, 13(3): 83-92.

Research progress on regulation of endogenous enzyme activities of fruit and vegetable products by non-thermal processing technology

LI Xihong, YANG Mengjiao, LIANG Fuhao, LIN Ziqin, LI Jiao, LYU Fange, MIAO Ze, JIANG Yuqian
College of Food Science and Engineering/State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457

Abstract: Based on the advantages of non-thermal processing technology, such as low-temperature sterilization, better maintenance of the original nutrients, color, and freshness of fruit and vegetable products, the regulation effect and regulation mechanism of five commonly used non-thermal processing technologies on the endogenous enzyme activity of fruit and vegetable products were reviewed. Ultrahigh pressure, ultrasonic, atmospheric pressure cold plasma, ultraviolet radiation, and pulsed electric field technology can significantly reduce the activity of endogenous enzymes by destroying their spatial structure. These non-thermal processing technologies have advantages in regulating the endogenous enzyme activity of fruit and vegetable products, which can not only improve the quality of fruit and vegetable product, but also provide effective means and schemes for processing and storage of fruit and vegetable products. The deactivation mechanical models of endogenous enzymes in fruit and vegetable products mainly include the first-order model, biphasic model, Weibull model, Hulsheger's and Fermi's empirical models, etc. By studying these models, we can further understand the mechanism of non-thermal processing technology regulating endogenous enzyme activity in fruit and vegetable products, and then optimize the processing scheme of fruit and vegetable products to ensure the quality and safety of products. However, the research of non-thermal processing technology is still in the experimental stage, and the mechanism of regulating the endogenous enzyme activity of fruit and vegetable products is not completely clear, and there are still problems such as high equipment cost and obvious safety risks in actual production. In the future, the process parameters of non-thermal processing technology should be further improved and optimized, the regulation mechanism of non-thermal processing technology on endogenous enzyme activity of fruit and vegetable products should be deeply explored, a variety of non-thermal processing technologies should be jointly applied, and minimize the impact on the quality of fruit and vegetable products as much as possible, to provide references for the application of non-thermal processing technology in deep processing of fruits and vegetables and industrial production of products.

Key words: non-thermal processing technology; fruit and vegetable product; endogenous enzyme; enzyme activity regulation mechanism

(责任编辑:杨晓娟)