

食品中内源酶活性调控技术研究进展

王铜^{1,2}, 李立胜², 靳爽爽², 孔晓慧², 王晓明², 邓绍林^{1,2}, 王鹏¹, 徐幸莲^{1,2}, 韩敏义^{1,2*}

(1. 南京农业大学食品科技学院, 国家肉品质量安全控制工程技术研究中心, 江苏南京 210095)

(2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室云浮分中心, 广东云浮 527400)

摘要: 加工及贮藏过程中, 食品内源酶活性的动态变化是导致其质构特性、营养组成及感官品质发生改变的重要因素, 进而对食品整体品质产生显著影响。因此, 开发食品内源酶活性调控技术, 既是提升食品品质的关键途径, 亦为食品加工与贮藏环节提供了有效的技术支撑。当前, 食品领域用于调控内源酶活性的技术手段丰富多样, 主要涵盖物理、化学及生物调控技术三大类。本文系统阐述各类技术的作用机制及研究进展, 重点聚焦以超高压、超声波及大气压冷等离子体为代表的非热加工技术, 并归纳总结了每种技术在提升食品品质特性方面的应用现状。综上所述, 各类调控技术各有优势与适用场景, 在实际应用中需综合考虑食品原料特性、酶的种类及生产成本等多种因素进行合理选择; 同时应积极探索多种技术协同应用的栅栏效应, 以期对相关领域的深入研究和工业化推广提供理论依据与技术参考。

关键词: 内源酶; 调控技术; 作用机制; 非热加工技术

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0620

Research Progress on the Regulation Technology of Endogenous Enzyme Activity in Food

WANG Tong^{1,2}, LI Lisheng², JIN Shuangshuang², KONG Xiaohui², WANG Xiaoming², DENG Shaolin^{1,2},
WANG Peng¹, XU Xinglian^{1,2}, HAN Minyi^{1,2*}

(1.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, National Center of Meat Quality and Safety Control, Nanjing 210095, China)(2.Yunfu Branch of Guangdong Provincial Laboratory of Lingnan Modern Agricultural Science and Technology, Yunfu 527400, China)

Abstract: During food processing and storage, dynamic changes in the activities of endogenous enzymes are recognized as a major factor leading to alterations in textural properties, nutritional composition, and sensory attributes, thereby exerting a significant influence on overall food quality. Consequently, the development of endogenous enzyme activity regulation technology is not only a critical approach for improving food quality but also provides effective technical support for food processing and preservation. At present, various regulation technologies for endogenous enzyme activity in food industry are mainly divided into three categories: physical, chemical, and biological methods. This review systematically elucidates the underlying mechanisms and research progress of these regulation technologies, with a particular focus on non-thermal processing technologies such as high-pressure processing, ultrasound, and atmospheric pressure cold plasma. The current status of each technology in improving food quality attributes is also summarized. In conclusion, each regulation technology has its own advantages and applicable scenarios. In practice, the appropriate technology should be selected based on a comprehensive consideration of factors including raw material characteristics, enzyme types, and production costs. Furthermore, the synergistic effects of combined technologies, known as hurdle technology, should be actively explored to provide theoretical foundations and technical references for further research and industrial implementation in related fields.

Key words: endogenous enzymes; regulation technology; underlying mechanisms; non-thermal processing technologies

内源酶指动物、植物及微生物来源的食物中本身含有的酶, 其发生变化对食物的质构、营养和感官性质产生

收稿日期: 2026-04-21; 修回日期: 2026-06-15; 接受日期: 2026-06-15

基金项目: 海南省自然科学基金创新研究团队项目(325CXTD612); 云浮市 2024 年现代农业产业集群创新创业人才项目(YF2024NYRC01)

作者简介: 王铜(2002-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: 13940244277@163.com

通讯作者: 韩敏义(1975-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: myhan@njau.edu.cn

重要的影响^[1,2]。内源酶在食品体系中作用广泛,按原料来源主要可分为植物源性食品与动物源性食品两大类。植物源性食品涉及果蔬、谷物等,动物源性食品包含畜禽肉、水产品 & 乳制品等。果蔬中常见内源酶包含多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、果胶甲酯酶(Pectin methyl esterase, PME)等^[3,4]。PPO可催化果蔬原料中的内源性酚类化合物发生氧化聚合反应,进而形成黑色素^[5]。这一过程涉及过氧化氢(H_2O_2)参与的多种氧化反应,包括各类还原剂以及芳香族化合物等物质的氧化转化。果蔬产品中残留PME的存在是橙汁在保质期内出现混浊度下降和絮凝形成的主要原因^[6]。脂氧合酶(Lipoxygenase, LOX)是谷物在长期储存过程中品质劣变的主要诱因,其催化挥发性物质产生,导致陈旧气味和异味,降低储藏谷物的品质^[7]。畜禽肉及水产品中存在多种内源酶,主要包括钙蛋白酶、组织蛋白酶等^[8,9]。钙蛋白酶对肌肉蛋白质的水解作用会产生大量大分子肽,这些肽类产物能够增强其他蛋白酶敏感性,因此在水产品贮藏初期对品质变化产生重要影响。相对较高的组织蛋白酶B和L残留活性是造成干腌火腿质地软、粘性大缺陷的重要原因^[10]。血纤蛋白溶酶又称纤溶酶,它被列为超高温(Ultra-high temperature, UHT)奶在储存期间产生苦味和发生老化凝胶化的主要原因^[11]。因此,食品内源酶的活性直接影响食品品质与加工特性,在加工与贮藏期间调控内源酶活性对食品品质改善具有重要意义。

当前,食品领域用于调控内源酶活性的技术手段主要涵盖物理、化学及生物调控三大类^[12-14]。其中,非热加工技术因能在有效钝酶的同时保留食品营养与活性物质,近年来成为研究热点^[15,16]。本文聚焦于各类调控技术的作用机制与应用效果,重点阐述以超高压、超声波、大气压冷等离子体为代表的非热加工技术,旨在为食品领域的相关研究与产业应用提供参考。

1 物理调控技术

1.1 热加工技术

食品热加工常依据热负荷强度划分为巴氏杀菌、高温短时(High temperature short time, HTST)、UHT三类。该命名体系起源于食品杀菌工程,但其温度-时间组合所对应的热加工强度同样适用于描述内源酶的热变性规律。无论采用水浴、蒸汽或热空气作为传热介质,影响酶活性主要依据是热加工强度,因此本文按此三类热加工强度,分别阐述其对食品内源酶的钝化机制与效果。

1.1.1 巴氏杀菌

巴氏杀菌属于低强度热处理,工艺区间以低温搭配较长处理时间为主。该工艺利用巴氏杀菌强度,热负荷温和,热能输入主要破坏维持酶蛋白三级和四级结构的非共价键,而酶分子的二级结构可得到较好的保留^[17],不易造成食品蛋白剧烈变性 & 营养物质大量损失,主要应用于果蔬、生鲜肉内源酶调控,是食品工业中常用的温和钝酶手段。相较于高温短时、超高温瞬时热处理依靠高热量快速击穿酶蛋白结构的钝酶模式,巴氏杀菌依靠温和且持续的热量输入,缓慢瓦解酶分子内部氢键、疏水作用力等非共价键,正因热处理强度有限,该工艺很难彻底灭活高耐热型内源酶。在植物源食品中,Moscetti等^[18]发现90℃2min加热处理可最快实现马铃薯片的酶活稳定。在动物源食品中,黄业传等^[19]发现猪肉中谷胱甘肽过氧化物酶经60℃处理10min后仍保留54.9%的酶活,而80℃处理1min后酶活仅保留4.7%。刘芝君等^[20]研究发现热处理温度越高,酶失活所需的时间越短,失活速率常数越大,70℃5min处理条件下猪肉中酸性脂肪酶完全失活。即使在同一食品原料中不同形式的同工酶,其热稳定性也存在显著差异。曹晓杰等^[21]对虾肌肉组织进行加热处理发现其敏感型组织蛋白酶 $Z_{T,L}=158.7^{\circ}C$ 、 $E_{a,L}=5.5\text{ kJ mol}^{-1}$,而稳定型组织蛋白酶 $Z_{T,S}=71.9^{\circ}C$ 、 $E_{a,S}=12\text{ kJ mol}^{-1}$ 。活化能越高代表酶分子结构越稳定、耐热性越强,可见稳定型同工酶分子空间结构更加致密,对巴氏杀菌耐受度更强。巴氏杀菌钝酶存在明显局限性仅适用于热敏性内源酶的调控,对耐热酶灭活效果有限。因此,针对不同样品中内源酶的类型及稳定性差异,可依据其热力学特性,选取适配的温度与时间组合,实现对特定目标酶的精准调控。

表1 巴氏杀菌处理对食品中酶活性影响

Table 1 Effects of pasteurization on enzyme activity in food

研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
马铃薯	80~90℃ 0~10 min	所有处理均使PPO失活 $E_a=41.41\pm4.51\text{ kJ mol}^{-1}$, $E_b=53.93\pm1.24\text{ kJ mol}^{-1}$	[18]

猪肉	60~80 °C 5 min	60、65、70、75、80 °C处理条件下, 谷胱甘肽过氧化物酶失活常数分别为: 0.089 1、0.163 6、0.229 6、0.470 0、1.194 3 min ⁻¹	[19]
猪肉	70 °C 5 min	酸性脂肪酶完全失活	[20]
虾肉	35~60 °C 5~60 min	加热处理可以使组织蛋白酶 L 发生变性而失活	[21]
滁菊	60、70 °C 15 min	PPO 残余酶活性分别为 43.7%及 4%; POD 残余酶活性分别为 67%及 21.2%	[22]

1.1.2 高温短时处理

HTST 热处理热强度高于巴氏杀菌, 依托于高温与短时处理组合快速破坏酶蛋白活性中心空间结构, 在保证高效钝酶的同时, 尽量避免了长时间低温加热带来的食品质构软化、营养流失问题, 是果蔬深加工、鲜切农产品主流热钝酶工艺。HTST 依靠短时高热负荷快速瓦解酶活性中心, 钝酶速率大幅提升, 同时缩短整体受热时长, 最大程度保留产品原有品质。刘园等^[23]研究发现 100 °C加热处理桃果实, 80 s 即可有效钝化桃中 PPO 和 POD, 且果实组织结构和色泽得以较好保留, VC 含量也未出现明显下降。这表明, 高温短时加热在钝酶的同时对热敏性营养成分破坏较小, 适用于对品质保留要求较高的果蔬原料。李彦丽等^[24]进一步研究发现, 百合经 100 °C处理后, 其中薄片部位的 PPO、POD 在热烫分别超过 30 s 和 60 s 即失去活力。对比两者可知, 不同原料、不同部位的内源酶对热处理敏感性存在差异, 实际应用中需根据原料特性优化处理时间。Akbar 等^[25]采用 100 °C、60 s 高温短时处理玉米笋, 可实现 POD 90%以上失活率, 有效延缓贮藏期果汁浑浊度下降问题。Aguiló-Aguayo 等^[26]采用 90 °C处理草莓汁 30 s 及 60 s, 其 LOX 残留酶活性分别为 66.7%和 37.7%。李慧慧等^[27]研究发现将白灵菇进行 100 °C 90 s 及 95 °C 150 s 处理可完全钝化 PPO 活性。整体而言, 高温短时热处理适配大多数果蔬内源酶钝酶需求, 相较于巴氏杀菌钝酶效率大幅提升, 相较于超高温瞬时处理热损伤更低, 是果蔬加工领域兼顾钝酶效果与产品品质的优选热调控工艺。

表 2 高温短时处理对食品中酶活性影响

Table 2 Effects of high-temperature short-time treatment on the enzyme activity in food

研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
桃	100 °C 0~80 s	随热烫时间增加, PPO、POD 钝化失活	[23]
百合	100 °C 0~120 s	薄片部位 PPO、POD 在热烫分别超过 30 s 和 60 s 失去活力, 厚片部位 PPO、POD 在热烫分别超过 60 s 和 120 s 失去活力	[24]
玉米笋	100 °C 60 s	POD 失活率达 90%	[25]
草莓汁	90 °C 30 s、60 s	30 s 和 60 s LOX 残余酶活性分别为 66.7%、37.7%	[26]
白灵菇	100 °C 90 s; 95 °C 150 s	可完全钝化 PPO 的活性	[27]

1.1.3 超高温瞬时处理

UHT 处理较于高温钝酶的温度更高、时间更短, 是高温短时技术的衍生和再发展^[28], 它依靠极高瞬时热负荷导致酶蛋白二级结构无序化、三级结构展开, 并可能通过破坏非共价键使酶活性中心塌陷, 可灭活或显著抑制巴氏杀菌、高温短时处理难以抑制的高耐热内源酶^[29], 多用于谷物及乳制品。钟立煌等^[30]发现利用过热蒸汽能够显著降低青稞籽粒中的脂肪酶和 POD 活性, 在 190 °C下处理 10 s 后, 这两种酶的残留活性分别为 24.70%和 14.76%。尽管 UHT 处理使这两种酶活性大幅降低, 但仍有部分残留, 说明脂肪酶和 POD 对极端热处理的耐受性较强, 单纯依靠提高温度难以实现完全钝化。内源酶种类对 UHT 热处理的耐受度存在明显差异, 这一点在乳制品体系中表现尤为突出。牛乳中的内源酶包括碱性磷酸酶、乳过氧化物酶、纤溶酶等, 其中纤溶酶为牛乳中最主要的内源性耐热酶^[31]。标准 UHT 处理可完全钝化乳中碱性磷酸酶和脂蛋白脂肪酶, 而纤溶酶具显著热耐受性, 处理后仍残存一定活性或可再激活, 与此同时, 纤溶酶配套抑制剂耐热性远低于纤溶酶本身, UHT 高热会优先造成抑制剂失活, 打破原料体系内酶与抑制剂的动态平衡; 残留纤溶酶持续水解酪蛋白, 最终引发贮藏期蛋白水解、风味发苦以及老化凝胶化等品质缺陷, 这表明热加工强度即使达到 UHT 水平, 对不同内源酶的钝化效果仍存在酶种依赖性差异^[32]。除酶自身耐热性外, UHT 工艺参数也会直接改变最终钝酶效果。Wang 等^[33]研究表明, 120 °C 2 s 和 135 °C 2 s 的 UHT 条件导致西瓜汁中超过 10% PPO 残留率, 而 110 °C 2 s 导致约 2 倍 PPO 残留率, 导致果汁中酚类物质的含量显著降低。Huang 等^[34]与 Gao 等^[35]研究进一步证实在特定 UHT 工艺参数下, 可使杏花蜜及红葡萄柚汁中 PPO、PME、POD 三类关键果蔬劣变酶完全失活。超高温瞬时处理虽能有效灭活大多数内源酶, 但受

热时间极短导致热量渗透不足易出现酶灭活不彻底的问题，同时超高温易破坏食品热敏营养与风味物质，因此实际生产中需要结合目标酶耐热性、食品基质特性，精准匹配热加工参数，平衡钝酶效果与产品品质。

表 3 超高温瞬时处理对食品中酶活性影响

Table 3 Effects of ultra-high temperature treatment on the enzyme activity in food			
研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
青稞籽粒	190 ℃ 10 s	脂肪酶和 POD 残留活性分别为 24.70%和 14.76%	[30]
牛乳	137 ℃ 4~6 s	碱性磷酸酶和脂蛋白脂肪酶可完全失活，而纤溶酶具有一定活性。	[32]
牛乳	>150 ℃ <0.2 s	纤溶酶仍具有一定活性	[11]
西瓜汁	110、120 及 135 ℃ 2 s	120、135 ℃ PPO 残余率均超过 10%；110 ℃ PPO 残余率为约为前者的两倍	[33]
杏花蜜	110 ℃ 8.6 s	PPO、PME、POD 完全失活	[34]
红葡萄柚汁	110 ℃ 8.6 s	PPO、PME、POD 完全失活	[35]

1.2 非热加工技术

1.2.1 超高压技术

超高压技术又称高静水压技术（High Pressure Processing, HPP），是将食品置于 100–1000 MPa 的超高静水压环境中，在常温或较低温度下（通常 20~40 ℃）维持一定时间，通过压力的物理作用实现内源酶钝化的食品品质改良加工技术。超高压技术通过破坏酶蛋白分子中的疏水相互作用、氢键等非共价键，诱导三级结构和四级结构发生不可逆改变。高压环境可破坏维持酶空间构象的疏水核心，并使活性中心的氢键网络断裂，导致亚基解离或活性位点塌陷，进而丧失催化功能^[36]。相比之下，超高压对 α -螺旋、 β -折叠等二级结构破坏相对有限。如图 1 所示，压力会改变酶与底物相互作用与结合能，促使酶分子经历从天然态至完全变性的构象转变^[37]。

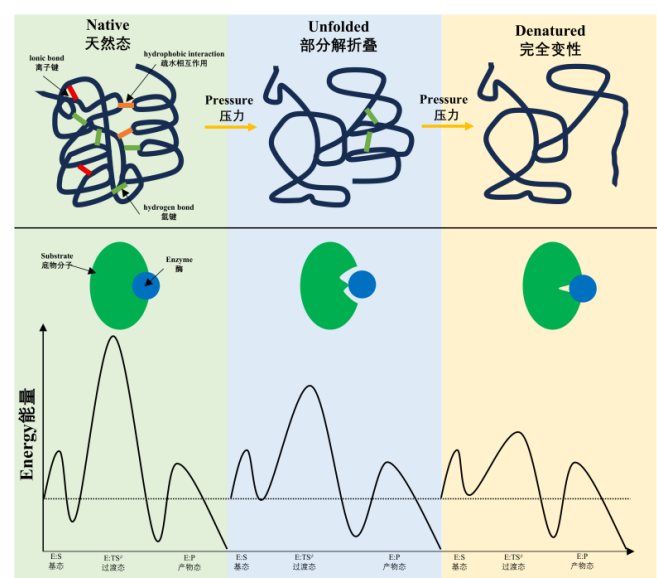


图 1 压力对酶相互作用及结合能的影响

Fig.1 Effects of pressure on enzyme interactions and binding energy

注：黑色曲线为酶催化反应的能量变化曲线。

超高压对内源酶活性的影响具有双向性：适度压力可激活酶活性，而过高压力的则导致酶失活。其机制在于，压力低于最适值时，酶活性中心结构发生可逆性变化，可能因底物接触效率提高而出现压力激活现象；当压力超过最适值后，酶蛋白构象发生不可逆改变，催化功能逐步丧失^[38]。在相关研究中发现类似规律，蒲莹等^[39]利用超高压处理黑果枸杞汁，发现 200、300 和 400 MPa 时 PPO 活性分别为 25.83、28.29、0.49 U mL⁻¹，对照组 PPO 活性为 27.28 U mL⁻¹，活性出现轻微上升；但随着压力进一步增大，PPO 活性开始下降。类似地，徐丽娟等^[40]研究表明，毛茛籽中脂肪酶的活性随压力变化而改变，当压力为 150 MPa 时活性达到最大值，比 100 MPa 时高出 40%。超高压处理对内源酶的作用是一个动态过程，既可使其失活，也可激活活性。

高压对内源酶的抑制效果不仅取决于压力大小，还受处理时间和酶的种类共同影响。在压力恒定的条件下，延长处理时间通常可增强酶的灭活程度，但二者并非简单线性关系。Akyol 等^[41]报道，350 MPa、20 ℃处理胡萝卜时，POD 活性在 30 min 时降至 16%，延长至 60 min 后进一步降至 9%，表明在一定范围内增加处理时间有助于提高钝酶效果。然而不同酶对超高压的敏感性存在显著差异。侯思涵^[42]对探究超高压处理对哈密瓜汁中关键酶影响，研究发现经过相同处理条件醇脱氢酶（Alcohol dehydrogenase, ADH）和酰基转移酶（Acyltransferase, AAT）完全失活。氢过氧化物裂解酶（Hydroperoxide lyase, HPL）残留 3%、LOX 残留 73%、磷脂酶（Phospholipase A1, PLA-1、Phospholipase A2, PLA-2）残存酶活分别 30.8%、28.5%。这一差异表明，酶的分子结构、活性中心类型及金属辅因子依赖性可能是决定其压力耐受性的关键因素。此外同一种内源酶，在不同食物体系中，失活参数也会存在差异。Wang 等^[43]对比研究了豆浆与粗大豆提取物中 LOX 的灭活效果，结果表明豆浆体系中酶的失活速率常数低于粗大豆提取物体系。

表 4 超高压处理对食品中酶活性影响

Table 4 Effects of ultra-high pressure treatment on enzyme activity in food

研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
黑果枸杞汁	200、300、400、500 MPa 10 min	400 MPa 以上压力能使黑果枸杞汁中 PPO 活性降低到 0.5 U mL ⁻¹ 以下	[39]
毛榛籽	100~400 MPa	100~150 Mpa 条件下，压力增加有利于提高脂肪酶活力，150~400 MPa 范围内脂肪酶的活性共降低 57.3%	[40]
胡萝卜	350 MPa	350 MPa、20 ℃条件下处理前 30 min，残留活性降至 16%，60 min 后进一步降至 9%	[41]
哈密瓜汁	500 MPa、35 ℃、15 min	ADH、AAT、HPL、LOX、PLA-1、PLA-2 残存酶活分别为 0、0、3%、73%、30.8%、28.5%	[42]
豆浆、粗大豆提取物	0.1~650 Mpa 5~60 ℃	两种体系的 LOX 灭活速率常数均随压力升高而增大；豆浆体系中的速率常数略小于粗大豆提取物体系	[43]
冰虾	100~500 Mpa 5 min	300 MPa 以上超高压处理可以抑制组织蛋白酶 B、D、H、L 的活性	[44]

1.2.2 超声波技术

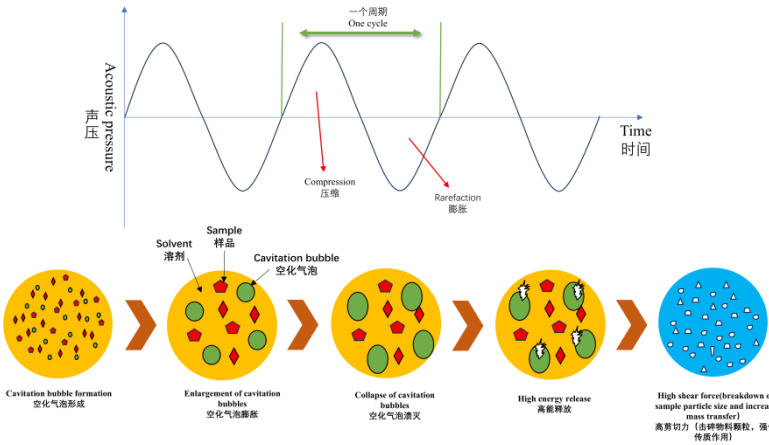


图 2 超声波及空化效应作用机制示意图

Fig.2 Schematic representation of the mechanism of ultrasonic cavitation effects

注：绿色圆形结构表示空化气泡，其在超声波在交变声压场下依次经历形成、膨胀和溃灭过程。

超声波是频率高于 20 kHz，超出人耳可听声频上限的机械纵波，具有方向性好、穿透能力强、能量集中等特性。超声波技术（Ultrasound Technology, UT）处理后食品中微生物细胞增殖受到显著抑制，内源酶活性发生改变，同时其杀菌保鲜效能得到大幅提升^[45]。超声波在介质中传播时，能够驱动介质质点产生机械振动。这种携能振动会与介质之间引发复杂的物理化学相互作用，由此产生机械效应、热效应和空化效应。超声波作为机械纵波，在介质中传播时会驱动介质质点做高频周期性振动，进而产生持续的机械剪切力、冲击力与摩擦力，这种由质点

振动直接引发的力学作用即为机械效应。超声波在介质中传播时,部分声能会被介质吸收并转化为热能,导致介质局部或整体温度升高,这种能量转化过程引发的温度变化效应即为热效应。超声波在液体介质中传播时,会交替形成高压区与低压区,低压区的压力低于介质的饱和蒸气压,促使介质分子汽化形成微小空化泡;高压区时空化泡迅速压缩、破裂,释放出瞬时高温、高压和强烈冲击波^[46,47],这一过程称为超声波空化效应。其中空化效应为核心调控机制。

超声波对内源酶的调控具有明显的强度依赖性。低强度超声波通过机械振动和空化效应,使酶分子从聚集态分散为单分子态,增加酶的溶解度和活性位点暴露程度;同时,超声波诱导酶分子构象发生有利变化,增强酶与底物的亲和力,降低活化能,从而显著提高酶的催化效率^[48]。Wang等^[49]研究300 W超声处理牛肉后,组织蛋白酶B和L活性显著增大($P<0.05$),说明适度超声处理可激活内源蛋白酶,可推动牛肉宰后成熟进程,具备改善肉质嫩度的潜力。但超声激活是一把双刃剑,对需要抑制的酶而言,过度激活反而加速品质劣变。与此相对,高强度超声波通过空化效应产生的瞬时冲击波、局部高温和高压等极端物理环境,对酶分子构象造成不可逆破坏。超声空化可破坏 α -螺旋和 β -折叠中的氢键网络,导致二级结构有序度下降;可破坏维持酶分子空间构象的疏水键和离子键,使疏水核心松散、活性中心塌陷;对于含有二硫键的酶超声波的机械剪切力还可导致其断裂,进而引起亚基解离或肽链骨架松散,四级结构瓦解。

超声波对内源酶的调控效果受多种因素影响,主要包括超声功率、超声频率、处理温度、处理时间及酶的种类等。Ercan等^[50]探究了超声波对番茄POD的影响,当超声功率为15%、25%和40%,处理150 s时POD失活率分别35.84%、36.07%、83.79%。15%与25%功率组之间失活率提升仅0.23%,而25%升至40%时失活率提升47.72%,这说明可能存在一个临界功率阈值,当低于该阈值时,功率增加对钝酶效果贡献甚微,超过阈值后酶失活速率显著加快。不同参数组合可实现等效的钝酶效果,为工艺优化提供了灵活性。郑炯等^[51]研究表明,在200 W功率下超声处理西瓜汁30 min时残留酶活与功率300 W时处理20 min可达到相同处理效果。因此在实际应用中可通过“较低功率+较长处理时间”或“较高功率+较短处理时间”两种策略实现目标,需根据能耗、处理效率和产品品质要求综合权衡。

表5 超声波处理对食品中酶活性影响

Table 5 Effects of ultrasonic treatment on enzyme activity in food

研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
牛肉	功率0、300和600 W, 20 kHz, 20 min	0、4 d时300 W处理显著提高样品中组织蛋白酶B+L活性, 功率增加至600 W显著降低活性	[49]
番茄	功率为15%、25%、40%、50%、75%, 处理时间20~150 s	50%功率下处理150 s, 及75%功率下处理90 s, 均实现了POD的完全失活	[50]
西瓜汁	100、200、300 W, 10、20和30 min	300 W处理西瓜汁30 min后, PPO和POD活性分别降低55%和40%	[51]
甜柿	420 W 30 min	多聚半乳糖醛酸酶活力降低 $8.79 \mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\text{g}^{-1}$	[52]
椴梓汁	400 W 20 min	PPO活性下降至35%	[53]

1.2.3 大气压冷等离子体

等离子体于1897年被William Crookes首次发现,是由电子、离子、自由基、中性粒子等组成的部分或完全电离的气体混合物。它被认为是继固体、液体和气体之后的物质第四态,整体呈电中性。Langmuir于1928年首次使用“等离子体”这一术语^[54],当时他观察到电离气体中的振荡现象,并将其描述为“含有平衡电荷的离子和电子区域”。依据热平衡状态,等离子体可分为高温与低温两类;低温等离子体因气体处于部分电离或未电离状态,可进一步区分为热等离子体和冷等离子体。大气压冷等离子体(Atmospheric Cold Plasma, ACP)即指在常压环境下产生和维持的非热平衡等离子体,具有处理温度低、活性成分丰富、环境友好等特点。

ACP主要通过介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge, DBD)、微波放电(Microwave discharge, MD)、电晕放电(Corona discharge)、辉光放电(Glow discharge)以及大气压等离子体射流(Atmospheric pressure plasma jet, APPJ)等方式产生。由于ACP能够在常压下产生且温度较低,因此在食品工业领域展现出广阔的应用前景。ACP技术不仅影响食品体系中各种内源酶的活性,而且还具有杀菌活性且无有毒残留和热损伤^[55]。同时其在食品组分的改性修饰及在降解农药降解均有应用。如图3所示通过放电过程,ACP可产生丰富的活性氧物种与活性氮物种

（Reactive Oxygen and Nitrogen Species, RONS）主要通过氧化修饰攻击酶蛋白的氨基酸侧链，具体机制包括二硫键断裂与重排，还可以导致主链酰胺键的质子化状态改变，瓦解 α -螺旋和 β -折叠的氢键稳定性，引起二级结构失序，同时也会削弱疏水相互作用，引起三级结构坍塌^[56]。多种化学键的协同破坏最终导致酶活性中心构象改变，丧失催化功能。

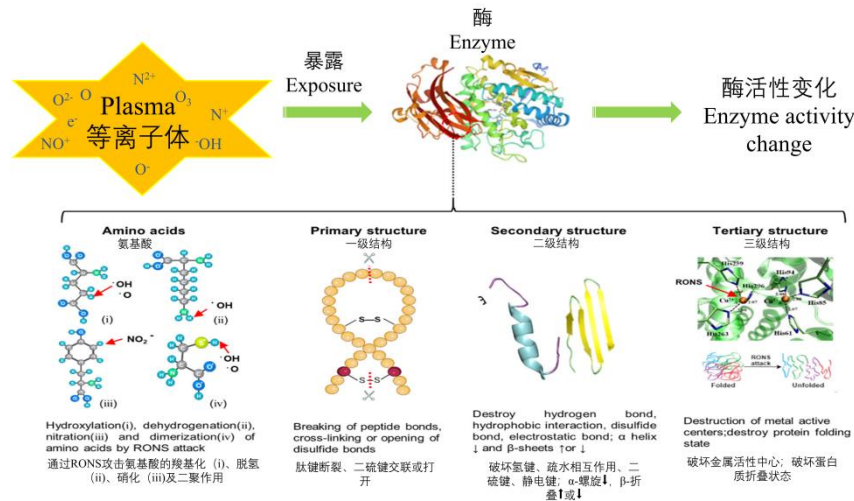


图 3 低温等离子体影响酶活性的作用机制

Fig.3 Mechanism of cold plasma affecting enzyme activity

注：红色虚线与箭头代表等离子体暴露破坏化学键的作用位点；RONS：活性氧与活性氮物种。

ACP 调控内源酶的效果取决于工艺参数（电压、功率、频率）、处理条件（时间、气体成分、流速）及酶自身特性。一般而言，ACP 对酶的失活作用随放电电压、功率的升高及处理时间的延长而增强，其根本原因在于更高的电压和功率可产生更高浓度的活性氧、氮物种，更长的处理时间则增加了酶分子与活性粒子的接触机会，从而加剧对酶蛋白的攻击。然而，各参数对失活效率的贡献并非均等。Pankaj 等^[57]采用 DBD 等离子体处理番茄 POD，系统研究了电压和处理时间对酶失活动力学的影响，发现尽管两者均与酶活性呈负相关，但处理时间的影响显著大于电压。这一差异可能源于电压升高对活性粒子浓度的提升存在饱和效应，而延长处理时间则可持续累积酶分子的结构损伤。因此，在工艺优化中，优先延长处理时间可能比一味提高电压更为高效。ACP 对同一食品基质中的不同内源酶表现出差异化的抑制效果。Laika 等^[58]采用 DBD 等离子体对鲜切冰鲜生菜进行 6 kV 电压、23 kHz 处理，60 min 后 POD 的残余活性约为 50%，而 PPO 仅残留约 20%。PPO 对 ACP 更为敏感的原因可能在于 PPO 活性中心的双铜离子更易被活性氧、活性氮氧化破坏，而 POD 的血红素辅基具有一定的抗氧化防御能力，同时两种酶的同工酶组成及对对象变化的耐受性差异也可能导致敏感性的不同。该研究进一步证实，催化活性的丧失与蛋白质结构改变及活性位点受损密切相关。值得注意的是，ACP 对酶的调控并非单一的抑制作用，在特定条件下也可呈现激活效应。Chen 等^[59]报道了等离子体处理后发芽糙米中 α -淀粉酶的水解活性显著高于未经处理的对照，其可能的作用机制是等离子体处理促进了种子快速萌发并增强了幼苗早期活力。

表 6 大气压冷等离子体处理对食品中酶活性影响

Table 6 Effects of atmospheric pressure cold plasma treatment on enzyme activity in food			
研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
番茄	30、40、50 kV	30、40、50 kV 对应一级动力学模型 K_p 分别为 0.63 ± 0.06 、 0.71 ± 0.07 、 $0.99 \pm 0.05 \text{min}^{-1}$	[57]
生菜	6 kV 23 kHz 15~60 min	60 min 后 POD 的残余活性约为 50%，PPO 约为 20%	[58]
糙米	1~3 kV 10 min	处理组 α -淀粉酶活性显著高于对照组	[59]
全麦面粉	5~25 kV 1~10 min	经 25 kV 10 min 处理 PPO 和 POD 的失活率 $\geq 99\%$	[60]
香蕉片	4.8~6.9 kV 35~155 s	电压 4.8~6.9 kV 条件下，PPO 活性从 86% 下降到 30%， 时间从 35 s 增加到 155 s，活性从 88% 下降到 29%	[61]

2 化学调控技术

相较于物理调控技术,化学调控的操作更为简便、成本较低,适合快速、小规模酶活干预;但外源化学物质的引入存在安全性争议和风味劣变风险,是其产业应用的主要制约。化学调控技术通过pH调节、金属离子螯合法及氧化还原等方法调控内源酶活性。pH调节主要通过调节体系pH值,改变酶蛋白电荷分布,偏离酶的最适pH范围,破坏酶分子的氢键、离子键,导致酶构象松散、活性中心塌陷。而酶的最适pH与其自身氨基酸组成密切相关,不同极性、酸碱性氨基酸残基的占比与排布,直接决定了酶蛋白侧链基团的解离特性,进而限定其适宜作用酸碱环境^[62]。同时该调控方式具备明显pH调节可逆性,若仅小幅偏离最适pH、未彻底损毁酶分子高级结构时,将体系酸碱度回调至适宜区间后,酶蛋白空间构象可逐步恢复,内源酶活性也能够得到不同程度回升^[63,64]。柠檬酸、抗坏血酸、乳酸等是常用调控pH化学试剂。有机酸的抑制效果具有浓度依赖性和酶选择性。邹立强等^[65]研究不同浓度的柠檬酸处理对蘑菇PPO相对酶活性影响,研究发现提高柠檬酸浓度可显著抑制PPO活性。当浓度达到70 mmol/L时,PPO的相对酶活性已下降至原酶活性的1%,这表明,对于PPO这类易受酸抑制的酶,较高浓度的有机酸可实现近乎完全的失活。Izzah等^[66]使用不同浓度抗坏血酸、柠檬酸和草酸作为酸化剂,对鲜切莲雾(Syzygium samarangense)中PG、PME及PPO活性调节效果。结果显示,经草酸处理的果实抗氧化活性最高,柠檬酸和抗坏血酸效果依次递减,同时有机酸种类与施用浓度均难以显著改变PME活性。由此可见,不同内源酶对外源有机酸的响应敏感度存在明显差异。

内源酶活性依赖金属离子如Cu²⁺、Fe²⁺、Ca²⁺作为辅因子,金属离子螯合法通过螯合剂与这些离子结合形成稳定复合物,使酶失去辅因子而失活。乙二胺四乙酸(Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)是常见螯合剂代表。EDTA的抑制效果因酶的种类而具有显著差异。Pinto等^[67]添加10 mmol·L⁻¹ EDTA豇豆中PPO活性被抑制15%,抑制效果有限。相比之下,Zhang等^[68]实验发现EDTA能够抑制糯米粉中内源α-淀粉酶活性,当浓度达到5 mmol时,酶活性完全丧失。圆二色谱分析表明,EDTA通过螯合酶分子中的金属辅因子,破坏活性中心构象,导致催化功能丧失。这一发现表明内源性α-淀粉酶可能是金属酶。α-淀粉酶蛋白分子中可能存在一个或多个高亲和力金属结合位点,在EDTA存在下释放金属离子,导致酶催化活性降低。

氧化还原法主要利用氧化、还原类物质靶向作用于酶蛋白氨基酸侧链活性基团,改变酶分子表面亲疏水性与分子内二硫键、氢键排布状态,扰乱酶活性中心规整空间结构,阻碍底物与酶活性位点结合,最终实现对内源酶活性的精准调控。不同氧化还原试剂作用靶点存在差异,常见的有臭氧(O³)、过氧化氢(H₂O₂)、谷胱甘肽等,其中O³在果蔬保鲜领域应用最为广泛。陈存坤等^[69]研究发现10.72 mg m⁻³的O³处理能够显著提升草莓中超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性,使其最大值提前,能够提升抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbic acid superoxidase, APX)活性,刺激POD酶活的活性提高,并推迟POD活性出现高峰的时间,有利于提高草莓的食用价值和经济价值。与此同时,O₃对风味劣变相关酶的抑制则有助于保持产品特征风味。Li等^[70]研究得出结论适宜浓度的O³可以抑制了LOX的表达,同时诱导了醇脱氢酶的表达;并上调了与芳香族氨基酸代谢相关的芳香族氨基酸转氨酶,该变化可以减少不良不饱和醛酮的积累,同时促进了醇类和酯类的生成,从而保持了甜玉米特有的挥发性风味特征。

表7 化学调控技术对食品中酶活性影响

Table 7 Effects of chemical regulation techniques on enzyme activity in food

研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
蘑菇	20、40、70 mmol L ⁻¹ 柠檬酸	柠檬酸浓度达到70 mmol L ⁻¹ 时,PPO相对酶活性仅为原酶活性1%	[65]
鲜切莲雾	抗坏血酸、柠檬酸、草酸	有机酸处理可降低PG活性,不同种类的酸及其浓度变化均未对PME、PPO活性产生显著影响	[66]
豇豆	10 mmol L ⁻¹ 间苯二酚、EDTA、叠氮化钠	可分别使PPO活性降低40%、15%和100%	[67]
糯米粉	1和5 mmol/L EDTA	抑制内源性α-淀粉活性效果显著	[68]
草莓	臭氧O ³	提升草莓中SOD、APX、POD酶活	[69]
甜玉米	臭氧O ³	抑制LOX表达,同时诱导醇脱氢酶的表达;上调芳香族氨基酸转氨酶表达	[70]
猕猴桃	Zn ²⁺ 、Na ⁺ 、K ⁺	均显著增强α-甘露糖苷酶活性,其中K ⁺ 激活作用最强	[71]

3 生物调控技术

生物调控技术是指利用生物体自身或其产物对其他生物体或环境进行精确、可控的干预和调节的一类技术手段，凭借安全性高、无化学残留、特异性强等优势，是酶活调控领域重要组成部分。该技术主要分为外源生物物质调控与基因层面调控两大类，前者契合食品加工具体应用场景，后者为酶活性定向改良的手段，后者虽不属于常规加工技术，但代表了内源酶活性调控的前沿方向，因此本文予以简要介绍。相较于上述两种调控手段，生物调控凭借其天然来源和高度特异性，契合了“清洁标签”趋势，但其作用时间较长，且基因改造方法面临严格的法规限制，目前产业化程度较低，主要应用于高端食品原料和品种改良领域。二者均可通过不同途径调控内源酶表达水平与催化活性。

外源生物物质调控通过在食品加工或贮藏过程中直接添加天然来源的活性物质，实现对内源酶活性的快速、可逆调控。与化学合成抑制剂相比，生物源抑制剂具有来源可再生、作用温和可控、消费者接受度高等独特优势，在实际应用中受到广泛关注。常见的生物源抑制剂主要包含如茶多酚、迷迭香提取物、香辛料提取物等植物提取物。Guan 等^[72]发现茶多酚处理能显著抑制鲜切马铃薯中马铃薯 PPO 和 POD 活性，同时调控酚类物质合成与氧化代谢过程，进而延缓鲜切马铃薯贮藏期间褐变发生。这一研究表明，茶多酚的优势在于其对多种褐变相关酶如 PPO 和 POD 具有抑制能力，适用于需要综合控制酶促褐变的果蔬保鲜场景。相比之下，迷迭香提取物的调控靶点更集中于脂质氧化相关酶。Shi 等^[73]采用迷迭香提取物抑制成熟干酪中 LOX，其作用机制在于有效阻断不饱和脂肪酸氧化生成氢过氧化物，从而显著减少己醛等异味醛类的产生。这说明迷迭香提取物特别适用于高脂食品如干酪、肉制品的抗氧化保鲜。此外，不同香辛料提取物对同一靶酶的抑制效果存在显著差异。Le^[74]探究了六种香辛料提取物对结球生菜 PPO 抑制效果，发现桂皮提取物效果最佳，在 2.0 mg·mL⁻¹ 浓度下抑制百分率达到 32.39%±1.47%，这可能归因于其富含的酚类化合物与 PPO 活性中心的铜离子发生螯合作用。

基因层面调控主要有基因工程、基因编辑技术等方式，通过对酶基因的表达、活性或性质进行定向改造，实现对酶活性的精确调控。基因工程主要利用限制性内切酶在特定核酸序列位置进行切割，再将外源基因插入宿主基因组中来实现酶活性的调控。Kramer 等^[75]通过反义 RNA 技术调控番茄果实 PG，从而延缓成熟番茄软化，保持品质和风味。基因编辑技术能够在基因组特定靶点进行精准的 DNA 序列修饰，包括敲除、插入或替换。与传统基因工程不同，基因编辑不依赖限制性内切酶的特定识别位点，而是通过设计特异性引导分子，实现对任意基因组位点的定向编辑。Bennis 等^[76]通过 CRISPR Cas9 基因编辑技术，以单一和组合的方式过表达携带脂肪酸合成复合物特定结构域突变的 FAS1 和 FAS2 基因提升乙酯，丰富拉格啤酒风味。然而，两者均面临公众接受度和法规挑战，目前更适用于原料品种改良而非终端食品加工。

表 8 生物调控技术对食品中酶活性影响

Table 8 Effects of bioregulation technologies on enzyme activity in food

研究对象	处理条件	研究结果	参考文献
鲜切马铃薯	茶多酚	0.3 g·L ⁻¹ 茶多酚组前期抑制 PPO 酶效果最优，贮藏 4 天后则以 0.2 g·L ⁻¹ 处理组作用效果最佳；贮藏期内各组 POD 活性持续上升，而茶多酚处理可稳定降低其活性。	[72]
干酪	迷迭香提取物	迷迭香提取物显著抑制 LOX 活性，阻断其 Fe ²⁺ /Fe ³⁺ 催化循环，减少氢过氧化物生成，延缓异味产生。	[73]
结球生菜	桂皮、丁香、芫荽籽、孜然、茴香籽、花椒六种香辛料提取物	在 2.0 mg·mL ⁻¹ 浓度下 PPO 抑制百分率达到 32.39%±1.47%；其次为茴香籽 16.93%±1.47%、花椒 14.24%±0.83%、孜然 13.72%±1.35%、芫荽籽 9.85%±0.75% 和丁香 9.64%±0.47%	[74]
番茄	反义 RNA 技术	调控成熟番茄果实 PG 表达	[75]
拉格啤酒	CRISPR-Cas9	ScFAS1 ^{I306A} 和 ScFAS2 ^{G1250S} 的过表达显著提高了己酸乙酯的生成量，而 ScFAS1 ^{R1834K} 则促进了辛酸乙酯的生成。将 ScFAS1 突变基因与 ScFAS2 ^{G1250S} 相结合，可显著提高在全麦芽汁培养基中生长的培养物中最终乙酯的浓度	[76]
酒精饮料	传统诱变或现代基因编辑	改造酵母内源氨基酸合成酶调控机制，酵母发酵积累更多氨基酸前体	[77]
珍珠粟粉	CRISPR-Cas9	脂肪酶和脂氧合酶同工酶的失活	[78]

4 讨论

综合前三节物理、化学、生物三类调控技术的作用特征可知，食品核心内源酶因结构特性、辅因子依赖及功能差异，对各类调控手段呈现显著的差异化响应，不同品类食品的关键劣变酶适配专属靶向调控方案，是实现食品品质精准控劣变的核心关键。本节首先基于果蔬、谷物、肉品三大体系典型内源酶的结构与功能特性，系统梳理其靶向调控特征；进而凝练不同调控技术发展瓶颈与对比分析。

4.1 内源酶的靶向调控规律

对于果蔬核心劣变酶，PPO为铜离子依赖型氧化酶，是果蔬酶促褐变的核心诱因，它对有机酸、植物多酚、冷等离子体高度敏感，采用化学与生物调控策略可实现高效抑酶。POD含血红素辅基、结构稳定性强，单一化学处理难以失活，高强度超声、热加工、等离子体等物理方式是钝化该酶的优选手段。PME热稳定性极强，是导致果汁浑浊衰减、果蔬软化的关键酶，高温蒸汽热烫是靶向灭活的核心工艺。综上，果蔬控酶需遵循“分酶适配”原则，可以通过复合技术协同来实现褐变抑制与质构稳定。对于谷物核心劣变酶，LOX是谷物、豆类贮藏期间脂质氧化、异味生成、品质陈化的关键酶，依赖铁离子辅因子发挥催化作用。该酶耐压性较强，常规超高压、温和化学处理难以彻底抑制，但对短时高温过热蒸汽、天然抗氧化提取物具有高度敏感性。过热蒸汽可快速破坏LOX空间构象，迷迭香等植物提取物可阻断其脂质氧化催化循环，二者复合可靶向解决谷物贮藏劣变问题，是谷物LOX定向调控的优选技术组合。针对肉品核心功能酶，钙蛋白酶与组织蛋白酶共同调控畜禽肉、水产品的宰后成熟与贮藏劣变，低强度超声波、低压超高压等温和非热处理可适度激活上述酶活性，促进肌原纤维适度水解，改善肉质嫩度，适用于肉品嫩化提质；而高强度热加工、长时间高压处理可不可逆破坏酶蛋白构象，钝化蛋白酶活性，有效抑制肌肉蛋白过度水解导致的肉质软烂、黏腻等品质劣变，适配肉品保鲜贮藏需求，实际生产中可根据加工目标差异化选择调控强度，实现肉质精准调控。

4.2 不同调控技术发展瓶颈与对比分析

表 9 不同调控技术对比分析

Table 9 Comparative analysis of different regulatory technologies

调控技术	适用对象	优势	劣势
巴氏杀菌	果蔬、生鲜肉	工艺成熟、成本低廉；对食品营养破坏较小	仅能灭活热敏酶，对高耐热内源酶钝化效果差；加热时间偏长，易造成果蔬质构软化
HTST	鲜切农产品、果汁	钝酶效率高；受热时长短，兼顾钝酶效果与产品风味、营养保留	对耐热酶灭活能力有限；参数匹配不当仍会产生一定热损伤
UHT	谷物、乳制品、液态食品	瞬时高热可破坏肽链结构，能灭活多数高耐热内源酶	受热时间极短，热量渗透不足易出现酶活残留；高温易破坏热敏营养与风味物质
HPP	果汁、即食果蔬、水产品	保留营养与新鲜风味、可同时杀菌钝酶	设备造价高昂，连续化生产能力弱
UT	畜禽肉、果蔬汁、鲜切果蔬	设备成本适中；兼具机械、空化、热多重效应	大规模生产时空化效应均匀性差
ACP	鲜切果蔬、谷物制品	处理温度低、无化学残留、环境友好	活性粒子穿透深度有限，厚料及高水分活度食品处理效果不稳定；连续化生产线尚未成熟
pH调节	蘑菇、鲜切果蔬等富含PPO原料	操作简单、成本低、普及性强	抑制效果具有可逆性；易改变食品原有风味
金属离子螯合调控	谷物、豆类	靶向性强，可剥夺酶辅因子实现失活	螯合剂存在残留风险；对非金属依赖型酶基本无效
氧化还原调控	鲜切果蔬	作用快速，可同步实现抑菌与酶活调控	试剂易影响食品色泽、风味；部分氧化剂存在安全限制
外源生物物	高端鲜切果蔬、	天然安全、无化学残留、作用温和	提取物稳定性不足；长效钝酶效果有限

质调控	天然油脂		
基因调控	大豆、谷物等原料 品种改良	基因层面定向调控酶表达, 调控精度高	研发成本高、周期长; 受法规限制, 公众接受度低

尽管上述技术各具优势, 但其产业化应用仍面临多重瓶颈。热加工技术虽成熟经济, 但高温不可避免地造成热敏性营养素损失及色泽、质构、风味的劣变, 且能耗较高。非热加工技术虽能有效规避上述缺陷, 但超高压设备投资高昂, 连续化生产能力不足, 目前多局限于实验室规模或高附加值产品; 超声波设备成本中等, 但放大过程中空化效应的均匀性与可重复性仍是技术难点; 冷等离子体发生器成本相对较低, 然而活性粒子的穿透深度有限, 对高厚度或高水分活度食品的处理效果不稳定, 且连续化生产线的设计尚不成熟。化学调控操作简便、无需专用设备、试剂成本低廉, 是中小型企业快速干预酶活的最经济手段。然而, 外源化学物质的引入存在潜在安全隐患, 部分国家已对亚硫酸盐、EDTA等添加剂的使用范围进行限制。此外, 食品基质差异显著, 高蛋白、高脂肪食品的缓冲能力强, 可能削弱pH调节效果; 过度调节pH易导致食品酸味过重、蛋白质变性等品质劣变, 且对非金属依赖型酶效果有限。目前缺乏基于食品基质的精准浓度-效应预测模型, 实际应用多依赖经验试错。外源生物物质调控具有天然来源和高度特异性, 契合“清洁标签”趋势, 但其作用时间较长, 且部分天然提取物的稳定性与增效机制尚不明确。基因层面调控虽能从源头解决问题, 无化学残留, 但研发成本极高, 涉及专业设备与高技术人才; 同时, 欧盟、中国等对基因编辑食品的监管严格, 公众对转基因食品的疑虑尚未消除, 目前更适用于原料品种改良而非终端食品加工。

综上, 不同调控技术的适用场景呈现明确的分异规律。热加工仍是产量大、成本敏感、对热损伤不敏感的常规食品如罐头、传统肉制品的首选; 非热加工因能最大限度保留品质, 更适合热敏性、高附加值的食品如高端果汁等, 但其应用需在设备成本与连续化生产上取得突破; 化学调控因其简便经济, 更适用于中小企业对特定酶的快速干预, 但需以牺牲部分“清洁标签”属性为代价; 外源生物物质是平衡天然属性与加工简便性的有效折中方案, 适用于高端鲜切果蔬、天然油脂等产品; 而基因层面调控则属于育种改良范畴, 适用于从源头解决大宗原料如大豆、谷物的耐储性问题。

5 结论与展望

本文聚焦于物理、化学、生物三大类调控技术, 综述了其调控食品内源酶活性的研究进展, 并分析了各类技术的优势与局限性。同时结合果蔬、谷物、肉类中典型内源酶的结构与功能差异, 进一步明确了靶向调控规律与瓶颈。物理调控技术中, 热加工经济成熟但伴随营养损耗与品质劣变, 非热加工品质保持性好但受限于设备成本与规模化能力; 化学调控操作简便、成本低, 但外源物质引入存在安全性与风味劣变风险; 生物调控天然特异、无化学残留, 但面临作用时效或法规约束。综上, 靶向调控需遵循“因酶施技”原则, 根据食品基质特性与产业化条件, 综合权衡效率、品质、成本与安全, 选择单一或组合调控策略。

面向绿色精准加工与清洁标签发展趋势, 内源酶抑制技术正突破单一工艺局限, 向复合增效、绿色替代、精准调控方向升级。一是非热加工复合化与产业化落地: 针对超高压设备成本高、超声波均一性差、冷等离子体连续性不足等瓶颈, 未来将推进热加工与非热技术的栅栏耦合应用如超声波协同低温热处理钝化果蔬PPO、POD等关键酶, 过热蒸汽联合超高压抑制谷物LOX, 在保留营养风味的同时解决单一技术钝酶不彻底、规模化难的问题。二是化学调控绿色精准化: 逐步替代传统合成抑制剂, 重点开发多酚、黄酮等植物源天然抑制物, 规避有机酸过度酸化、螯合剂残留等品质与安全问题, 适配清洁标签趋势。三是多技术融合的精准调控: 基于不同食品基质与酶种特性建立分食材、分酶种的调控策略, 实现加工参数与原料特性的优化匹配。此外, 依托传感器实时监测酶活动态并联动调控参数的自适应技术如智能靶向控酶已展现出潜力, 但目前仍处于实验室研究阶段, 距离工业化应用尚有距离。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨帆,王金庆,张楠,等.水产品腐败机理及控制方法研究进展[J].食品工业科技,2019,40(5):282-285.
- [3] 王瑞,林江涛,岳清华,等.微波处理对鲜湿面片褐变及其特性的影响[J].现代食品科技,2023,39(9):187-195.
- [4] 吴新怡,孟梓怡,朱吟非,等.超高静压对非浓缩还原杨梅果汁中氧化酶的钝化作用[J].现代食品科技,2022,38(4):155-160.

- [5] ZOU H, XIAO Q, LI G, et al. Revisiting the advancements in plant polyphenol oxidases research [J]. *Scientia Horticulturae*, 2025, 341: 113960.
- [6] SAMPEDRO F, GEVEKE D J, FAN X, et al. Shelf-life study of an orange juice-milk based beverage after PEF and thermal processing [J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(2): S107-112.
- [7] MATHAVARAJ P, MUTHUSAMY V, KATRAL A, et al. Lipoxygenases (LOXs): Will turning off this genetic switch help safeguard the flavor and nutritional quality of stored lipid-rich staple foods? [J]. *Food Chemistry*, 2025, 470: 142637.
- [8] 包玉龙,徐万军,贾世亮,等.肉类嫩度形成机理及嫩化调控研究进展[J].*肉类研究*,2023,37(4):34-40.
- [9] 曲瑞鹏,林奕云,张惠朋,等.超高压辅助酶法嫩化对鹅肉贮藏期品质的影响[J].*现代食品科技*,2025,41(2):167-174.
- [10] ZHOU C Y, PAN D D, CAO J X, et al. A comprehensive review on molecular mechanism of defective dry-cured ham with excessive pastiness, adhesiveness, and bitterness by proteomics insights [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(4): 3838-3857.
- [11] RAUH V M, JOHANSEN L B, IPSEN R, et al. Plasmin activity in UHT milk: relationship between proteolysis, age gelation, and bitterness [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(28): 6852-6860.
- [12] KERPER R, LUDWIG C, DIONISIO G, et al. Characterising peptidase activity of barley endoprotease B in complex technical matrices of the brewing process [J]. *Food Chemistry*, 2026, 516: 149314.
- [13] 辛光斌,许玉娟,李聪,等.热加工对肉糜类制品品质的影响及调控研究进展[J].*现代食品科技*,2025,41(11):348-358.
- [14] XIAO L, HUANG H, LIU W, et al. Integrated transcriptome and proteome analysis reveals the regulatory mechanisms of citric acid and L-cysteine treatment in mitigating browning and senescence of postharvest litchi fruit [J]. *LWT*, 2025, 221: 117604.
- [15] WU Y, LI X, MA X, et al. The effect of non-thermal processing on the fate of pathogenic bacteria and hidden hazardous risks [J]. *Foods*, 2025, 14(13): 2374.
- [16] 桑晓涵,王媛媛,王佳媚,等.低温等离子体激发介质对罗非鱼片脂质氧化和酶活性影响[J].*现代食品科技*,2025,41(5):155-162.
- [17] SCHWARCZ W D, CARNELOCCE L, SILVA J L, et al. Conformational changes in bovine lactoferrin induced by slow or fast temperature increases [J]. 2008, 389(8): 1137-1142.
- [18] MOSCETTI R, RAPONI F, MONARCA D, et al. Effects of hot-water and steam blanching of sliced potato on polyphenol oxidase activity [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(2): 403-411.
- [19] 黄业传,吴照民,张君贤.热处理对猪肉中谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响[J].*食品研究与开发*,2016,37(22):31-34.
- [20] 刘芝君,黄业传,马志鹏.热处理对猪肉中酸性脂肪酶活性的影响[J].*肉类工业*,2016,7:45-48.
- [21] 曹晓杰,孙钦秀,魏帅,等.加热过程中虾肌肉组织蛋白酶 L 的酶活力变化及其动力学[J].*广东海洋大学学报*,2020,40(3):108-113.
- [22] CHRISTENSEN L, ERTBJERG P, AASLYNG M D, et al. Effect of prolonged heat treatment from 48 °C to 63 °C on toughness, cooking loss and color of pork [J]. *Meat Science*, 2011, 88(2): 280-285.
- [23] 刘园,肖广健,陈飞,等.热烫方式对桃微观结构、酶促褐变及相关品质的影响[J].*食品工业科技*,2021,42(20):183-190.
- [24] 李彦丽,丁胜华,高炜,等.热烫方式对百合褐变内源酶及微观结构的影响[J].*食品科学*,2018,39(17):53-60.
- [25] AKBAR U, SINGH J, RASANE P, et al. Effect of different blanching methods on kinetics of physico-chemical, functional properties, and enzyme inactivation in baby corn [J]. *Heliyon*, 2024, 10(17): e36964.
- [26] AGUILÓ-AGUAYO I, OMS-OLIU G, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Flavour retention and related enzyme activities during storage of strawberry juices processed by high-intensity pulsed electric fields or heat [J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(1): 59-65.
- [27] 李慧慧,李超,薛志辉,等.白灵菇多酚氧化酶的特性研究[J].*农业机械*,2013,3:82-84.
- [28] 艾麦提 巴热提.杀菌技术在食品加工中的应用与发展探究[J].*农产品加工*,2024,2:81-83.
- [29] POLAK N, KALISZ S, KRUSZEWSKI B. High-temperature short-time and ultra-high-temperature processing of juices, nectars and beverages: influences on enzyme, microbial inactivation and retention of bioactive compounds [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(19): 8978.
- [30] 钟立煌,严建刚,刘军,等.过热蒸汽灭酶处理对青稞籽粒理化特性和稳定性影响[J].*现代食品科技*,2026,42(1):94-100.
- [31] 张钰欣,贺凯茹,闵捷,等.灭菌乳中耐热微生物和耐热酶残留及其耐热机制研究进展[J].*中国乳品工业*,2026,54(1):67-73.
- [32] HE K, YAO G, WU R, et al. Unraveling gelation in ultra-high-temperature sterilized milk: compositional changes and proteomic characterization [J]. *Food Research International*, 2025, 222: 117680.
- [33] WANG Y, GUO X, MA Y, et al. Effect of ultrahigh temperature treatment on qualities of watermelon juice [J]. *Food Science & Nutrition*,

- 2018, 6(3): 594-601.
- [34] HUANG W, BI X, ZHANG X, et al. Comparative study of enzymes, phenolics, carotenoids and color of apricot nectars treated by high hydrostatic pressure and high temperature short time [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 18: 74-82.
- [35] GAO G, ZHAO L, MA Y, et al. Microorganisms and some quality of red grapefruit juice affected by high pressure processing and high temperature short time [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(10): 2096-2108.
- [36] BALDELLI A, SHI J, SINGH A, et al. Effect of high-pressure on protein structure, refolding, and crystallization [J]. *Food Chemistry Advances*, 2024, 5: 100741.
- [37] ZHENG N, LONG M, ZHANG Z, et al. Behavior of enzymes under high pressure in food processing: mechanisms, applications, and developments [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(27): 9829-9843.
- [38] 张联怡,秦小明,章超桦,等.超高压技术对食品中酶的影响[J].北京农业,2013,15:9-10.
- [39] 蒲莹,王树林.超高压对黑果枸杞汁中多酚氧化酶活性及构象的影响[J].食品研究与开发,2021,42(18):19-25.
- [40] 徐丽娟,王成忠.超高压对毛茛籽中脂肪酶活性的影响[J].江苏调味副食品, 2017,3:28-33.
- [41] AKYOL Ç, ALPAS H, BAYINDIRLI A. Inactivation of peroxidase and lipoxygenase in carrots, green beans, and green peas by combination of high hydrostatic pressure and mild heat treatment [J]. *European Food Research and Technology*, 2006, 224(2): 171-176.
- [42] 侯思涵.超高压对哈密瓜汁中关键酶、氨基酸及理化指标影响的研究[D].石河子:石河子大学,2018.
- [43] WANG R, ZHOU X, CHEN Z. High pressure inactivation of lipoxygenase in soy milk and crude soybean extract [J]. *Food Chemistry*, 2008, 106(2): 603-611.
- [44] ZHU C, JIAO D, SUN Y, et al. Effects of ultra-high pressure on endogenous enzyme activities, protein properties, and quality characteristics of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during iced storage [J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6302.
- [45] 王娟娟,周昌瑜,王冲,等.超声波技术在肉品加工中的应用以及对肉品风味前体物质的影响[J].食品工业科技,2019,40(16):320-323, 335.
- [46] 周红生,许小芳,王欢,等.超声波灭菌技术的研究进展[J].声学技术,2010,29(5):498-502.
- [47] FU X, BELWAL T, CRAVOTTO G, et al. Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 60: 104726.
- [48] 胡芳,董旭,史长伟,等.超声波强化木质纤维素酶解的研究进展[J].生物技术通报,2021,37(10):234-244.
- [49] WANG L, LI J, TENG S, et al. Changes in collagen properties and cathepsin activity of beef *M. semitendinosus* by the application of ultrasound during post-mortem aging [J]. *Meat Science*, 2022, 185: 108718.
- [50] ERCAN S S, SOYSAL C. Effect of ultrasound and temperature on tomato peroxidase [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(2): 689-695.
- [51] 郑炯,龚瑜,曾瑞琪,等.超声波处理对西瓜汁品质的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(10):168-174.
- [52] 刘梦培,孙文文,韩卫娟,等.超声波处理对采后甜柿品质及相关酶活性的影响[J].食品工业科技,2021,42(17):301-307.
- [53] IQBAL A, MURTAZA A, HU W, et al. Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 117: 170-182.
- [54] GONÇALVES J, PEQUENO J, DIAZ I, et al. Killing Two Crises with One Spark: Cold Plasma for Antimicrobial Resistance Mitigation and Wastewater Reuse [J]. *Water*, 2025, 17(8): 1-15.
- [55] 相启森,刘秀妨,刘胜男,等.大气压冷等离子体技术在食品工业中的应用研究进展[J].食品工业,2018,39(7):267-271.
- [56] DU Y, YANG F, YU H, et al. Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: a systematic review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(5): 4402-4421.
- [57] PANKAJ S K, MISRA N N, CULLEN P J. Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 19: 153-157.
- [58] LAIKA J, TATASCIORIO S, DE FLAVIIS R, et al. Impact of surface dielectric barrier discharge cold atmospheric plasma on quality and stability of fresh-cut iceberg lettuce [J]. *LWT*, 2024, 211: 116941.
- [59] CHEN X, ZOU Y, HAN M, et al. Solubilisation of myosin in a solution of low ionic strength l-histidine: significance of the imidazole ring [J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 42-49.
- [60] CHAKRABORTY S, DHAWAN A, SILIVERU K. Inactivation of polyphenol oxidase and peroxidase in whole wheat flour using

- atmospheric cold plasma treatment: kinetics, mechanism, and impact on its compositional properties [J]. Food Chemistry, 2025, 495(Pt 2): 146474.
- [61] KHOSHKALAM POUR A, KHORRAM S, EHSANI A, et al. Atmospheric cold plasma effect on quality attributes of banana slices: its potential use in blanching process [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 76: 102945.
- [62] VAJANAPANICH P, NEARMNALA P, PARKBHORN J, et al. Catalytic residue reprogramming enhances enzyme activity at alkaline pH via phenolate-mediated proton transfer [J]. ACS Synthetic Biology, 2025, 14(9): 3612-3623.
- [63] STOFFEL F, PAPP M, GIL-GARCIA M, et al. Enhancement of enzymatic activity by biomolecular condensates through pH buffering [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 6368.
- [64] CHEN Y, SHI Y, MING D, et al. Reversible peptide tagging system to regulate enzyme activity [J]. Cell Reports Physical Science, 2025, 6(3): 102462.
- [65] 邹立强,刘伟,刘军平等.柠檬酸对多酚氧化酶相对酶活性、动力学和褐变参数的影响[J].食品科学,2012,33(17):141-144.
- [66] IZZAH K N, AWANG Y, DING P, et al. Antioxidant, Polygalacturonase, Pectin Methylesterase and Polyphenol Oxidase Activities of Fresh-Cut Wax Apple (*Syzygium samarangense*) Treated with Organic Acids [J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2015, 14(2): 72-77.
- [67] PINTO M S T, SIQUEIRA F P, OLIVEIRA A E A, et al. A wounding-induced PPO from cowpea (*Vigna unguiculata*) seedlings [J]. Phytochemistry, 2008, 69(12): 2297-2302.
- [68] ZHANG H, ZHANG F, WU F, et al. Purification and Characterization of Endogenous α -Amylase from Glutinous Rice Flour [J]. Foods, 2025, 14(10): 1679.
- [69] 陈存坤,张慧杰,纪海鹏,等.臭氧精准处理提高采后草莓抗氧化酶活性和酚类物质含量[J].农业工程学报,2019,35(10):274-280.
- [70] LI T, WANG Z, WANG Y, et al. Ozone treatment maintains the sweetness and volatile odor of sweet corn by enhancing antioxidant capacity and resistance to disease [J]. Postharvest Biology and Technology, 2026, 231: 113947.
- [71] GHAEDI E, ABEROMAND M, RESHADATIAN M, et al. Effect of metal ions (K^+ , Zn^{++} , Na^+) on mannosidase ammonium sulfate precipitate from kiwi fruit [J]. Biochemical and Cellular Archives, 2014, 14(2): 439-441.
- [72] GUAN Y, LU S, SUN Y, et al. Tea polyphenols inhibit the occurrence of enzymatic browning in fresh-cut potatoes by regulating phenylpropanoid and ROS metabolism [J]. Plants, 2024, 13(1): 125.
- [73] SHI H, GUO J, YANG X, et al. Production of unsaturated fatty acids in an internal-ripened cheese [J]. Food Research International, 2026, 227: 118308.
- [74] LE Y Y. Inhibitory effect of selected spices on polyphenol oxidase from iceberg lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Carpathian Journal of Food Science and Technology, 2024, 16(2): 125-135.
- [75] KRAMER M, REDENBAUGH K. Commercialization of a tomato with an antisense polygalacturonase gene: the Flavr SavrTM tomato story [J]. Euphytica, 1994, 79(3): 293-297.
- [76] BENNIS N X, BIESEMAN J, DARAN J M G. Unlocking lager's flavour palette by metabolic engineering of *Saccharomyces pastorianus* for enhanced ethyl ester production [J]. Metabolic Engineering, 2024, 85: 180-193.
- [77] ISOGAI S, NISHIMURA A, TAKAGI H. Breeding of yeast strains with intracellular amino acid accumulation for value-added alcoholic beverages [J]. FEMS Yeast Research, 2025, 25: foaf065.
- [78] KUMAR R R, GOSWAMI S, T. V, et al. Rogue Enzymes at Work—Unraveling the Interplay Between Lipase and Lipoxygenase in Pearl Millet Flour for Solving the Problem of Rancidity [J]. Journal of Food Science, 2025, 90(11): e70689.