

## 电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的研究进展

王文月, 李 璇, 胡佳星, 毕金峰

## Review of the Research Progress of the Electromagnetic Field Treatment Technology in Fruit and Vegetable Preservation and Processing

WANG Wenyue, LI Xuan, HU Jiaying, and BI Jinfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040169>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 电磁场保鲜对贵州黑山羊品质的影响

Effects of Electromagnetic Field Preservation on the Quality of Guizhou Black Goat

食品工业科技. 2023, 44(11): 379-387 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070324>

#### 生物保鲜剂结合物理技术在果蔬保鲜中应用的研究进展

Progress of Bio-preservatives Combined with Physical Technologies in Fruits and Vegetables Preservation

食品工业科技. 2021, 42(12): 383-388 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070060>

#### 柠檬烯抑菌机理及其在果蔬保鲜中应用的研究进展

Research Progress on the Bacteriostatic Mechanism of Limonene and Its Application in Fruit and Vegetable Preservation

食品工业科技. 2021, 42(14): 414-419 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080115>

#### 高压静电技术及其在肉类和果蔬保鲜中的应用进展

Research Progress in the Application of High Voltage Electrostatic Technology in Meat, Fruit, and Vegetable Preservation

食品工业科技. 2023, 44(17): 447-453 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110063>

#### 三种熏蒸剂在果蔬保鲜中应用的研究进展

Research Progress on the Application of Three Fumigants in Fruit and Vegetable Preservation

食品工业科技. 2020, 41(4): 322-327,332 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.055>

#### 大气压冷等离子体在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展

Research Progress of Atmospheric Cold Plasma in Fresh-cut Fruits and Vegetables Preservation

食品工业科技. 2021, 42(1): 368-372 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030152>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王文月, 李旋, 胡佳星, 等. 电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 398–406. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040169

WANG Wenyue, LI Xuan, HU Jiaxing, et al. Review of the Research Progress of the Electromagnetic Field Treatment Technology in Fruit and Vegetable Preservation and Processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 398–406. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040169

· 专题综述 ·

# 电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的研究进展

王文月, 李 旋, 胡佳星, 毕金峰\*

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

**摘 要:** 电磁场处理是一种新型的食品非热加工处理方法, 可应用于果蔬保鲜加工中以保持鲜活品质。电磁场处理可以延缓果蔬成熟, 并具有保鲜、杀菌、消毒和防腐作用。适宜的电磁场处理能够在不损害果蔬感官品质的前提下, 有效保持其营养成分, 并延长其在常温下的货架期。本文主要综述了静磁场、交变磁场、脉冲磁场等电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的应用, 总结了电磁场对果蔬物料采后代谢、细胞膜完整性、关键代谢酶及相关转录过程的影响机制, 揭示该技术对保持果蔬品质特性的内在机理。未来电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的应用研究, 应结合果蔬原料的特性开发电磁场与其它物理场的联合处理技术, 实现对果蔬的精准、高效率 and 低能耗加工处理, 以满足消费者对高品质果蔬制品的需求。

**关键词:** 电磁场处理技术, 果蔬, 保鲜, 加工, 代谢机理

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)06-0398-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040169



本文网刊:

## Review of the Research Progress of the Electromagnetic Field Treatment Technology in Fruit and Vegetable Preservation and Processing

WANG Wenyue, LI Xuan, HU Jiaxing, BI Jinfeng\*

(Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Electromagnetic field treatment is a new non-thermal food processing method, which can be used in the preservation and processing of fruits and vegetables to maintain fresh quality. Electromagnetic field treatment can not only delay the ripening of fruits and vegetables, but also have the functions of preservation, sterilization, disinfection and antiseptis, etc. The fruits and vegetables treated by appropriate electromagnetic field can maintain their nutritional and sensory quality well, and prolong their shelf life at room temperature. This paper mainly reviews the application of static, alternating, and pulsed magnetic field treatment technologies in fruit and vegetable preservation and processing, summarizes the influence mechanism of electromagnetic field on postharvest metabolisms, cell membrane integrity, key metabolic enzymes and related transcription processes of fruit and vegetable material, and reveals the internal mechanism of this technology on maintaining fruit and vegetable quality characteristics. Future research on the application of electromagnetic field in the preservation and processing of fruits and vegetables should consider the characteristics of fruits and vegetables to develop the combined treatment technologies of electromagnetic field and other physical fields, so as to achieve precise processing, high efficiency, low energy consumption, and meet consumer demands for high-quality fruits

收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 国家现代苹果产业技术体系 (CARS-27); 中国农业科学院农业科技创新工程 (CAAS-ASTIP-2023IFST)。

作者简介: 王文月 (1996-), 女, 博士研究生, 研究方向: 果蔬加工与品质调控, E-mail: 15238646131@163.com。

\* 通信作者: 毕金峰 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬食品制造与营养科学, E-mail: bjfcaas@126.com。

and vegetables products.

**Key words:** electromagnetic field treatment technology; fruit and vegetable; preservation; processing; metabolic mechanism

随着电磁学的不断发展,果蔬加工中电磁技术的应用也越来越深入。电磁场是由带电物体产生的一种物理场,包括电场和磁场,两者相互联系、互相依存。如图 1 所示,电场和磁场随时间变化,相互影响,形成了电磁场。电磁场可以通过带电粒子的不规则运动或电流的强弱变化产生,以光速向四周传播,形成了电磁波<sup>[1]</sup>。根据电磁波的频率,可以分为电离和非电离辐射。电离辐射包括 X-射线和  $\gamma$ -射线;非电离辐射包括无线电波、微波、红外线、可见光和紫外线。电磁场根据强度变化与时间的关系,可以分为静磁场和动磁场。静磁场由恒定电流和静止永磁铁产生,大小和方向不随时间变化;动磁场由交变电流或运动永磁铁产生<sup>[2]</sup>。目前在食品加工领域研究较多的电磁场技术包括静磁场、交变磁场和脉冲磁场等。

电磁场处理技术作为一种非热加工技术,具有安全高效、操作简单、绿色环保等优点。研究表明,该技术可以延长果蔬货架期<sup>[3]</sup>,减少果蔬冷冻中冰晶对细胞的损伤<sup>[4]</sup>,实现低温下微生物的高效灭活<sup>[5]</sup>。与化学保鲜、常规冷冻和高压高热处理技术相比,电磁场处理技术无添加、效果好、安全性高,在保持果蔬食品品质方面具有很大的优势。

果蔬作为鲜活农产品普遍具有生物磁性,磁场改变会影响组织内的电荷分布,进而影响正常的能量传递和物质交换,果蔬组织自身的磁场、外加磁场和环境磁场都会引起其产生生物磁效应。不同形式和强度的磁场对不同果蔬组织会产生不同的效应,这是

由于果蔬组织内的能量传递和物质交换都与其体内的电荷运动相关,外界磁场的变化必然影响生物体的各种生物效应。研究人员认为电磁场处理产生的生物效应缘于其在生物代谢、组织、细胞和大分子等不同层次造成了影响<sup>[6]</sup>。电磁场在果蔬保鲜和加工领域中的应用研究表明,磁场处理会引起果蔬细胞膜等细胞结构的变化,从而在整体上影响果蔬的生理代谢过程<sup>[7]</sup>。此外,磁场对果蔬中酶的活性、结构、反应动力学皆会产生不同程度的影响<sup>[8]</sup>,还通过引起机体 DNA 和 RNA 中的氢键发生变化,导致部分遗传物质的改变<sup>[9]</sup>。因此,该技术在果蔬杀菌、杀虫、保鲜和防腐等方面的应用效果显著,具有巨大应用潜力<sup>[10-11]</sup>。不同电磁场处理技术在果蔬食品保鲜、冷冻、杀菌、绿色加工中发挥着不同的优势,具有不同特点。本文对电磁场处理技术在果蔬保鲜加工领域中的应用进行了系统梳理,综述了该技术在果蔬保鲜和绿色制备等方面的研究和应用现状,在果蔬组织、细胞、分子等层面上的作用机理,以及在果蔬加工品质保持和效率提升方面的问题,以期电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中进一步的研究与应用提供参考。

## 1 不同电磁场处理技术在果蔬保鲜加工中的应用

### 1.1 静磁场

静磁场为恒定电流(直流)或静止永磁体产生的磁场,大小和方向都不随时间改变,也称为恒定磁

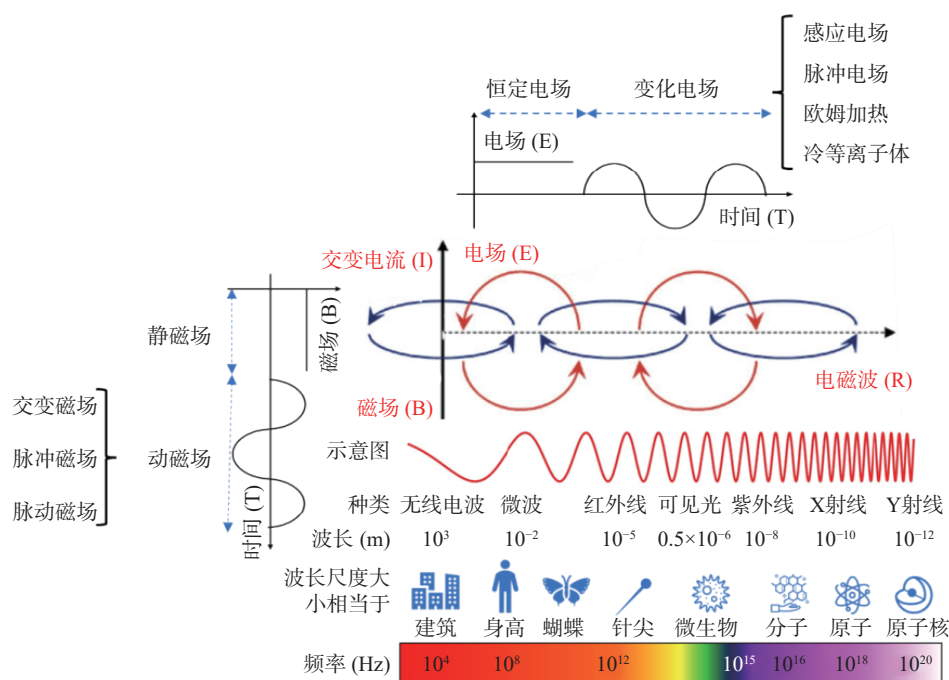


图 1 电磁场处理技术分类

Fig.1 Classification of electromagnetic field treatment technologies



场。静磁场可以通过影响果蔬细胞内部带电粒子的运动,改变生物酶活性,从而影响其代谢活动<sup>[12]</sup>。静磁场在果蔬保鲜以及辅助干燥等方面有较好的应用潜力。

静磁场在果蔬保鲜方面效果显著,尤其对于高含水量果蔬的持水能力有显著提高,并可以很好地保持果蔬的维生素C含量和硬度<sup>[3]</sup>。在静磁场对草菇冷藏保鲜的研究中发现,静磁场可以显著保持草菇的感官和营养品质<sup>[13]</sup>。同时,静磁场的强度会影响果蔬的保鲜效果。有研究发现,低强度静磁场可以抑制菠菜的呼吸作用,达到对菠菜的保鲜效果。但当磁场强度大于60Gs时,磁场则会加速菠菜中营养物质的消耗,不利于其保鲜贮藏<sup>[14]</sup>。静磁场联合其他处理方法,可以增强磁场效应,得到更好的处理效果。Zhao等<sup>[6]</sup>提出了一种静磁场联合冷激水处理的方法用于黄瓜保鲜,该方法可以加快黄瓜组织的冷却速率,降低黄瓜的失重率,减缓黄瓜损伤,提高抗氧化酶活性,对黄瓜的理化性质表现出积极的作用。

果蔬的冷冻保藏也是保鲜的一种常见方法,冷冻通过固定果蔬中的游离水,有助于抑制微生物的生长,减缓酶和化学反应,从而延缓果蔬品质劣变的速度。在果蔬冷冻过程中,静磁场可以降低果蔬中冰晶成核的临界半径和临界功,提高冰晶的均相成核率,并对水冷冻过程产生附加过冷度效应,这些效应与磁场强度成正比关系<sup>[4]</sup>。宋健飞等<sup>[15]</sup>的研究发现,磁场处理可以降低胡萝卜冻结相变过程中的冰晶体积和结晶温度,提高结晶速率,并保持细胞膜的完整性,从而减少胡萝卜的品质损害。同时,静磁场辅助冻结洋葱细胞的实验也表明,磁场辅助冷冻能有效维持细胞形态,降低细胞损伤率,且随磁场强度的增强,相变时间缩短,过冷度增加<sup>[16]</sup>。谭银莹<sup>[17]</sup>的研究发现,磁场辅助冻藏的牛油果的融化焓较低,减缓了长时间解冻对牛油果品质的影响。此外,磁场处理还可以降低牛油果中的水流动性,抑制冰晶生长,显著提高牛油果泥的冷冻稳定性和贮藏特性。Tang等<sup>[18]</sup>研究了静磁场和不同强度的交变磁场对樱桃和蓝莓<sup>[19]</sup>冷冻的影响,与无磁场作用的对照组相比,这两种磁场在冷冻过程中能够更好地保留原料中的水分,使形成的冰晶分布更加均匀,显著提高了原料的冷冻品质。静磁场在果蔬解冻中也具有重要的应用价值。研究表明,当静磁场强度为40mT、解冻时间为144min、解冻温度为19℃时,该条件下解冻后的西梅色泽、质地最佳,感官品质最好<sup>[20]</sup>。使用静磁场对番茄冷冻特性和品质影响的研究结果表明,磁场不仅可以缩短冷冻时间,降低冰点和延长过冷度,还可以在解冻过程中保持较高的新鲜度和质地特征<sup>[21]</sup>。

此外,静磁场在果蔬加工中也可作为辅助干燥处理的手段。Nuroğlu等<sup>[22]</sup>对榛子、无花果、辣椒和葡萄样品进行了静磁场辅助烘箱干燥实验,结果表明采用静磁场辅助干燥的样品中未检出真菌毒素,而传

统的干燥方法会导致辣椒样品的严重污染。

综上所述,静磁场在较低的磁场强度下可以影响果蔬细胞内的酶活性,抑制呼吸作用,减缓果蔬的代谢,从而起到保鲜的作用。同时,磁场还可以改变水的性质,缩短相变时间,减小并使冰晶体积均匀,提高果蔬的冷冻保藏特性。由于磁场辅助冷冻果蔬的优势,即使在解冻过程中,果蔬仍能保持较高的营养价值和感官品质。此外,该技术在辅助果蔬食品干燥方面也具有广阔的开发前景。目前应用于果蔬保鲜加工领域的静磁场强度一般在5~50mT之间。然而,静磁场的研究仍存在一些问题,如加工工艺参数和参数单位的不一致,这使得不同研究之间的加工参数比较受到直接影响。因此,需要在静磁场应用中建立统一的加工参数标准。此外,将静磁场与其他技术手段联合使用,可以更好地提高处理效果,缩短处理时间。例如,静磁场与超声波、微波等技术相结合,可以在保持食品品质的同时,更有效地杀灭微生物、去除污染物<sup>[23-25]</sup>。然而,静磁场联合技术的细节和标准还有待进一步明确和规范。因此,未来的研究需要进一步探索静磁场联合其他技术手段处理的机制和效果,建立统一的处理参数标准,完善静磁场联合技术的具体操作方法和标准流程,以达到更好的应用效果和推广价值。

## 1.2 动磁场

1.2.1 交变磁场 交变磁场是指强度和方向规律变化的磁场。交变磁场作用下,细胞膜的极性磷脂双分子层排列更加紧密,细胞膜表面的水分子结构也受到影响。此外,细胞膜中的极性带电离子(如K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>)在交变磁场的作用下,会引起膜电压的改变,导致细胞膜的电导率和通透性降低,呼吸作用减慢,从而抑制电解质的外渗<sup>[26]</sup>。基于此效应,交变磁场在果蔬保鲜中表现出积极的影响。

不同种类的果蔬对于交变磁场的最适强度条件不同。例如,在对鲜切草莓进行交变磁场处理的过程中,以多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)活性、V<sub>C</sub>含量、还原糖含量和pH为评价指标,发现磁场强度为4.22A/m时,草莓保鲜效果最佳<sup>[27]</sup>。地梢瓜在强度为1.28mT的交变磁场下作用15min后,可滴定酸、可溶性固形物含量保持稳定,呼吸强度、硬度、膜渗透率显著降低,软化速度减缓,外观品质保持良好,此条件下地梢瓜的保鲜效果最好<sup>[28]</sup>。此外,交变磁场也有利于减缓果实低温贮藏过程中的冻害现象。在葡萄<sup>[26]</sup>和香蕉<sup>[29]</sup>的低温贮藏实验中发现,适宜的磁场强度可以有效降低果实组织液的相变潜热和结晶温度,有利于葡萄和香蕉的低温贮藏。同时,研究表明,80Gs强度的交变磁场可以显著提高樱桃番茄在贮藏期间的抗氧化酶活性,减少果实的失重,从而保持番茄的良好品质<sup>[30]</sup>。交变磁场与其他贮藏方法联合使用,可以显著提高果蔬的贮藏特性。黄利强<sup>[31]</sup>将气调贮藏与磁场处理相结合,表明磁场强

度为 1 A 时,能够显著降低葡萄的失重率,保持  $V_C$  含量、可滴定酸含量和呼吸强度。

交变磁场对果蔬杀菌也具有显著效果。研究发现,2 mT 交变磁场处理可以通过降低贮藏期间菌落总数、酵母菌和霉菌的增殖速率来延长鲜切苹果的货架期<sup>[32]</sup>。Lü等<sup>[33]</sup>研究了交变磁场对鲜切苹果冷藏过程中酶促褐变、理化性质和微生物增殖的抑制作用,结果显示,交变磁场不仅可以抑制微生物生长,还可以通过影响酶的三级结构降低 PPO 和过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性,从而抑制苹果酶促褐变,保持鲜切苹果良好的感官品质。

与静磁场相似,交变磁场辅助果蔬冷冻,在缩短冷冻时间、减小冰晶体积、减少新鲜和鲜切果蔬品质损失等方面具有潜在优势<sup>[34]</sup>。Wang 等<sup>[35]</sup>研究了不同方向施加交变磁场对冷冻牛油果泥贮藏过程中理化性质的影响。与传统冷冻工艺相比,应用交变磁场可以减少失重,增加可溶性固形物,同时具有更好的质地特征和感官品质。

交变磁场是一种应用于果蔬保鲜的新技术。利用交变磁场的作用,可以有效延长果蔬的保质期,减少食品浪费,提高食品品质。此外,交变磁场还可以用于果蔬的灭菌和冷冻,通过调节磁场的参数,杀灭果蔬中的微生物,并降低果蔬在冷冻过程中的品质损伤。当磁场强度较低时,交变磁场线圈在使用过程中会产生微弱的热效应,这有助于减缓果实在低温贮藏时的冷害效应。然而,磁场强度过高会导致线圈过热,影响果蔬的感官和营养品质,故磁场强度一般控制在 1~10 mT 之间。综上所述,交变磁场技术具有广泛的应用前景,但应注意适当控制磁场强度,以保证食品的品质和安全。

**1.2.2 脉冲磁场** 脉冲磁场的强度和方向可以根据不同需求进行调节,呈间歇式出现<sup>[36]</sup>。目前,该技术已应用于果蔬加工研究中,实现了有效的食品杀菌保鲜。其作用机理是通过强脉冲磁场引起果蔬中微生物细胞跨膜电位、感应电流、带电粒子、洛伦兹力、离子能量等变化,从而破坏细胞结构,影响其正常生理活动,导致微生物死亡<sup>[37]</sup>。因此,脉冲磁场对果蔬加工制品的杀菌效果明显。

高梦祥等<sup>[38]</sup>研究表明,磁场强度和脉冲数是影响杀菌效果的关键因素。通过调节磁场强度和脉冲数,可有效降低菌落总数和大肠杆菌数量,从而达到产业上的生产标准,提高灭菌效率。吴平等<sup>[39]</sup>使用脉冲磁场杀菌设备对格氏李斯特菌进行杀菌处理,发现存在生物学窗口效应,且  $Na^+$  对脉冲磁场的杀菌效果有协同作用,pH 对杀菌效果也有影响。唐伟强等<sup>[40]</sup>发现,对于牛奶、桔子汁和水三种杀菌介质,磁场强度与杀菌效果的关系以及最佳杀菌场强均不同。低强度脉冲磁场能有效抑制桔子汁中的细菌的生长,与单独使用脉冲磁场或紫外辐射相比,这两种方法联合并没有显著提高杀菌效果。金江涛等<sup>[41]</sup>的

研究表明,草莓汁的杀菌效果与脉冲磁场强度和脉冲数呈线性正相关。由于霉菌和酵母菌对磁场的耐受性强,草莓又容易受到这两种菌的污染,因此草莓杀菌通常需要较高的磁场强度。目前的研究表明,在室温条件下,当磁场强度大于 17.3 T 且脉冲数不少于 12 h 时,可以实现草莓汁生产标准的要求。有研究发现,脉冲磁场还可通过破坏细胞膜、增加细胞膜通透性、降低细胞内分子(蛋白质、ATP 和 DNA)的含量、抑制 ATP 酶活性,对果蔬汁中的大肠杆菌 O157:H7 产生抑菌作用<sup>[42]</sup>。Lin 等<sup>[5]</sup>研究了脉冲磁场联合山苍子精油处理果蔬汁的杀菌效果,发现这种协同处理可以有效地将蔬菜汁中的细菌数量控制在很低的水平。

此外,脉冲磁场技术在果蔬加工中还有其他应用。如脉冲磁场可以通过抑制 PPO、POD 和果胶甲基酯酶(Pectin Methylesterases, PME)的活性增强果汁的颜色稳定性<sup>[43]</sup>。同时,与传统的热处理技术相比,脉冲磁场技术对果汁的营养品质无影响,可作为一种高效非热处理技术应用于果蔬汁加工过程中<sup>[44]</sup>。脉冲磁场同样可应用于果蔬冷冻。在一定的磁场强度范围内,该技术可降低水分和果蔬组织液的冰点温度,影响水分和果蔬组织液的冷冻动力学和物理性质,如表面张力、光学性质、热力学性质、分子结构等<sup>[45]</sup>。

综上,由于脉冲磁场对细胞膜结构具有显著破坏作用,因此在果蔬加工领域,该技术大多应用于果蔬杀菌。此外,脉冲磁场在稳定果蔬汁颜色和改善冷冻果蔬产品品质方面具有潜在的应用前景。

**1.2.3 振荡磁场** 除了上述两种磁场技术,包括振荡磁场在内的动态磁场在果蔬方面的应用研究也有所涉及。振荡磁场是由稳恒磁场和交变电流或者交变磁场复合而成的一种电磁场。振荡磁场可以对酵母菌和霉菌的生存能力产生显著影响,处理后能够有效降低微生物细胞的存活率。且该技术还具备作为微生物危害控制的栅栏因子的潜力,可进一步开发并应用于生产领域。Kosuke 等<sup>[46]</sup>的研究结果表明振荡磁场可以通过引起水分子振动防止冰晶成核,使过冷态得以保持,这在很大程度上有助于维持果蔬的新鲜度。Her 等<sup>[47]</sup>将鲜切蜜瓜置于振荡磁场下过冷贮藏了 21 d, Kang 等<sup>[48]</sup>将鲜切菠萝置于振荡磁场下过冷贮藏了 14 d,这种处理显著抑制了冰核形成,避免了由于冰晶引起的细胞损伤。

## 2 电磁场处理对果蔬品质影响的机理

### 2.1 电磁场处理对代谢的影响

呼吸代谢、能量代谢和活性氧代谢一起构成了果蔬组织的生理代谢网络系统,该系统与果蔬品质劣变的发生密切相关<sup>[49]</sup>。呼吸代谢可以为植物细胞的各种生理活动提供能量,但是呼吸代谢失衡会引起大量活性氧自由基(Reactive Oxygen Species, ROS)的积累,造成果蔬细胞的氧化损伤,导致果蔬劣变反应



的发生。能量代谢通过调控果蔬细胞的呼吸强度来维持能量平衡,若能量亏损,呼吸作用将会加强,ROS 加速生成,果蔬发生劣变反应。ROS 作为活性氧代谢中的重要介质,适度积累有助于维持细胞内 ROS 稳态,减少细胞氧化损伤;过量积累则会导致细胞膜氧化损伤,导致线粒体结构和功能障碍,从而影响呼吸和能量代谢<sup>[46]</sup>。研究表明,磁场处理能够直接或间接影响果蔬细胞结构的变化,并从整体上影响果蔬生理代谢进程,这种影响机制非常复杂。Reina 等<sup>[7]</sup>的研究表明,细胞结构的变化会影响果蔬整体生理代谢过程。而磁场处理会引起果蔬细胞超微结构的变化,经磁场处理后的细胞线粒体嵴数、糙面内质网和高尔基体数量增加,这些变化为细胞的生理代谢提供了结构基础<sup>[50]</sup>。磁场处理还可以通过抑制果实的呼吸作用,降低对细胞膜的破坏,并通过影响酶活调节生理代谢活动,达到对果蔬的保鲜效果。在对沙生地梢瓜进行交变磁场处理的研究中,发现处理时间为 15 min 时,果实的呼吸强度、硬度、膜渗透率均有所降低,此时地梢瓜的软化速度减缓,外观品质保持较好<sup>[28]</sup>。

## 2.2 电磁场处理对细胞膜的影响

生物膜是果蔬组织细胞完成信息传递和能量转换等生理功能的必要条件<sup>[51]</sup>。细胞膜能够维持细胞内微环境的完整性,保证细胞正常的生理代谢活动。当果蔬遭受损伤,细胞膜氧化降解,导致细胞结构的区域化改变,正常细胞功能丧失,并引发酶促褐变、异味产生和愈伤呼吸等多种次级代谢反应<sup>[52]</sup>。

电磁场处理可以通过影响细胞膜形态或结构干预细胞膜的功能。这种影响导致果蔬生理生化反应发生变化,进而影响与果蔬组织电化学反应相关的各种过程<sup>[9]</sup>。Tenuzzo 等<sup>[53]</sup>的研究证明,6 mT 静磁场对不同类型细胞的形态和生物膜具有强烈且可复现的影响,且细胞形状和表面的变化与磁场作用时间密切相关,推测磁场作用会产生或改变细胞表面微弱的电子或离子电流,引发膜蛋白的迁移,从而影响膜结构。磁场还会引起细胞表面产生泡状突起或薄片状的微绒毛,这可能是对于磁场的一种应激反应<sup>[54-55]</sup>。马海乐等<sup>[56]</sup>使用脉冲磁场处理 *S. aureus* 细胞,观察  $\text{Ca}^{2+}$  跨膜行为,发现胞内  $\text{Ca}^{2+}$  浓度显著升高,而细菌数量显著减少。姚学玲等<sup>[57]</sup>使用的生物体细胞模型实验证明,即使是低强度的脉冲电磁场也会改变细胞膜的通透性,从而影响细胞膜两侧的离子浓度平衡和细胞的遗传特性,而当脉冲电磁场强度足够大时,会引起细胞膜的击穿。

## 2.3 磁场处理对酶的影响

酶活性与细胞的结构和功能密切相关。C、H、O、N 和 S 是构成蛋白质和酶的主要元素,少数微量金属元素,如 Fe、Mn、Co、Cu、Zn、Mo 等通常作为其活性或结构中心,对于维持蛋白质的结构、功能或稳定性至关重要。磁场可以通过影响生物体内金属

酶的结构和分布,改变酶和蛋白质的活性;还可以通过作用于酶使其产生生物大分子的共轭结构,使二硫桥键的自由电子发生跃迁<sup>[8]</sup>;此外,维系酶空间结构的次级键的作用力通常较弱,容易受到环境的影响,当酶处于磁场环境时,酶的构象会发生改变<sup>[58]</sup>。研究表明,水经磁化后,其沸点、电导率、溶解度等理化性质会发生改变,与之结合的水分子的变化也会影响酶的构象<sup>[59]</sup>。

目前,磁场对酶的影响研究主要集中在酶的活性、结构和酶促反应动力学三个方面。脉冲磁场对辣根 POD 活性影响的研究发现,当磁场强度小于 1 T 时,有利于促进酶活,大于 1 T 时,则会抑制酶活,磁场强度 4.5 T、温度 40 °C、脉冲数 40 时,POD 酶活降低了 90%<sup>[60]</sup>。陈仁菊等<sup>[61]</sup>的研究表明脉冲磁场能够引起牛奶粗酶液的三级结构变化,并且显著改变牛奶中乳过氧化物酶的二级结构。PPO 是存在于生物体内的一种铜结合酶,是果蔬发生酶促褐变的主要反应酶之一。高强度脉冲磁场对 PPO 具有显著灭活效果,在磁场强度 45 T、脉冲数 40 时,酶的灭活率最高可达 93.1%<sup>[62]</sup>。李香勇等<sup>[63]</sup>用磁场对 PPO 进行不同的强度及持续时间的处理发现,处理条件为 1.6 T、15 min 时,磁场处理可以显著促进 PPO 活性。刘勇<sup>[64]</sup>的研究表明磁场对于酶的影响呈现出一种多极值现象,这是由于酶活与酶的空间结构密切相关,不同强度的磁场对酶的  $\alpha$  螺旋、 $\beta$  折叠、 $\beta$  转角及无规卷曲的影响程度不同,且随着磁场强度的增加,酶的各二级结构单元之间发生了相互转化<sup>[65]</sup>。

## 2.4 磁场处理对基因转录的影响

果蔬组织中越来越多的遗传基因信息随着转录组学、基因组学和生物信息学等分析检测技术的快速发展,逐渐被挖掘出来,这些信息在果蔬的生长发育、物质代谢以及逆境响应等诸多过程中具有十分重要的意义。DNA 和 RNA 的三维结构主要由氢键等次级键维持。磁场不仅可以干扰化学键之间的弱相互作用,还会影响 DNA 结构中具有导电性的碱基对,从而导致部分遗传物质发生改变<sup>[9]</sup>。此外,磁场还可以通过影响 DNA 和蛋白质周围的溶液影响基因转录过程<sup>[64]</sup>。在磁场处理对地梢瓜保鲜的研究中,通过调控  $\beta$ -葡萄糖苷酶和多聚半乳糖醛酸酶等细胞壁降解酶相关基因的表达,有效降低了细胞壁降解酶的活性,达到了对地梢瓜的保鲜效果<sup>[28]</sup>。Phillips 等<sup>[66]</sup>发现磁场能引起染色体构象变化和微核形成,DNA 损伤会引起细胞功能减弱甚至死亡。对枯草芽孢杆菌施加强度为 3 T、脉冲数为 30 的脉冲磁场时,可以直接作用于枯草芽孢杆菌的 DNA,造成 DNA 损伤,引起细胞死亡<sup>[67]</sup>。Luceri 等<sup>[68]</sup>的研究表明,磁场强度是影响基因发生突变的主要因素,低强度电磁场还可以通过影响细胞的生理生化过程,例如自由基代谢,间接改变 DNA 的结构。基于此,磁场处理能够通过影响 DNA 的结构抑制微生物的生存和增殖,

这一特性可以有效应用于果蔬杀菌研究中。

### 3 结论与展望

电磁场处理技术作为一种环保的物理处理技术,在果蔬领域的研究和应用主要集中在果蔬保鲜、钝酶和杀菌等方面。然而,目前电磁场处理对果蔬组织代谢、细胞结构、酶活性和基因转录等方面的作用机理尚未得到深入研究,因此该技术在果蔬加工中的应用仍有很大的潜力有待充分挖掘。我们仍需进一步研究不同果蔬原料在磁场作用下加工品质形成的生理生化机制以及磁场在果蔬加工中的应用。具体而言,以下几个方面需要进一步深入研究。

a.磁场应用于在果蔬保鲜和加工中时,参数设定的一般机制和规律需要进一步明确。针对不同的处理原料,磁场强度等条件参数存在较大差异,并且实验结果的一致性差和复现性低,需要深入研究磁场技术的作用原理和机制,优化升级磁场设备,确定适用于各个领域果蔬加工的磁场加工技术参数,以实现稳定、可重复的效果。这将有助于推广磁场技术在果蔬食品加工领域的应用。

b.磁场对果蔬保鲜和加工更深层次的作用机制有待进一步挖掘。尽管磁场技术在果蔬食品中的应用已经有丰富的研究,但对处理对象的影响机制,尤其是在分子层面上的研究仍相对匮乏。磁场对果蔬加工品质的影响因果关系复杂,其生物学效应从多方位、多层次同时作用,共同影响着整个生物体的新陈代谢,表现出综合效应的结果。因此,有必要建立完善的理论模型和合适的实验模型,以进一步探究磁场对果蔬加工品质形成的影响机制。

c.适宜强度的磁场联合其他物理场技术在果蔬处理中的应用研究相对较少。目前,果蔬食品磁场处理的研究大多是通过使用单一的磁场技术对原料进行作用。而采用组合处理的方法对不同种类的果蔬食品进行处理,探索最佳处理条件和技术,是提升果蔬加工的整体效益和加工制品综合品质的重要方向。

d.磁场在果蔬中的工业化应用面临挑战。磁场技术在果蔬食品领域的应用前景广阔,但目前相关研究大多还处于实验阶段,离实际生产中工业化大批量应用还有一定距离。现有的实验室用磁场设备,虽然能够对果蔬食品进行磁场处理,但无法相互调节转换磁场模式,而且功率较大,难以适应不同实验原料的处理需求,且无法大批量处理原料。因此亟需开发出一种安全可靠、成本合理、效率高效且具备多功能可调节的食品磁场处理装备。这样的装备对于推进磁场技术在食品工业中的应用具有重要的意义。

e.磁场处理对果蔬食品的食用安全性有待探究。强度较大且作用时间较长的磁场处理会造成原料中生物大分子结构和理化性质发生较大的变化,这可能会对果蔬的食品品质和安全性造成影响。因此,对食品经磁场处理后的食用安全性进行评价至关重要。

要。目前,尚未有研究对食品经磁场处理后的安全性进行全面评估。开展磁场处理的安全性评价,并对其进行科学规范和监管,不仅可以为食品磁场加工的商业化应用提供理论支撑,同时也可以为消费者提供更加安全和可靠的食物选择。

由于不同果蔬及其保鲜加工涉及的不同磁效应体系,与果蔬组织、细胞和大分子组分构成也密切相关,因此,明确不同果蔬特异性组织结构和物质组成在特定加工处理条件下所匹配的磁场条件,并在此基础上,发掘磁场技术在果蔬不同加工需求场景中的应用具有重要意义。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 张朝玮. 电磁场与电磁波在电子通信技术中的应用探究[J]. 电子测试, 2021, 31(11): 135-136. [ZHANG C W. Research on application of electromagnetic field and electromagnetic wave in electronic communication technology[J]. *Electronic Testing*, 2021, 31(11): 135-136.]
- [2] HAN Z, CAI M J, CHENG J H, et al. Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 1-9.
- [3] 张武杰, 李保国, 张毅鹏, 等. 磁场在果蔬冷藏保鲜中的应用研究[J]. 食品科学, 2007, 28(5): 335-338. [ZHANG W J, LI B G, ZHANG Y P, et al. Application of magnetic field in cold storage of fruits and vegetables[J]. *Food Science*, 2007, 28(5): 335-338.]
- [4] 刘兴文, 孙淑凤, 刘磊磊. 静磁场对冰晶成核过程影响的机理分析[J]. 低温与超导, 2018, 46(3): 84-89, 94. [LIU X W, SUN S F, LIU L L. Mechanism analysis of effects of static magnetic field on ice crystal nucleation[J]. *Low Temperature and Superconductivity*, 2018, 46(3): 84-89, 94.]
- [5] LIN L, WANG X, HE R, et al. Action mechanism of pulsed magnetic field against E-coli O157:H7 and its application in vegetable juice[J]. *Food Control*, 2019, 95: 150-156.
- [6] ZHAO S, YANG Z, ZHANG L, et al. Effect of combined static magnetic field and cold water shock treatment on the physico-chemical properties of cucumbers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 217: 24-33.
- [7] REINA F G, PASCUAL L A. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part I: Theoretical considerations[J]. *Bioelectromagnetics*, 2001, 22(8): 589-595.
- [8] 赵勇, 郭利芳, 盛占武. 静磁场对细胞内蛋白质影响研究进展[J]. 现代食品, 2018, 3(15): 1-5. [ZHAO Y, GUO L F, SHENG Z W. Effect of static magnetic field on intracellular protein[J]. *Modern Food*, 2018, 3(15): 1-5.]
- [9] 周慧吉, 马海乐, 吴平, 等. 食品加工中的磁致生物学效应的研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 285-289. [ZHOU H J, MA H L, WU P, et al. Progress in understanding magnetic biological effect in food processing[J]. *Food Science*, 2014, 35(17): 285-289.]
- [10] ULGEN C, YILDIRIM A B, SAHIN G, et al. Do magnetic



field applications affect *in vitro* regeneration, growth, phenolic profiles, antioxidant potential and defense enzyme activities (SOD, CAT and PAL) in lemon balm (*Melissa officinalis* L.) [J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 69: 113624.

[11] AL-MAYYAH R B, PARK S G, JADHAV D A, et al. Unraveling the influence of magnetic field on microbial and electrogenic activities in bioelectrochemical systems: A comprehensive review [J]. *Fuel*, 2023, 331(2): 125889.

[12] 曲晓雷, 胡哲, 杨大海. 磁场辅助保鲜技术的研究进展 [J]. *家电科技*, 2020, S1: 179-183. [QU X L, HU Z, YANG D H. Research progress of magnetic field assisted preservation technology [J]. *Science and Technology of Household Appliances*, 2020, S1: 179-183.]

[13] 杨哪, 周宇益, 黄文哲, 等. 静磁场辅助冷藏对草莓采后品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(9): 195-200. [YANG N, ZHOU Y Y, HUANG W Z, et al. Effect of static magnetic field assisted refrigeration on postharvest quality of straw mushroom [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(9): 195-200.]

[14] 夏广臻. 磁场、静电场辅助制冷分别对食品保鲜及冷冻影响的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019. [XIA G Z. Study on the influence of magnetic field and electrostatic field assisted refrigeration on food preservation and freezing respectively [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019.]

[15] 宋健飞, 刘斌, 王鹏飞. 磁场对胡萝卜细胞相变及冰晶形成过程的影响 [C]. 第七届中国冷冻冷藏新技术新设备研讨会论文集. 2015: 32-36. [SONG J F, LIU B, WANG P F. Effect of magnetic field on the phase transition and ice crystal formation of carrot cells [C]. *Proceedings of the 7th China Symposium on New Technology and Equipment for Refrigeration*. 2015: 32-36.]

[16] 宋健飞, 刘斌, 关文强, 等. 直流磁场对洋葱细胞冻结过程的影响 [J]. *制冷学报*, 2016, 37(2): 107-112. [SONG J F, LIU B, GUAN W Q, et al. Effect of DC magnetic field on freezing process of onion cells [J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(2): 107-112.]

[17] 谭银莹. 三维磁场辅助冷冻对牛油果泥贮藏品质的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2020. [TAN Y Y. Effect of three-dimensional magnetic field assisted freezing on storage quality of avocado puree [D]. Wuyi: Jiangnan University, 2020.]

[18] TANG J, ZHANG H, TIAN C, et al. Effects of different magnetic fields on the freezing parameters of cherry [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 278: 109949.

[19] TANG J, SHAO S, TIAN C. Effects of the magnetic field on the freezing process of blueberry [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113: 288-295.

[20] 邵蕾, 许铭强, 孟新涛, 等. 模糊数学感官评价与响应面法优化法兰西西梅静磁场解冻工艺 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(22): 7381-7390. [SHAO L, XU M Q, MENG X T, et al. Optimization of magnetic field thawing process of *Prunus domestica* L. by fuzzy mathematical sensory evaluation and response surface method [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(22): 7381-7390.]

[21] KAUR M, KUMAR M, SETHI V. Maintaining the freeze thawing characteristics of tomato through development and evaluation of magnetic field-assisted freezing system [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(9): e16900.

[22] NUROĞLU E, ÖZ E, BAKIRDERE S, et al. Evaluation of magnetic field assisted sun drying of food samples on drying time

and mycotoxin production [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 237-243.

[23] BALOGU T V, ATTANSEY C R. Effect of static magnetic field on microbial growth kinetics and physiochemical properties of nono (fermented milk drink) [J]. *Journal of Microbiology Biotechnology and Food Sciences*, 2017, 7(1): 75-78.

[24] LI W, MA H, HE R, et al. Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 76: 105613.

[25] DAI N, ZHANG X, CAI Z, et al. The effect of different pulsed magnetic field and microwave composite treatment on the aroma compounds and sensory characteristics of soy-sauce flavor Chinese liquor [J]. *CyTA - Journal of Food*, 2021, 19(1): 793-804.

[26] 赵松松, 韩馨仪, 刘斌, 等. 交变磁场抑制香蕉冷害的作用机理分析 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(3): 739-745. [ZHAO S S, HAN X Y, LIU B, et al. Mechanism analysis of alternating magnetic field inhibiting cold damage of banana [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(3): 739-745.]

[27] 高梦祥, 王春萍. 交变磁场对草莓保鲜效果的影响 [J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(1): 155-158. [GAO M X, WANG C P. Effect of alternating magnetic field on strawberry preservation [J]. *Food Research and Development*, 2010, 31(1): 155-158.]

[28] 方杰. 交变磁场对沙生果蔬地梢瓜采后生理生化特性的影响 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020. [FANG J. Effect of alternating magnetic field on postharvest physiological and biochemical characteristics of shoot melon of sandy fruit and vegetable [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020.]

[29] 韩馨仪, 赵松松, 刘斌, 等. 交变磁场抑制葡萄冻害机理分析及试验研究 [J]. *河北农业大学学报*, 2021, 44(2): 97-103. [HAN X Y, ZHAO S S, LIU B, et al. Alternating magnetic field grape frost damage mechanism analysis and test study [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2021, 44(2): 97-103.]

[30] YANG Z, ZHANG L, ZHAO S, et al. Comparison study of static and alternating magnetic field treatments on the quality preservation effect of cherry tomato at low temperature [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(9): 1745-4530.

[31] 黄利强. 磁场结合气调包装对葡萄保鲜效果的研究 [J]. *包装工程*, 2010, 31(11): 23-26. [HUANG L Q. Study on effect of magnetic field combined with air-conditioned packaging on grape preservation [J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(11): 23-26.]

[32] 赵松松, 康方圆, 刘斌, 等. 食品电磁加工技术研究进展及应用现状 [J]. *冷藏技术*, 2020, 43(1): 1-8, 14. [ZHAO S S, KANG F Y, LIU B, et al. Research progress and application status of food electromagnetic processing technology [J]. *Refrigeration Technology*, 2020, 43(1): 1-8, 14.]

[33] LÜ L, JIN Y, YANG N, et al. Effect of alternating magnetic field on the quality of fresh-cut apples in cold storage [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(8): 5429-5438.

[34] PANAYAMPADAN A S, ALAM M S, ASLAM R, et al. Effects of alternating magnetic field on freezing of minimally processed guava [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 163: 113544.

[35] WANG T, JIN Y, YANG N, et al. Effect of magnetic field with different dimensions on quality of avocado puree during frozen storage [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(3): 1698-1707.



- [36] 朱宇洁,郭晓东,宋佳玲.脉冲磁场传感器的设计与灵敏度修正方法[J].中国测试,2019,45(3):114-120. [ZHU Y J, GUO X D, SONG J L. Design and sensitivity correction method of pulsed magnetic field sensor[J]. China Test and Measurement, 2019, 45(3): 114-120.]
- [37] 马海乐,邓玉林,储金宇.西瓜汁的高强度脉冲磁场杀菌试验研究及杀菌机理分析[J].农业工程学报,2003,19(2):163-166. [MA H L, DENG Y L, CHU J Y. Experimental study on sterilization of watermelon juice by high-intensity pulsed magnetic field and its mechanism analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 163-166.]
- [38] 高梦祥,马海乐,郭康权.西瓜汁的脉冲磁场杀菌试验[J].食品与发酵工业,2004,30(3):14-17. [GAO M X, MA H L, GUO K Q. Sterilization of watermelon juice by pulsed magnetic field[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(3): 14-17.]
- [39] 吴平,曾义,王薇薇,等.格氏李斯特菌脉冲磁场杀菌效果研究[J].食品工业科技,2015,36(7):127-131. [WU P, ZENG Y, WANG W W, et al. Effect of pulsed magnetic field on bactericidal efficacy of listeria glabella[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(7): 127-131.]
- [40] 唐伟强,郭松旺,何嘉洲.脉冲磁场杀菌效果的实验与研究[C].2007年学术年会论文集.2007:56-60. [TANG W Q, GUO S W, HE J Z. Experiment and study on the sterilization effect of pulsed magnetic field[C]. Proceedings of 2007 Annual Conference. 2007: 56-60.]
- [41] 金江涛,郑必胜.强脉冲磁场对草莓汁的杀菌效果研究[J].食品工业,2009,30(6):55-57. [JIN J T, ZHENG B S. Sterilization effect of high-intensity pulsed magnetic field to strawberry juice[J]. Food Industry, 2009, 30(6): 55-57.]
- [42] LIN L, WANG X, CUI H. Synergistic efficacy of pulsed magnetic fields and litsea cubeba essential oil treatment against escherichia coli O157: H7 in vegetable juices[J]. Food Control, 2019, 106: 106686.
- [43] QIAN J, CHEN S, HUO S, et al. Impact of pulsed magnetic field treatment on enzymatic inactivation and quality of cloudy apple juice[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2021, 58(8): 2982-2991.
- [44] QIAN J, YAN G, HUO S, et al. Effects of pulsed magnetic field on microbial and enzymic inactivation and quality attributes of orange juice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(6): e15533.
- [45] ZHANG L, YANG Z, DENG Q. Effects of pulsed magnetic field on freezing kinetics and physical properties of water and cucumber tissue fluid[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 288: 110149.
- [46] KOSUKE H, SHU R, HIROSHI G. Method for freezing and freezer using variance of magnetic field or electric field[Z]. 2001.
- [47] HER J Y, KANG T, HOPTOWIT R, et al. Oscillating magnetic field (OMF) based supercooling preservation of fresh-cut honeydew melon[J]. Transactions of the Asabe, 2019, 62(3): 779-785.
- [48] KANG T, HER J Y, HOPTOWIT R, et al. Investigation of the effect of oscillating magnetic field on fresh-cut pineapple and agar gel as a model food during supercooling preservation[J]. Transactions of the Asabe, 2019, 62(5): 1155-1161.
- [49] 唐建新,王佳莉,英丽美,等.果蔬采后生理代谢变化及调控机制研究进展[J].包装工程,2022,43(5):91-99. [TANG J X, WANG J L, YING M L, et al. Advances in physiological metabolism changes and regulation mechanism of harvested fruits and vegetables[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 91-99.]
- [50] 毛宁,黄彦彦.磁生物学效应的研究[J].生物学通报,2000,35(5):6-9. [MAO N, HUANG Y Y. Study on magnetic biological effects[J]. Biological Science Bulletin, 2000, 35(5): 6-9.]
- [51] SUN H, ZHOU X, ZHOU Q, et al. Disorder of membrane metabolism induced membrane instability plays important role in pericarp browning of refrigerated 'Nanguo' pears[J]. Food Chemistry, 2020, 320(1): 126684.
- [52] 柳青,陈晓琪,黄广学,等.鲜切果蔬品质控制技术研究进展[J].食品研究与开发,2022,43(6):217-224. [LIU Q, CHEN X Q, HUANG G X, et al. Progress on research into quality control technology for fresh-cut fruit and vegetables[J]. Food Research and Development, 2022, 43(6): 217-224.]
- [53] TENUZZO B, CHIONNA A, PANZARINI E, et al. Biological effects of 6 mT static magnetic fields: A comparative study in different cell types[J]. Bioelectromagnetics, 2006, 27(7): 560-577.
- [54] PARADISI S, DONELLI G, SANTINI M T, et al. A 50 Hz magnetic field induces structural and biophysical changes in membranes[J]. Bioelectromagnetics, 1993, 14(3): 247-255.
- [55] 赵松松.果蔬低温电磁处理的保鲜机理与试验研究[D].天津:天津大学,2017. [ZHAO S S. Mechanism and experimental study on fresh-keeping of fruits and vegetables under low temperature electromagnetic treatment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.]
- [56] 马海乐,许审时,何荣海,等.利用 Fura-2/AM 荧光探针法和 LCSM 法研究受磁场处理 *S. aureus* 细胞  $Ca^{2+}$  的跨膜行为[J].光谱学与光谱分析,2012,32(2):407-410. [MA H L, XU S S, HE R H, et al. Fura-2/AM fluorescent probe method and LCSM method were used to study the transmembrane behavior of  $Ca^{2+}$  in *S. aureus* cells treated with magnetic field[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 407-410.]
- [57] 姚学玲,陈景亮,徐传骥.脉冲电流电磁场对生物膜的非热效应分析[J].电工电能新技术,2003,22(2):76-81. [YAO X L, CHEN J L, XU C X. Analysis for non-thermal effects of pulsed current electromagnetic fields on biological membranes[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(2): 76-81.]
- [58] 李红,胡道道,房喻,等.磁场对大分子构象的影响研究进展[J].高分子通报,2005,17(5):108-113,150. [LI H, HU D D, FANG Y, et al. Analysis of macromolecular motion characteristics from its dependence on temperature[J]. Polymer Bulletin, 2005, 17(5): 108-113, 150.]
- [59] 戎鑫,李建军,但宏兵,等.磁化水的特性、机理及应用研究进展[J].材料导报,2022,36(9):65-71. [RONG X, LI J J, DAN H B, et al. Characteristics, mechanism and applications of magnetized water: A Review[J]. Materials Review, 2022, 36(9): 65-71.]
- [60] 朱春梅,马海乐,任瑞.高强度脉冲磁场对辣根过氧化物酶活性的影响[J].安徽农业大学学报,2009,36(1):116-119. [ZHU C M, MA H L, REN R. Effects of high-intensity pulsed magnetic field on peroxidase activities[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2009, 36(1): 116-119.]
- [61] 陈仁菊,郭丹丹,肖凯军.脉冲强磁场对牛乳中酶的构象的影响[J].食品工业科技,2011,32(7):82-85. [CHEN R J, GUO D D, XIAO K J. Effect of pulsed high magnetic field on the enzyme conformation of milk[J]. Science and Technology of Food Indus-

- try, 2011, 32(7): 82–85. ]
- [ 62 ] 马海乐, 黄六容, 朱春梅. 多酚氧化酶高强度脉冲磁场灭活及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 325–328. [ MA H L, HUANG L R, ZHU C M. Inactivation and kinetic model of polyphenol oxidase by high-intensity pulsed magnetic field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S1): 325–328. ]
- [ 63 ] 李香勇, 张晨. 稳恒磁场对多酚氧化酶活性影响的研究[J]. 德州学院学报, 2011, 27(6): 53–56. [ LI X Y, ZHANG C. Study on the effects of static magnetic field on the activity of polyphenol oxidase[J]. Journal of Dezhou College, 2011, 27(6): 53–56. ]
- [ 64 ] 刘勇. 磁场对酶及酶促反应过程的影响[D]. 天津: 天津大学, 2007. [ LIU Y. Effect of magnetic field on enzyme and enzymatic reaction process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. ]
- [ 65 ] 姚占全, 教敦格日勒, 许强, 等. 应用圆二色光谱研究电场对脂肪酶二级结构的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(12): 2311–2314. [ YAO Z Q, AO D G R L, XU Q, et al. Study on the effect of electric field on the secondary structure of lipase by circular dichroism[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(12): 2311–2314. ]
- [ 66 ] PHILLIPS J N, SINGH N P, LAI H. Electromagnetic fields and DNA damage[J]. Pathophysiology, 2009, 16(2): 79–88.
- [ 67 ] QIAN J Y, ZHOU C S, MA H L, et al. Biological effect and inactivation mechanism of bacillus subtilis exposed to pulsed magnetic field: morphology, membrane permeability and intracellular contents[J]. Food Biophysics, 2016, 11: 429–435.
- [ 68 ] LUCERI C, DE FILIPPO C, GIOVANNELLI L, et al. Extremely low-frequency electromagnetic fields do not affect DNA damage and gene expression profiles of yeast and human lymphocytes[J]. Radiation Research, 2005, 164(3): 277–285.