

磁场致食品中微生物失活研究进展

肖瑾¹ 杨哪¹ 郑盼茜² 徐学明² 杨瑞金²

(1. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:作为新型非热杀菌技术, 磁场因其强穿透性、绿色安全的特点而备受关注。振荡磁场能在保持食品营养特性的同时有效杀灭微生物并延长其保质期, 恒稳磁场在抑制食品微生物生长方面也展现出良好的应用潜力, 但不同类型磁场对食品中微生物的抑制及失活作用机制尚未有系统的阐述与分析。文章综述了磁场致死和抑制食品微生物方面的研究进展, 包括作用机制以及应用情况, 并就其所面临的前景和挑战进行了探讨。

关键词: 磁场; 微生物失活; 生物磁效应; 窗口效应; 作用机制

Research progress on microbial inactivation in food induced by magnetic fields

XIAO Jin¹ YANG Na¹ ZHENG Panxi² XU Xueming² YANG Ruijin²

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: As a novel non-thermal sterilization technology, the magnetic field has attracted much attention due to its strong penetrability and green and safe characteristics. Oscillating magnetic fields can effectively eliminate microorganisms and prolong the shelf life of food while maintaining the nutritional properties of food, and static magnetic fields have also shown great potential in inhibiting the growth of microorganisms in food. However, the mechanisms of inhibition and inactivation of microorganisms in food by different types of magnetic fields have not been systematically elaborated and analyzed. Therefore, this paper reviews the research progress of magnetic fields in eliminating and inhibiting microorganisms in food, encompassing the perspectives of mechanisms of action and application scenarios, and discusses the prospects and challenges faced by this technology.

Keywords: magnetic field; microbial inactivation; biological magnetic effects; window effect; mechanism of action

食品安全是一个全球性的问题, 备受人们关注^[1-2]。微生物因其分布广、种类多以及繁殖速度快而广泛存在于食品的生产、加工和贮藏的全过程中^[3-4], 是引起食品变质并引发食源性疾病的主要原因^[5-6]。为了保证食品安全、延长食品保质期, 高效的杀菌技术被广泛用于食品的生产加工中。目前, 食品工业中的灭菌方法可以分为传统的热杀菌技术和物理非热杀菌技术。传统的热杀菌技术是利用高温杀灭食品中微生物的有效方法, 具有适用范围广、安全可靠、易于操作等优点, 但会导致产品部分感官品质下降和食物中营养成分流失, 尤其是会严重影

响热敏性食品的风味和色泽^[7-9]。当前消费者追求加工程度低, 风味、色泽保留全面的食物^[10], 故近年来物理非热杀菌技术发展迅速, 如脉冲磁场^[11-12]、高压脉冲电场^[13-14]、辐照^[15-16]、等离子体^[17-18]、微波^[19-20]、超声^[17, 21-22]和高静水压^[23-24]等。相较于热杀菌技术, 非热杀菌技术也能有效杀灭和抑制食品中的微生物, 并能最大程度保持食品原有的风味、色泽, 但其装备系统较为复杂, 应用成本相对较高。作为新兴的杀菌技术, 磁场在食品加工中表现出了良好的应用潜力, 磁场的非热效应是其作用的重要基础。磁场的非热效应是指磁场通过不涉

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 32172353); 江苏省优秀青年基金项目(编号: BK20211582)

通信作者: 杨哪(1982—), 男, 江南大学副研究员, 博士。E-mail: yangna@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2024-08-16 **改回日期:** 2025-03-06

引用格式: 肖瑾, 杨哪, 郑盼茜, 等. 磁场致食品中微生物失活研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 204-211.

Citation: XIAO Jin, YANG Na, ZHENG Panxi, et al. Research progress on microbial inactivation in food induced by magnetic fields[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 204-211.

及温度变化的方式改变生物体内生理生化过程的效应。目前,已有研究证实磁场的灭菌效果与磁场的强度、波形和频率密切相关^[25-26],通常认为弱磁场会增强微生物生长和代谢活性^[27];长时间的中强磁场处理可在一定程度上抑制大肠杆菌^[28]、鼠伤寒沙门氏菌^[29]、酵母和霉菌^[30]等的生长繁殖;高强度磁场对微生物的细胞膜和细胞器有强烈的破坏作用^[25, 31]。但关于磁场对微生物的抑制和失活效果也存在相互矛盾的观点,说明这种影响也取决于微生物种类、处理时间、磁场类型和磁场功率阈值等^[28]。文章拟综述磁场致死和抑制食品微生物方面的研究进展,包括作用机制以及应用情况,并就其所面临的前景和挑战进行探讨,旨在为磁场技术调控食品微生物的应用提供依据。

1 技术原理

1.1 磁场的生成

磁场是由永磁体或导体中的直流或者交流电产生的非保守物理场^[25],能传递移动电荷或电流之间的相互作用^[32],磁场强度越大,流经闭合空间(如线圈、环形磁体等)所需电流越强^[33]。根据磁场强度和空间分布,可分为静磁场和动态磁场^[12],而动态磁场又可进一步分为交变磁场、脉动磁场、振荡磁场和脉冲磁场^[34]。根据磁场强度

大小,磁场还可以分为弱磁场(<1 mT)、中强磁场(1 mT~1 T)、强磁场(1~20 T)和超强磁场(>20 T)^[35]。不同强度类型磁场对食品微生物的作用效果具有差异,当前研究更多侧重于低强度的交变磁场、中强度的静磁场以及高强度的脉冲磁场对食品贮藏和加工处理的影响。

1.2 磁场对微生物的作用机制

磁场和生物体相互作用所产生的效应被称为生物磁效应。生物材料的基本组分大多是抗磁性的,包括水、脂质、蛋白质、核酸和其他不具有未配对电子的化合物;但也有少部分具有顺磁性,如自由基和某些携带过渡金属元素的配位化合物^[36]。顺磁性物质易受外加磁场的影响,低强度的磁场即对其造成影响,而抗磁性物质则相对稳定,在高强度磁场的作用下才会发生变化。不同微生物体内的物质在外加磁场的作用下产生生物磁效应,影响电子的传递、自由基的活动、酶与蛋白的活性、生物膜通透性的变化和遗传物质的变化等,最终呈现出不同的抗菌活性。不同类型、强度、频率和波形的磁场作用于微生物时均可能产生差异性的效果,称为生物窗口效应,也是磁场作用的非热效应之一,即只有特定的磁场条件才能诱导出该类影响。表1总结了磁场对培养基质中部分微生物的致死性研究。

表1 磁场对部分微生物的致死性研究
Table 1 Study on the lethality of magnetic fields on some microorganisms

菌种	磁场类型	磁场参数	应用效果	参考文献
大肠杆菌	静磁场	250 mT	显著减小大肠杆菌菌落形成单元直径,但对菌落数无影响	[37]
	静磁场	160 mT处理6 h	最大平均致死率为66.45%,致死率随着励磁电流、处理时间、磁感应强度的增大而提高,随着磁极间距的增大而减小,处理时间与大肠杆菌的致死率相关性最大	[38]
	脉冲磁场	6 T,脉冲数20个,17℃	大肠杆菌的杀菌率达到99.91%,优于254 nm 9 W紫外线处理后的杀菌率76.8%	[39]
金黄色葡萄球菌	交变磁场	4 mT处理60 s	金黄色葡萄球菌的杀菌率为93.45%,相同处理时间下,近红外LED的杀菌率仅为59.29%	[40]
枯草芽孢杆菌	静磁场	160 mT处理6 h	最大平均致死率为59.31%,高强度磁场长时间处理才能将其完全杀灭	[38]
酿酒酵母	静磁场	8 T处理24 h	减缓酿酒酵母增殖,抑制率达19%,可归因于磁场引起的渗透压变化和磁场梯度引起的代谢竞争效应	[41]
	脉冲磁场	2.71 mT, 20 Hz, 处理9 h	细胞暴露在20 Hz, 2.71 mT磁场中9 h,菌落总数减少了25.9%;在77.5 Hz, 0.92 mT条件下,4 h时菌落总数减少了18.6%,12 h时菌落总数增加了23.5%,在20.0~77.5 Hz存在频率窗口效应	[42]
单增李斯特菌	脉冲磁场	8 T,脉冲数20个	活菌残留率仅为9.60%,脉冲磁场处理使胞内Ca ²⁺ 浓度升高、基因表达水平改变、影响了其正常的生理和代谢活动,从而导致死亡	[43]

单细胞微生物被广泛用于考察不同类型磁场影响下的生物学效应及其分子作用机制^[37],但由于研究时缺乏对磁场均匀性的精准计量,导致对磁场影响微生物生长作用机理的认识未能达成完全一致^[44]。目前较为普遍认可的机制主要体现在以下5个方面。

1.2.1 自由基自旋态调节和磁敏性的酶促机制 自由基是一种外层轨道具有一个或多个不成对电子的原子或者团簇,许多生命活动都伴随着自由基的产生、转化和消失。自由基自旋态调节被认为是磁场如何改变反应物性质并引起生物学效应变化的合理解释。磁场与生物系统

的相互作用是借助活性氧实现的,其作用的主要靶点是自由基。生物体中发生大量的氧化还原反应,进而在各种亚细胞结构中产生活性氧^[37],同时,活性氧的产生与清除系统的相互作用生成氧化还原信号,维持细胞内的氧化还原状态,调控细胞的生理代谢功能^[45]。自由基还受磁场的影响^[46],磁场诱导自由基的自旋状态发生单线态—三重态的跃迁,增加自由基的活性^[37, 47]。基于此原理,磁场使细胞产生更多的自由基,并表达出更高水平的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶等酶的活性以提高清除活性氧的能力,从而引起氧化应激,破坏离子通道,甚至导致细胞形态发生变化以及与防御相关的基因和蛋白质表达^[48-50]。磁敏性的酶促机制与自由基自旋态调节类似。在一些酶的反应中心,电子从一个分子基团转移到另一个分子基团,产生具有反平行自旋的单线态离子—自由基对(IRP),磁场或核自旋通过塞曼或超精细相互作用将活性位点中的IRP由单线态转变为三重态,改变酶的活性,进而影响反应速率^[47, 51]。由磁场或磁性同位素调控的自旋依赖性酶促反应可以改变体外和体内所参与的ATP和DNA生物合成酶活性^[52-54]。

1.2.2 电穿孔效应与洛伦兹力效应 生物体内存在许多带电粒子,包括蛋白质、核酸、金属离子等,这些粒子在维持生命活动中起着至关重要的作用,磁场的引入会影响生物体内带电粒子的运动。电场力可直接作用于细胞内部离子或粒子,若施加的磁场强度足够大,洛伦兹力也会产生显著影响^[55]。变化的磁场能够诱导细胞中产生感应电场或微电流,进而改变细胞膜的内外电势差,当跨膜电位达到阈值时,诱导细胞膜发生电穿孔^[56-58],区别于传统的电穿孔效应,磁场诱导的电穿孔是细胞同时受到动态磁场与感应电流作用所造成的^[59-60]。此外,钙离子作为次级信使在调节细胞代谢功能和维持细胞存活上起着重要作用^[61-62]。在静息状态下,细胞内的钙离子浓度会维持在100 nmol/L左右,细胞膜所形成的大孔道会促进胞外钙、钠离子大量进入细胞,破坏浓度平衡,引起细胞毒性死亡^[62]。在强磁场条件下,细胞中的带电溶质受洛伦兹力作用进行圆周运动^[63]。当其拉莫尔半径小于细胞尺寸时,细胞内源酶或者其他带电粒子在细胞内绕行,产生的运动方向各异,偏离其原有轨迹转移,使细胞发生变形,最终影响其生物活性^[11, 64]。

1.2.3 离子回旋共振(ICR)和离子顺磁共振(IPR) ICR和IPR是动态磁场灭活微生物的重要机制^[11-12, 25]。微生物细胞内的带电粒子在洛伦兹力作用下进行圆周运动,当运动频率等于施加磁场频率时,发生回旋共振,将能量从磁场转移到离子,这些离子再将磁场能量传递到其他细胞器^[11-12, 65],影响细胞的生理功能。这种现象也导致了 Ca^{2+} 穿过细胞膜,破坏了原本的离子浓度平衡。而且离子的回旋共振频率也可能影响 Ca^{2+} 和钙调蛋白间离子

键的稳定性,键的不稳定会影响细胞的正常代谢活动进而导致微生物失活^[66-67]。IPR模型是从ICR衍生出来的,描述离子对外部控制参数的响应,例如磁场的频率和有效磁通量,并额外考虑了所采用的回旋加速器和次谐波频率^[11, 25]。

1.2.4 电离效应 闭合强磁场能使带电粒子高速运动撞击其他分子,将分子分解成阴离子和阳离子。这些阴、阳离子在强磁场的作用下极为活跃,穿过高通透性的细胞膜,与微生物内的生命物质如蛋白质和RNA作用,可阻断细胞内的正常生化反应和新陈代谢的进行,导致细胞死亡^[12, 68-69]。此外,高频振荡磁场能够使水分子中的氢氧键断裂,在水中生成过量的超氧阴离子自由基、过氧化氢及自由质子并作用于生物大分子,破坏DNA,导致细胞死亡^[70]。液体介质中电离效应产生的臭氧同样有强烈的氧化作用,能与细胞内物质发生一系列反应^[67]。

1.2.5 DNA与基因表达 蛋白质组学分析发现,磁场可改变某些基因的表达从而调节蛋白质的生产,进而降低碳水化合物代谢和能量代谢水平^[71]。李浩东^[72]研究发现,250 mT的静磁场处理可引起5%(4 081个基因中的202个)的基因表达发生改变,其中145个基因表达下调,57个基因表达上调,进而导致大肠杆菌单克隆菌斑直径扩大被抑制。Yang等^[73]发现在30 mT静磁场中暴露3 d的红曲霉,其中与红曲色素和橘霉素合成相关的基因表达也发生了上调,而这些基因同时也参与细胞内的初生代谢反应。Qian等^[71]对脉冲磁场处理的枯草芽孢杆菌进行了蛋白质组学分析,发现一部分蛋白的特异性下调,而另一部分则上调,使得枯草芽孢杆菌通过糖酵解和柠檬酸循环获得的能量减少,但磷酸戊糖途径获得的能量又增加,即能量的短缺可得到部分补偿,若这种补偿未及时发生,或者新陈代谢受损无法恢复,细胞则可能死亡。此外,Qian等^[60]研究表明,向枯草芽孢杆菌中施加30个脉冲数的3.0 T脉冲磁场,可直接导致其DNA发生片段化损伤(图1)。

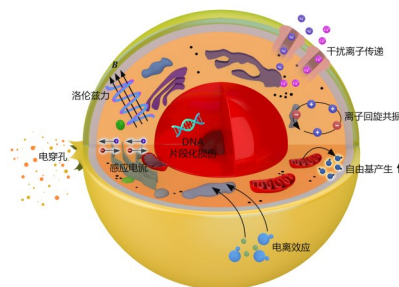


图1 磁场致食品中微生物失活的作用机制

Figure 1 Mechanisms of microbial inactivation in food induced by magnetic fields

2 应用研究进展

相较于食品基质,利用磁场进行微生物灭活在培养基中的效果更佳。这一现象可归因于食品中的营养物质相较于培养基更为丰富,这些营养物质以及生物活性成分会阻碍磁场对微生物的灭活作用^[11]。此外,食品基质中通常存在多种微生物,微生物种群间的相互关系和食品中水分及带电化合物对磁场的响应也可能会影响生物效应。因此,尽管在培养基中磁场表现出了良好的微生物灭活效果,但在实际应用中应考虑食品基质这一重要因素。现有的研究更多集中于含水量较高的食品及食物原料中磁场对微生物的失活效果评估,包括畜肉及其制品、水产品、果蔬等。

2.1 畜肉及其制品

冷藏、冷冻是肉类原料及其加工制品中被广泛采用的贮藏方法,利用低温延缓微生物生长繁殖,但长时间贮藏会对色泽及营养品质造成不利影响。磁场可抑制肉类原料中的微生物生长,并能较好地保持其原有色泽和理化特征,有效延长贮藏期。Zhang等^[74]发现2 mT、4℃的交变磁场能抑制鲜牛肉中微生物的生长、延缓游离氨基酸向生物胺的转化,同时抑制蛋白质氧化和苦味氨基酸的积累,有效保持其营养特性,相较于对照组保质期延长了5 d。Lins等^[75]评估了脉冲磁场对冷藏新鲜碎牛肉的影响,与对照组相比,脉冲磁场处理2 h后,样品在其营养成分保留较好的情况下降低了微生物的生长量和高铁肌红蛋白含量,而持续暴露在脉冲磁场下12 d则不会显著抑制细菌的生长,这可能是因为幸存的细菌已经适应了该磁场环境。通常情况下,磁场与其他技术联合使用会显示出更好的抑菌效果。肺炎克雷伯菌因具有产气能力而成为引起包装肉丸腐败的主要微生物,5 mT脉冲磁场与气调保鲜技术联合运用可在保持产品原有品质的基础上延缓细菌进入对数生长期、降低样品的pH值并抑制氧化^[76]。到80 h时,细菌数量显著低于对照组,抑菌效果优于磁场或气调技术的单独运用。

2.2 水产品

微生物尤其是腐败菌的繁殖与水产品贮藏期间品质劣变关系密切。水产品中丰富的营养物质使腐败菌大量繁殖,腐败菌分泌的胞外酶等代谢产物也会加速水产品中营养物质的水解及胺类物质等异味物质的积累^[77]。磁场可有效抑制水产品中微生物的生长,延长其菌落总数超过阈值所需的时间,延缓水产品的腐败变质。Tong等^[78]研究了4℃下5 mT静磁场对鲈鱼中微生物的抑制作用,结果显示,对照组在贮藏3 d后菌落总数 $>7 \lg(\text{CFU/g})$,而磁场处理组在6 d后才达到此水平。交变磁场也表现出类似的效果趋势。潘泳江等^[79]对比了草鱼片在2 mT交变磁场和常规冷藏条件下的菌落总数,草鱼片的初始菌落值为

4.41 lg(CFU/g),常规冷藏5 d时菌落总数已接近6.00 lg(CFU/g),而交变磁场在贮藏10 d时菌落总数才 $>6.00 \lg(\text{CFU/g})$,且贮藏末期交变磁场组菌落总数较常规冷藏组减少了1.20 lg(CFU/g)。

2.3 果蔬及果蔬制品

果蔬中富含多种营养元素,采摘过程中容易使其表面附着大量的微生物并侵入果蔬内部,引起品质劣变。导致果蔬变色、霉变和腐败的主要微生物包括酵母菌、霉菌和各类有氧细菌^[80-81],刘帆^[82]发现磁场处理可显著减少草莓表面腐败率、菌落总数和酵母霉菌数量,抑制效果与磁场强度密切相关,4℃、8 mT SMF条件下的草莓腐烂率最低,较对照组减少了33.89%,其感官品质也显著高于对照组;磁场处理还降低了糖和有机酸的消耗,维持了较高的线粒体蛋白水平和能量代谢。Lu等^[30]研究表明,交变磁场可维持鲜切苹果良好的感官品质,磁场组的褐变指数较对照组低41.75%,具有更少的菌落总数和更高的可溶性固形物,同时抑制了多酚氧化酶和过氧化物酶活性,保质期至少延长2 d。

好氧微生物是引起果蔬汁变质的主要微生物^[83-84],常用传统热杀菌进行处理,但高温会导致产品褐变、维生素损失和化合物降解,对其品质造成不利影响^[85-86]。Qian等^[87]将脉冲磁场应用于橙汁处理,发现样品中的嗜温细菌、酵母菌和霉菌数量显著减少,且存活率普遍随强度和脉冲数的增加而降低。但不同微生物会表现出特异性的灭活效果,在30个脉冲数、7 T条件下酵母菌和霉菌实现了最大程度的减少,且在灭活嗜温细菌的过程中还表现出了时间窗口效应,即嗜温细菌数目的最小值总出现在20个脉冲数下。Lin等^[88]分别向黄瓜、胡萝卜、生菜和番茄4种蔬菜汁中接种大肠杆菌,经8 T、60个脉冲数的脉冲磁场处理,贮藏1 d时黄瓜汁中微生物总数在脉冲磁场处理1、2、3次后分别减少了1.36、1.45、2.09 lg(CFU/g);贮藏3 d后的微生物总数最少,在处理3次的试验组中未检测到细菌,这或许是磁场的滞后性导致的。同时在胡萝卜、生菜和番茄汁中均观察到了类似的趋势。

3 挑战与展望

磁场在维持食品原有品质的基础上能抑制或杀灭其中的微生物,但综合分析,施加磁场并不总是表现出稳定的杀菌效果,甚至某些情况下会促进微生物的生长,这与磁场参数(波形、强度、均匀度、频率、功率和作用时间)、微生物特性(种类、生长阶段和初始浓度)和食品特性(水分含量、固形物含量、pH值、电导率和几何尺寸)等因素密切相关,因而在后续的研究中应予以关注。磁场对微生物的失活具有窗口效应,使得在某些特定参数下能获得较为显著的杀菌效果,包括最佳时间、场分布均匀性、功率和频率,但并非所有研究都观察到此效应。同时,找到

具有窗口效应的磁场参数需要进行准确的计量。尽管施加磁场在部分情况下表现出良好的抑菌或杀菌效果,但复杂的食物基质中各成分分布的不均匀性也会对应效果造成干扰,仍有许多不明确的作用机制有待深入研究,结合蛋白质组学、生物信息学和自旋电子物理分析等可在后续研究中发挥重要作用。目前在食品工业杀菌效果上的评判标准是否能达到商业无菌要求,相较于静磁场和交变磁场,脉冲磁场杀菌表现出一定的潜力,同时将磁场与其他技术联用可以实现更好的杀菌效果。高强度脉冲磁场的杀菌效果总是随着磁场强度与脉冲数的增加而增强,霉菌和酵母的抵抗力更强,有细菌较易被杀灭。后续亟待研究不同磁场参数对食品及微生物作用时的有效功率,特别是对磁场均匀度和波形特征的定量分析,以确定其适用范围,进一步为工业应用奠定基础。

参考文献

- [1] RUSSO P, CAPOZZI V. Editorial: microbiological safety of foods[J]. *Foods*, 2021, 10(1): 53.
- [2] QUINTIERI L, KOO O K, CALEB O J. Editorial: fight against food waste: combating contamination and spoilage[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1265477.
- [3] AIJUKA M, BUYS E M. Persistence of foodborne diarrheagenic *Escherichia coli* in the agricultural and food production environment: Implications for food safety and public health[J]. *Food Microbiology*, 2019, 82: 363-370.
- [4] MIRANDA R C, SCHAFFNER D W. Virus risk in the food supply chain[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2019, 30: 43-48.
- [5] HUANG M S, ZHANG M, BHANDARI B. Recent development in the application of alternative sterilization technologies to prepared dishes: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(7): 1 188-1 196.
- [6] LEE H, YOON Y. Etiological agents implicated in foodborne illness world wide[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2021, 41(1): 1-7.
- [7] ZHANG J C, DU Q J, YANG Y X, et al. Research progress and future trends of low temperature plasma application in food industry: a review[J]. *Molecules*, 2023, 28(12): 4 714.
- [8] WEI Q, MEI J, XIE J. Application of electron beam irradiation as a non-thermal technology in seafood preservation[J]. *LWT*, 2022, 169: 113994.
- [9] DASH K K, FAYAZ U, DAR A H, et al. A comprehensive review on heat treatments and related impact on the quality and microbial safety of milk and milk-based products[J]. *Food Chemistry Advances*, 2022, 1: 100041.
- [10] BHATTACHARJEE C, SAXENA V K, DUTTA S. Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 93: 234-243.
- [11] BASAK S. The potential of pulsed magnetic field to achieve microbial inactivation and enzymatic stability in foods: a concise critical review[J]. *Future Foods*, 2023, 7: 100230.
- [12] GUO L N, ROKNUL AZAM S M, GUO Y T, et al. Germicidal efficacy of the pulsed magnetic field against pathogens and spoilage microorganisms in food processing: an overview[J]. *Food Control*, 2022, 136: 108496.
- [13] 郑子涛, 金亚美, 张令涛, 等. 电场技术在食品杀菌中的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 177-184.
ZHENG Z T, JIN Y M, ZHANG L T, et al. Recent progress on electric field technology in food sterilization[J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 177-184.
- [14] 白妍, 葛雨璐, 向迎春, 等. 非热杀菌技术杀灭食品中芽孢效能及机理研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(15): 314-322.
BAI Y, GE Y J, XIANG Y C, et al. Progress in research on the efficacies and mechanisms of action of various non-thermal sterilization technologies in inactivation of microbial spores in foods[J]. *Food Science*, 2019, 40(15): 314-322.
- [15] 许佳, 肖欢, 焦新安, 等. 辐照技术对食源性病原菌的影响研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(19): 5 029-5 033.
XU J, XIAO H, JIAO X A, et al. Study on the effect of irradiation technology on foodborne pathogens[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9(19): 5 029-5 033.
- [16] 何凯锋, 陈秀金, 臧鹏, 等. 辐照杀菌技术对食品品质的影响及控制研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(10): 299-305.
HE K F, CHEN X J, ZANG P, et al. Research progress on effect of irradiation sterilization on food quality and its control [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(10): 299-305.
- [17] DOMONKOS M, TICHÁ P, TREJBAL J, et al. Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4 809.
- [18] THIRUMDAS R, SARANGAPANI C, ANNAPURE U S. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing[J]. *Food Biophysics*, 2015, 10(1): 1-11.
- [19] SONI A, SMITH J, THOMPSON A, et al. Microwave-induced thermal sterilization: a review on history, technical progress, advantages and challenges as compared to the conventional methods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 433-442.
- [20] GUZIK P, KULAWIK P, ZAJĄC M, et al. Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(29): 7 809-8 008.
- [21] YAN Q, MEI J, LI D P, et al. Application of sonodynamic technology and sonosensitizers in food sterilization: a review of developments, trends and challenges[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(3): 740-759.
- [22] 贾雯. 超声波技术对食品杀菌效果及其与巴氏杀菌法的差异探究[J]. *食品工程*, 2021(4): 41-42, 57.

- JIA W. Effect of ultrasonic technology on food sterilization and its difference with pasteurization[J]. Food Engineering, 2021(4): 41-42, 57.
- [23] 王永涛 张凡, 廖小军. 超高压升/卸压过程对杀菌效果的影响研究进展[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 293-302.
- WANG Y T, ZHANG F, LIAO X J. Research progress on the effect of pressurization and depressurization on high hydrostatic pressure sterilization[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(5): 293-302.
- [24] TIAN H J, LIU C J. Preserving raw oysters with high hydrostatic pressure and irradiation technology[J]. Sustainability, 2023, 15(19): 14557.
- [25] MIÑANO H L A, DE SOUSA SILVA A C, SOUTO S, et al. Magnetic fields in food processing perspectives, applications and action models[J]. Processes, 2020, 8(7): 814.
- [26] ZHANG X, YAREMA K, XU A. Impact of static magnetic fields (SMFs) on cells[M]// Biological effects of static magnetic fields. Singapore: Springer Singapore, 2017: 81-131.
- [27] WANG Q X, LIN Y, PENG L, et al. Weak magnetic field enhances waste molasses-driven denitrification during wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2023, 387: 129697.
- [28] MOUSAVIAN-ROSHANZAMIR S, MAKHDOUMI-KAKHKI A. The inhibitory effects of static magnetic field on *Escherichia coli* from two different sources at short exposure time[J]. Reports of Biochemistry & Molecular Biology, 2017, 5 (2): 112-116.
- [29] MIHOUB M, ELMAY A, ALOUI A, et al. Effects of static magnetic fields on growth and membrane lipid composition of *Salmonella typhimurium* wild-type and dam mutant strains[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 157(2): 259-266.
- [30] LV L P, JIN Y M, 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 & Technology, 2022, 57(8): 5 429-5 438.
- [31] LIU Z A, GAO X T, ZHAO J D, et al. The sterilization effect of solenoid magnetic field direction on heterotrophic bacteria in circulating cooling water[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 1 296-1 302.
- [32] LI W, MA H L, HE R H, et al. Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105613.
- [33] 匡光力. 稳态强磁场磁体技术研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 66-75.
- KUANG G L. Review and perspective of steady high field magnet technology[J]. Science & Technology Review, 2023, 41 (19): 66-75.
- [34] 郭盼杰. 磁场预处理对草莓及水果黄瓜保鲜作用研究[D]. 厦门: 集美大学, 2022: 1.
- GUO P J. Effect of magnetic field pretreatment on the preservation of strawberries and fruit cucumbers[D]. Xiamen: Jimei University, 2022: 1.
- [35] 田小飞. 稳态磁场参数对其生物学效应的影响及其机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 1.
- TIAN X F. The study on biological effects and mechanisms of static magnetic fields' parameters[D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2018: 1.
- [36] 陶清萍. 磁场生物学效应与生物样品磁学差异性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 5-9.
- TAO Q P. Investigation of biological effects of magnetic field and magnetic property difference of biological samples[D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2020: 5-9.
- [37] LI H D, XIE R N, XU X, et al. Static magnetic field inhibits growth of *Escherichia coli* colonies via restriction of carbon source utilization[J]. Cells, 2022, 11(5): 827.
- [38] 赵惠瑾. 磁场对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的影响及博弈模型构建[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021: 24-59.
- ZHAO H J. Effect of magnetic field on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* and construction of game model[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021: 24-59.
- [39] 徐悦. 脉冲磁场杀菌效果及对生活废水的处理和杀灭机理分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2023: 17-26.
- XU Y. Analysis of germicidal efficacy of pulsed magnetic field and its treatment of domestic wastewater and germicidal mechanism[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023: 17-26.
- [40] ARIFIANTO D, ASTUTI S D, PERMATASARI P A D, et al. Design and application of near infrared LED and solenoid magnetic field instrument to inactivate pathogenic bacteria[J]. Micromachines, 2023, 14(4): 848.
- [41] KOBAYASHI R, MITSUI Y, YOSHIKAWA Y, et al. Controlling the growth of yeast by culturing in high magnetic fields[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023, 586: 171193.
- [42] RODRÍGUEZ-PÉREZ E X, ÁLVAREZ DE LA PAZ L P, MONDRAGÓN-JAIME V A, et al. Proliferation of *Saccharomyces cerevisiae* exposed to pulsed magnetic fields of low intensity[J]. Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications, 2022, 34(1): 2150051.
- [43] 张咪. 脉冲磁场致单核细胞增生李斯特菌失活的作用机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019: 11-62.
- ZHANG M. Studies on the mechanism of the inactivation of *Listeria monocytogenes* treated by pulsed magnetic field[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019: 11-62.
- [44] BINHI V N, RUBIN A B. Theoretical concepts in magnetobiology after 40 years of research[J]. Cells, 2022, 11 (2): 274.

- [45] LENNICKE C, COCHEMÉ H M. Redox metabolism: ROS as specific molecular regulators of cell signaling and function[J]. *Molecular Cell*, 2021, 81(18): 3 691-3 707.
- [46] HORE P J, MOURITSEN H. The radical-pair mechanism of magnetoreception[J]. *Annual Review of Biophysics*, 2016, 45: 299-344.
- [47] LETUTA U G, BERDINSKIY V L, UDAGAWA C, et al. Enzymatic mechanisms of biological magnetic sensitivity[J]. *Bioelectromagnetics*, 2017, 38(7): 511-521.
- [48] ALBUQUERQUE W W C, COSTA R M P B, DESALAZAR E FERNANDES T, et al. Evidences of the static magnetic field influence on cellular systems[J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2016, 121(1): 16-28.
- [49] SERRANO G, MIRANDA-OSTOJIC C, FERRADA P, et al. Response to static magnetic field-induced stress in *Scenedesmus obliquus* and *Nannochloropsis gaditana*[J]. *Marine Drugs*, 2021, 19(9): 527.
- [50] HANINI R, CHATTI A, BEN GHORBEL S, et al. Role of sod gene in response to static magnetic fields in *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Current Microbiology*, 2017, 74(8): 930-937.
- [51] LETUTA U G, BERDINSKIY V L. Magnetosensitivity of bacteria *E. coli*: magnetic isotope and magnetic field effects[J]. *Bioelectromagnetics*, 2017, 38(8): 581-591.
- [52] BUCHACHENKO A L, ORLOV A P, KUZNETSOV D A, et al. Magnetic isotope and magnetic field effects on the DNA synthesis[J]. *Nucleic Acids Research*, 2013, 41(17): 8 300-8 307.
- [53] CROTTY D, SILKSTONE G, PODDAR S, et al. Reexamination of magnetic isotope and field effects on adenosine triphosphate production by creatine kinase[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(5): 1 437-1 442.
- [54] LETUTA U G, BERDINSKIY V L. Biological effects of static magnetic fields and zinc isotopes on *E. coli* bacteria[J]. *Bioelectromagnetics*, 2019, 40(1): 62-73.
- [55] OTERO L, RODRÍGUEZ A C, PÉREZ-MATEOS M, et al. Effects of magnetic fields on freezing: application to biological products[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(3): 646-667.
- [56] CIZMECIOGULLARI S, KESKIN Y, SAYBASILI N H, et al. Effects of static magnetic field on compound action potential of isolated frog sciatic nerve[J]. *Journal of Magnetism*, 2019, 24(4): 668-673.
- [57] D'AGOSTINO S, DELLA MONICA C, PALIZZI E, et al. Extremely high frequency electromagnetic fields facilitate electrical signal propagation by increasing transmembrane potassium efflux in an artificial axon model[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 9 299.
- [58] FELLNER A, STIENNON I, RATTAY F. Analysis of upper threshold mechanisms of spherical neurons during extracellular stimulation[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2019, 121(4): 1 315-1 328.
- [59] 李鑫. 脉冲磁场诱导色散球形细胞电穿孔的仿真研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022: 35-57.
- LI X. Simulation study of spherical unicellular electroporation with dispersion induced by pulsed magnetic fields[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022: 35-57.
- [60] 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(4): 429-435.
- [61] ZHENG J, ZENG X H, WANG S Q. Calcium ion as cellular messenger[J]. *Science China Life Sciences*, 2015, 58(1): 1-5.
- [62] QIAN J Y, FALL A N, ZHANG M, et al. Increase of intracellular Ca^{2+} concentration in *Listeria monocytogenes* under pulsed magnetic field[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 553: 169270.
- [63] QIAN J Y, CHEN S B, HUO S H, et al. Impact of pulsed magnetic field treatment on enzymatic inactivation and quality of cloudy apple juice[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(8): 2 982-2 991.
- [64] 胡星. 强静磁场对细菌的生物效应及其对偶氮染料降解的强化机制[D]. 上海: 上海大学, 2011: 1-6.
- HU X. The bio-effect of strong static magnetic field on bacteria and its enhancement mechanism on degradation of azo dyes[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011: 1-6.
- [65] WU P, QU W J, ABDUALRAHMAN M A Y, et al. Study on inactivation mechanisms of *Listeria grayi* affected by pulse magnetic field via morphological structure, Ca^{2+} transmembrane transport and proteomic analysis[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(9): 2 049-2 057.
- [66] CHITRAVATHI K, CHAUHAN O P. Pulsed magnetic field processing of foods[J]. *Non-thermal Processing of Foods*, 2019: 261-282.
- [67] 刘伟, 梁瑞红, 刘成梅, 等. 脉冲电磁场杀菌的作用机理及其应用[J]. *粮食与食品工业*, 2005, 12(1): 52-54.
- LIU W, LIANG R H, LIU C M, et al. Biological mechanisms and application of sterilization in electromagnetic field[J]. *Cereal and Food Industry*, 2005, 12(1): 52-54.
- [68] 骆新峥, 马海乐, 高梦祥. 脉冲磁场杀菌机理分析[J]. *食品科技*, 2004, 29(4): 11-13.
- LUO X Z, MA H L, GAO M X. Research on mechanism of sterilization by pulse magnetic field[J]. *Food Science and Technology*, 2004, 29(4): 11-13.
- [69] 骆新峥, 马海乐, 高梦祥. 牛初乳脉冲磁场杀菌试验[J]. *中国乳品工业*, 2004, 32(8): 22-23.
- LUO X Z, MA H L, GAO M X. Sterilization test colostrums

- by pulse magnetic field[J]. China Dairy Industry, 2004, 32(8): 22-23.
- [70] PHILLIPS J L, SINGH N P, LAI H. Electromagnetic fields and DNA damage[J]. Pathophysiology, 2009, 16(2/3): 79-88.
- [71] QIAN J Y, ZHOU C S, MA H L, et al. Proteomics analyses and morphological structure of *Bacillus subtilis* inactivated by pulsed magnetic field[J]. Food Biophysics, 2016, 11(4): 436-445.
- [72] 李浩东. 静磁场影响微生物生长的机制研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2022: 19-30.
- LI H D. Study of the mechanism by which the static magnetic field affects the growth of microorganisms[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2022: 19-30.
- [73] YANG S Y, ZHOU H Y, DAI W H, et al. Effect of static magnetic field on *Monascus ruber* M7 based on transcriptome analysis[J]. Journal of Fungi, 2021, 7(4): 256.
- [74] ZHANG W Y, WANG Y, ZHU X P, et al. Influence of alternating magnetic field on the quality of beef and its protein during cold storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(4): 1 741-1 753.
- [75] LINS P G, SILVA A A, PUGINE S M P, et al. Effect of exposure to pulsed magnetic field on microbiological quality, color and oxidative stability of fresh ground beef[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): e12405.
- [76] CHEN Y F, BASSEY A P, BAI Y, et al. Synergistic effect of static magnetic field and modified atmosphere packaging in controlling blown pack spoilage in meatballs[J]. Foods, 2022, 11(10): 1 374.
- [77] 李娜, 谢晶, 梅俊. 水产品优势腐败菌及致腐潜能综述[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 407-417.
- LI N, XIE J, MEI J. Review on dominant spoilage organism and spoilage potential of aquatic products[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 407-417.
- [78] TONG L, TANG H Q, CHEN J Y, et al. Origin of static magnetic field induced quality improvement in sea bass (*Lateolabrax japonicus*) during cold storage: Microbial growth inhibition and protein structure stabilization[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1066964.
- [79] 潘泳江, 谢正军, 金亚美, 等. 交变磁场对冷藏草鱼片品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 207-214.
- PAN Y J, XIE Z J, JIN Y M, et al. Effect of alternating magnetic field on quality of grass carp fillets during cold storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 207-214.
- [80] 赵海云, 邵林, 李涛, 等. 鲜切果蔬保鲜技术的研究进展[J]. 农产品加工, 2023(10): 81-90.
- ZHAO H Y, SHAO L, LI T, et al. Research progress of fresh-cut fruits and vegetables preservation technology[J]. Farm Products Processing, 2023(10): 81-90.
- [81] OH Y A, OH Y J, SONG A Y, et al. Comparison of effectiveness of edible coatings using emulsions containing lemongrass oil of different size droplets on grape berry safety and preservation[J]. LWT, 2017, 75: 742-750.
- [82] 刘帆. 磁场对草莓果实冷藏品质和生理代谢的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 18-51.
- LIU F. Effects of magnetic field on quality and physiological metabolism of strawberry[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 18-51.
- [83] BANG J, HONG A, KIM H, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in biofilm on food-contact surfaces by sequential treatments of aqueous chlorine dioxide and drying[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 191: 129-134.
- [84] CUI H Y, MA C X, LIN L. Co-loaded proteinase K/thyme oil liposomes for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 biofilms on cucumber[J]. Food & Function, 2016, 7(9): 4 030-4 040.
- [85] CHENG R M, CHUREY J J, WOROBO R W. Inactivation of *Salmonella enterica* and spoilage microorganisms in orange juice treated with dimethyl dicarbonate (DMDC) [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 285: 152-157.
- [86] SANTHIRASEGARAM V, RAZALI Z, SOMASUNDRAM C. Effects of thermal treatment and sonication on quality attributes of Chokanan mango (*Mangifera indica* L.) juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(5): 1 276-1 282.
- [87] QIAN J Y, YAN G M, HUO S H, 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.
- [88] LIN L, WANG X L, HE R H, 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.