

磁场辅助冷冻技术在食品中的应用研究进展

侯倩，丁林欢，张虹虹，魏启航，邱泽华，韩宛静，孙钦秀，刘书成

Advance on the Application of Magnetic Field-assisted Freezing Technology in Food

HOU Qian, DING Linhuan, ZHANG Honghong, WEI Qihang, QIU Zehua, HAN Wanjing, SUN Qinxiu, and LIU Shucheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010119>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双酚S的毒理学效应及其作用机制的研究进展

Research progress on toxicological effects and mechanism of bisphenol S

食品工业科技. 2018, 39(2): 344-351 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.063>

荧光标记免疫层析技术在食品安全检测中的应用研究进展

Progress of application of immunochromatographic technology labeled with fluorescence element in food safety detection

食品工业科技. 2018, 39(2): 314-319 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.058>

代谢组学技术在葡萄生理研究中的应用

Application of metabolomics techniques in grape physiology

食品工业科技. 2018, 39(3): 338-342,352 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.03.065>

燕麦在乳制品中的应用及其研究进展

Application and research progress of oat in dairy products

食品工业科技. 2018, 39(1): 342-346 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.01.063>

乳铁蛋白生理活性及作用机理研究进展

Research Progress on Physiological Activity and Mechanism of Lactoferrin

食品工业科技. 2021, 42(9): 388-395 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060152>

核酸适配体在海洋微生物及海洋生物毒素识别鉴定中的应用研究进展

Advances in application of aptamers in identification of marine microorganisms and marine toxins

食品工业科技. 2018, 39(2): 320-324,330 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.059>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

侯倩, 丁林欢, 张虹虹, 等. 磁场辅助冷冻技术在食品中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 360–367. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010119

HOU Qian, DING Linhuan, ZHANG Honghong, et al. Advance on the Application of Magnetic Field-assisted Freezing Technology in Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 360–367. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010119

· 专题综述 ·

磁场辅助冷冻技术在食品中的应用研究进展

侯 倩¹, 丁林欢¹, 张虹虹¹, 魏启航¹, 邱泽华¹, 韩宛静¹, 孙钦秀^{1,2,*}, 刘书成^{1,2}

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东省海洋生物制品工程重点实验室, 水产品深加工广东普通高等学校重点实验室, 广东湛江 524088;

2. 大连工业大学, 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 冷冻是保藏食品常用且有效的方法之一。但在传统冷冻过程中, 生成的大冰晶会破坏食品组织, 导致品质劣变, 因此如何利用新型冷冻技术改善冷冻食品的品质成为研究的热点。磁场辅助冷冻技术是一种新型的调控冰晶成核技术。本文综述了磁场调控冰晶成核的机制, 重点阐述了磁场冷冻在果蔬、畜禽肉、谷物等食品领域的应用。综述结果发现, 虽然磁场冷冻技术在多种食品领域有所应用, 但目前研究主要集中于磁场对冷冻食品品质及冷冻参数的影响, 而磁场辅助冷冻调控冰晶成核的机制目前尚无统一结论, 仍需科研者进一步系统地研究揭示磁场冷冻的作用机制, 推动磁场辅助冷冻技术在食品领域的应用, 促进冷冻食品品质的提升。

关键词: 磁场辅助冷冻, 食品, 作用机制, 应用

中图分类号: TS205.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0360-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010119

本文网刊:



Advance on the Application of Magnetic Field-assisted Freezing Technology in Food

HOU Qian¹, DING Linhuan¹, ZHANG Honghong¹, WEI Qihang¹, QIU Zehua¹, HAN Wanjing¹, SUN Qinxiu^{1,2,*}, LIU Shucheng^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Food, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution, Zhanjiang 524088, China;

2. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Freezing is one of the most common and effective method of preserving food. However, the formation of large ice crystals during traditional freezing process will destroy food tissues and lead to quality deterioration. Therefore, how to improve the quality of frozen food by new freezing technology has become a research hotspot. Magnetic field-assisted freezing is a novel method for controlling ice crystal nucleation. The mechanism of magnetic field-regulated ice crystal nucleation and its applications in the fields of fruits and vegetables, livestock and poultry meat, cereals and other food products are reviewed in the present paper. According to the review results, although magnetic field freezing technology has been applied in many food fields, the current research mainly focuses on the effect of magnetic field on frozen food quality and freezing parameters, while there are few consensus on the mechanism of magnetic field-assisted freezing to regulate ice crystal nucleation. Therefore, more systematic research is required to reveal the mechanism of magnetic field-assisted freez-

收稿日期: 2023-01-16

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金面上项目 (2023A1515011513); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202210566006); 广东省科技创新战略专项资金 (2022A05036)。

作者简介: 侯倩 (2001-), 女, 本科, 研究方向: 水产品加工, E-mail: hq11020504@163.com。

* 通信作者: 孙钦秀 (1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品冷冻新技术, E-mail: sunqinxuogo@163.com。

ing and promote the application of magnetic field-assisted freezing technology in the food field, to promote the quality of frozen food.

Key words: magnetic field-assisted freezing; food; mechanism of action; application

冷冻贮藏是目前食品工业中贮藏食品、延长食品货架期最有效且应用最广泛的方法之一^[1]。但传统冷冻方法在冻结时会生成大而不均匀的冰晶, 这通常是导致食品质量下降的关键因素。不规则冰晶对食品细胞结构造成不可逆的损害, 导致食品营养、感官和品质的损失^[2-3]。因此急需寻找高质化的冷冻方法改善冷冻食品的品质损失。近年来, 一些新型调控冰晶成核技术(如电场、磁场、超声、高压等)被证明可以促进小冰晶生成, 改善冷冻食品品质^[4-7]。其中, 磁场辅助冷冻技术因其清洁无污染、能耗低、操作方便等优势而备受关注^[8]。已有许多研究表明, 磁场辅助冷冻技术能够影响冰晶成核, 生成小尺寸冰晶。Jin 等^[9]发现磁场能够使 NaCl 溶液的成核时间增加, 相变时间缩短。单亮亮等^[10]也发现, 在磁场作用下, 水的冰晶尺寸有所减小。而刘兴文等^[11]通过对热力学原理进行研究, 证实了磁场能够减小冰晶成核的临界半径。然而, 磁场辅助冷冻技术在食品冷冻中的应用研究近些年才发展起来, 磁场调控冰晶成核理论尚处于探索阶段。

因此, 本文对磁场辅助冷冻的机制以及当前磁场在食品冷冻的应用进行了综述, 总结了当前磁场辅助冷冻技术在食品领域的研究成果并分析了目前尚未解决的问题, 以期为磁场辅助冷冻技术在食品工业的应用与发展提供参考。

1 磁场辅助冷冻技术简介

磁场(magnetic fields, MFs)可分为恒定磁场(或静磁场)和可变磁场两种类型。恒定磁场(static magnetic field, SMF)也称永磁场, 是一种不随时间改变强度和方向的磁场。可变磁场包括振荡磁场和脉冲磁场。振荡磁场(oscillating magnetic field, OMF)属交变磁场, 其强度和方向都随着时间发生变化。而脉冲磁场(pulsed magnetic field, PMF)是一种间歇式出现的磁场类型, 可以根据实际情况调节磁场的频率, 磁场强度能够轻易达到静磁场数倍^[12], 因此具有极大的应用潜力。但目前为止, 脉冲磁场更多应用于食品保鲜领域, 较少应用于食品冷冻领域, 因此以下将主要针对静磁场和振荡磁场辅助冷冻食品的机制假说进行总结。

1.1 磁场辅助冷冻作用机制

水在食品中占比极大, 并对食品的物理化学性质起着重要作用。而冷冻过程中, 生成冰晶的大小及分布都与食品内水分分布有关。因此, 水变成冰这一相变过程是影响食品最终质量的重要阶段^[13]。当前研究表明, 磁场辅助冷冻可以通过增加水分子的过冷度来改善冰晶大小、形态和分布状况的均匀性, 进而影响冰晶成核过程^[14-15], 改善冻品品质。基于此, 许

多研究者通过研究磁化水的机制, 探索磁场对冰晶成核的影响, 从而进一步研究磁场辅助冷冻技术的作用机制。然而, 尽管目前对于磁场影响冰晶成核的机制已有许多假说, 但其科学机制尚无统一论。

从分子的微观结构上看, 物质的磁性源于原子的磁矩, 轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和即为原子的净磁矩。水分子中含有的电子都具有磁矩, 由于它们是成对电子且运动方向相反, 所以水分子的磁矩相互抵消, 整体上水不具有本征磁偶极矩。而静磁场和振荡磁场对水分子的影响并不相同, 当施加静磁场时, 水分子改变了无规则的排列分散状态, 在磁场的反方向产生了磁矩, 如图 1 所示^[16]。水分子由无序变有序, 并且顺着施加的磁场方向排布, 削弱了分子与分子之间的结合, 使大分子水团簇难以形成, 导致初始成核温度降低。水在磁化后定向排列将导致水形成冰晶的难度加大, 冰晶生成减少, 食品冷冻过程中的组织损伤随之减少。

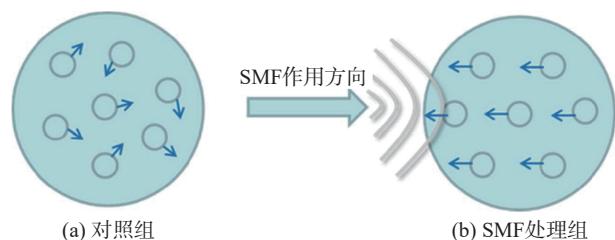


图 1 SMF 水分子分布示意图^[16]

Fig.1 Schematic of the water molecules distribution with SMF^[16]

交变磁场(alternating magnetic field, AMF)由交流电产生, 其电流方向产生周期性变化, 使磁场的方向也绕着磁力线的中心做方位角旋转运动。如图 2 所示^[16], 水分子将随着交变磁场方向的不同而改变运动方向。与静磁场作用机制不同, 交变磁场使水分子不断运动, 增大了水分子之间结合的可能性, 从而提高了水分子形成冰晶的能力, 说明交变磁场影响了水分子的过冷度。此外交变磁场能够加速传热, 实现快速冷却^[17]。因此施加交变磁场后水分子的成核温度提高, 相变时间减少, 缩短了冻结时间, 且食品基质中水分的冷冻结晶过程能够得到控制, 从而改善了冷冻

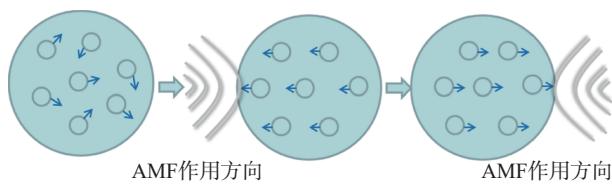


图 2 AMF 水分子分布示意图^[16]

Fig.2 Schematic of the water molecules distribution with AMF^[16]

食品的品质。

磁场的作用机制也可以从水分子间氢键的角度进行阐述, 氢键作用的改变也将影响水的性质。根据 SENESI 等^[18]的研究结果, 分子间氢键相互作用的强度在过冷相中增加, 水分子在冰形态时具有比过冷水形态更强的氢键。因此不少研究人员认同磁场能够改善冻品品质可能与冷冻过程中水的氢键增强有关^[19~21]。但也有学者认为磁场会导致水的氢键弱化。例如, WANG 等^[22]在考虑水分子极性的前提下, 认为水的部分带电原子能够在外界磁场作用下通过热运动产生洛伦兹力, 由于水的正负电荷中心受力方向相反, 两个电荷中心之间的距离在洛伦兹力作用下不断增加, 这一改变削弱了氢键。氢键越弱, 说明摩擦系数越低, 越难形成大分子水团簇。而 PANG 等^[23~25]推断洛伦兹力的产生与封闭氢键链受到外界磁场的干扰有关, 同时发生质子转移, 产生了“环电流”元件, 打破了氢键原有平衡状态, 并与外加磁场相互作用, 使氢键重新定位、形成和断裂。水分子分布改变后, 磁化水的物理化学性质发生相应变化。顿珠次仁^[26]也报道了同样的结论。另外有观点认为, 施加磁场会破坏水团簇内氢键, 但水团簇间的氢键作用力有所增强^[27]。尽管许多研究结论存在差异, 但以上观点都认为, 磁场确实能够影响水分子的氢键网络结构, 从而一定程度上影响磁化后水的性质。

2 磁场辅助冷冻技术在果蔬中的应用

经过近几年的研究发展, 磁场辅助冷冻技术不断完善, 并且在果蔬领域已有一定的研究成果(表 1)。目前, 多数研究结果显示, 静磁场、振荡磁场和交变磁场都能够改善果蔬冷冻后的品质。研究者发现, 磁场可以促进相变, 防止冷冻时生成不规则大冰晶, 减少果蔬因冷冻损伤导致的汁液流失, 例如, 宋健飞等^[28]使用不同强度的静磁场探究其对洋葱冻结过程的影响, 其细胞的显微图像显示(图 3), 洋葱冷冻过程形成的鳞片状冰晶尺寸随磁场强度增大而减小, 且与对照组相比鳞片状更明显, 说明磁场抑制了洋葱冷

冻过程中大冰晶的生长, 减少了细胞损伤, 且磁场强度越大, 效果越显著。而 KANG 等^[29]研究发现, 使用 50 mT 的振荡磁场能够防止鲜切芒果片质量的劣变, 并提高其过冷态的稳定性。PANAYAMPADAN 等^[30]则通过研究发现 7.02 mT 的交变磁场可以减少番石榴块冷冻过程的相变时间和解冻后的汁液流失, 能够更好地保持其原有的质地特性。

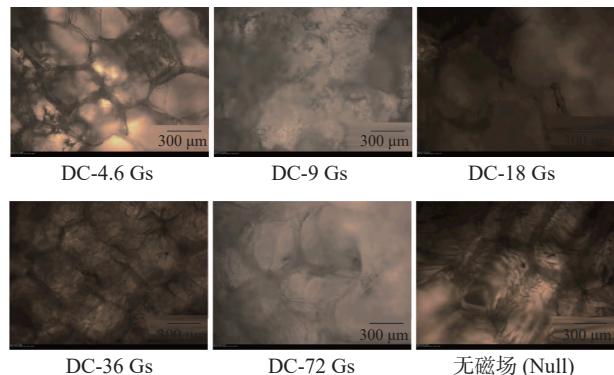


图 3 洋葱在直流磁场下冻结终温时刻的显微图像^[28]

Fig.3 Microscopic image of an onion at the end of Terminal temperature in a DC magnetic field^[28]

事实上, 也有研究显示磁场对于改善冷冻果蔬的品质并无作用。OTERO 等^[31]观察了静磁场(40~55 mT 和 150~200 mT)作用下马铃薯样品冷冻过程中的相变情况, 并未发现静磁场对样品在冷冻过程中的品质参数有显著影响。但该研究使用的磁场强度较大, 根据磁场的窗口效应和阈值效应^[32], 磁场并非越大越好, 需要处于特定的范围才能产生作用。

因此, 不同的磁场参数及样品差异对磁场的作用效果都存在影响。无论是磁场种类、磁场强度大小、冷冻速度或是样品本身特性都是试验的重要因素。TANG 等^[33]对蓝莓分别使用静磁场和交变磁场进行冷冻实验, 结果表明, 10 mT 的静磁场能够提高蓝莓的过冷度。而交变磁场的样品除相变时间外, 其余参数均无显著差异, 且相变时间随着磁场强度增加而增加, 但不能因此判断交变磁场不具有改善冻品品

表 1 磁场辅助冷冻在果蔬中的应用

Table 1 Magnetic field assisted freezing in fruit and vegetables

处理对象	磁场类型	磁场参数	处理条件	作用效果	参考文献
猕猴桃、樱桃	静磁场、交变磁场	静磁场: 0~200 G 交变磁场: 0~20 G	样品的冻结终温为 -30 ℃	冰晶面积减小 50% 以上, 改善了产品品质	[34]
洋葱	静磁场	4.6、9、18、36、72 G	样品的冻结终温为 -25 ℃	冰晶尺寸减小, 减少了对细胞的损伤	[28]
芒果片	振荡磁场	50 mT	样品中心温度达到 -18 ℃	提高了过冷度延长的概率, 利于延长储存时间	[29]
番石榴	交变磁场	2.4~8.8 mT	样品冻结终温为 -25 ℃	相变时间减少, 冷冻速度提高, 品质能够保持	[30]
马铃薯	静磁场	40~55 mT; 150~200 mT	样品中心温度达到 -20 ℃	磁场不影响样品的过冷和热传递, 解冻损失、质地及颜色无显著改善	[31]
蓝莓	静磁场、交变磁场	静磁场: 0~10 mT 交变磁场: 0~1.74 mT	样品冻结终温为 -30 ℃	静磁场组: 成核温度和冷冻温度降低, 通过最大冰晶生成区时间和相变时间减少; 交变磁场组: 相变时间增大, 不利于保证食品品质, 其余冻结参数无显著变化	[33]
苹果、马铃薯	振荡磁场	CAS 机参数: 0、25%、50%、75% 和 100%	样品冻结温度在 -25 ℃ 以下	CAS 设置对任何测量参数无显著影响	[35]
芒果	振荡磁场	CAS 机参数: 0、30%、50%、75% 和 100%	样品冷冻 35 min, 解冻 70 min	品质无显著改善, 冻融样品细胞壁有破裂现象	[36]

质的优势。在该研究中, 当达到合适的交变磁场强度(0.05 mT)时能够有效降低成核温度。然而交变磁场强度的持续增大会导致水分子的剧烈振动, 加剧水分子之间的摩擦, 产生更多热量, 成核温度提高。此外, 交流电强度的持续增加也不可避免地产生了额外热量, 这些都将影响交变磁场改善冰晶尺寸的作用效果。冷冬梅等^[34]则在猕猴桃和樱桃的冷冻过程中分别施加不同强度的静磁场和交变磁场, 从微观层面评价了磁场对二者的影响。结果显示, 处理组冰晶面积相比对照组都减少了 50% 以上, 而猕猴桃减少的冰晶面积均大于樱桃。该研究结果的差异可能与样品的含水量不同有关, 含水量的差异导致了冻结特性的不同, 所以最佳磁场参数并不一致。

此外, 部分研究者使用 CAS(细胞存活系统)冷冻机辅助冷冻果蔬, 但大多数实验结果都显示 CAS 冷冻机提供的振荡磁场无法改善冻品品质。PURNELL 等^[35]使用 CAS 冷冻机研究不同振荡磁场的冷冻设置对苹果和马铃薯样品品质参数的影响, 发现振荡磁场对样品的影响并不均一, 结果难以实现重复, 同时, 样品品质没有得到显著改善。同样地, PUZA 等^[36]利用 CAS 冷冻机观察振荡磁场对芒果冷冻后品质的影响, 实验结果显示, 冻融后芒果的细胞壁出现破裂现象, 作者猜测可能是冰晶的生成破坏了细胞组织。虽然以上研究结果显示 CAS 冷冻机无法优化冷冻进程并改善冻品品质, 但不能说明 CAS 冷冻机对所有食品都不具有积极作用。CAS 冷冻机能够提供的振荡磁场强度和频率范围较窄, 弱振荡磁场可能不会对所有食品都产生效果, 还需考虑不同食品之间的差异及环境因素对实验产生的综合影响。

3 磁场辅助冷冻技术在畜禽肉类中的应用

除了果蔬类食品, 也有许多研究以畜禽产品作为磁场辅助冷冻技术的对象。由于动物肌肉组织比植物组织更加细小, 在冷冻过程中维持其组织结构的完整性难度就更大, 因此许多研究者致力于寻找能够改善其冷冻保鲜效果的合适的磁场参数(表 2), 以推进磁场辅助冷冻技术在食品中的应用。目前已有研

究发现, 静磁场在畜禽产品冷冻中的作用效果要优于振荡磁场。TANG 等^[16]使用静磁场和交变磁场辅助冷冻猪肉样品, 发现两种磁场均能提高猪肉的过冷度, 但静磁场降低猪肉成核温度以及维持过冷状态的效果更优, 能耗更低, 这可能与不同类型磁场处理下水分子的相互作用机制不同有关。此外, 使用交变磁场时, 磁线圈工作产生的热量会影响冻品品质。

磁场强度的选择对畜禽肉类冷冻后品质也有较大影响, 磁场强度过高或过低都会影响磁场的作用效果, 甚至产生副作用, 这可能与生物磁效应有关。生物的磁性是普遍存在的, 所以磁场会影响生物体的组织活性。当选择的磁场参数无法引起生物体的生理生化变化时, 将不能对冻品品质产生影响。赵红霞等^[37]在猪肉冷冻过程中施加静磁场, 研究结果表明, 虽然 0.46 mT 的磁场能够提高猪肉冷冻速率, 但在 0.9 和 1.8 mT 的磁场处理下猪肉冷冻时间延长, 不利于保持猪肉品质。而 WANG 等^[38]发现, 选择适宜的静磁场强度能够缩短冷冻时间, 促进牛肉冷冻过程, 但磁场强度持续增大将抑制其冷冻的过程, 对品质不利。

另外, 近几年在畜禽肉类的研究中, 除了单独使用磁场辅助冷冻外, 一些研究者还探索了磁场联合其他冷冻技术协同辅助冷冻畜禽肉类的作用效果, 发现其比单独使用磁场改善冷冻产品的品质更具优势。MOK 等^[39]使用脉冲电场和振荡磁场复合处理鸡胸肉, 并与冷藏(4 °C)、冷冻(-7 °C)处理的样品对比发现, 复合场处理后的鸡胸肉过冷度增加了 4 °C, 且无明显的物理损害以及化学变化。这可能是因为脉冲电场和振荡磁场组成的复合场能够通过协同作用影响水分子的流动性, 避免增加水分子的振动延长样品过冷状态, 从而生成了微小冰晶。此外, 电场具有一定保鲜作用, 可以更好地保证冻品质量。而 HU 等^[40]利用红外加热预脱水结合磁场协同冷冻牛肉, 发现对比普通冷冻组、磁场冷冻组和预脱水冷冻组, 复合处理组得到的牛肉质量最优, 解冻后的肌原纤维蛋白热稳定性更好。由于冻结之前进行预脱水减少了冻品生成的冰晶面积, 对细胞结构的破坏较小, 同时结合磁场冷冻技术, 能够进一步加快冷冻速度, 缩短冻结

表 2 磁场辅助冷冻在畜禽肉类中的应用

Table 2 Magnetic field assisted freezing in livestock and poultry meat

处理对象	磁场类型	磁场参数	处理条件	作用效果	参考文献
猪肉	静磁场、交变磁场	静磁场: 0~16 mT 交变磁场: 0~1.8 mT, 50 Hz	样品冻结终温为 -30 °C	缩短相变时间和过冷时间, 改善冷冻后样品质量	[16]
	静磁场	0.46 mT	速冻室温度为 -35 °C	猪肉冷冻速率提升	[37]
	振荡磁场	CAS 参数: 0、10%、50% 和 100%(0.04~0.53 mT)	样品冻结终温为 -30 °C	对猪肉的冷冻特性和品质无明显优势	[41]
牛肉	静磁场	50~150 G	样品中心温度达到 -18 °C (设置冰箱温度在 -30 °C 或以下)	40 G 和 50 G 磁场强度促进牛肉冷冻过程, 100~150 G 磁场强度对冷冻过程有明显的抑制作用	[38]
	红外加热预脱水、静磁场	5 mT	样品中心温度达到 -18 °C	冷冻时间缩短, 肌原纤维蛋白的热稳定性保持良好, 脂质氧化减少, 更好地保持了样品品质	[40]
鸡胸肉	脉冲电场、振荡磁场	50~100 mT, 1 Hz	-7 °C (±0.5)	延长了样品过冷状态, 与新鲜样品相比无显著变化	[39]

时间,因此对样品造成的冷冻损伤较少。由此可见,磁场联合其他技术具有一定潜力,能够为磁场在食品领域中的应用提供新思路。

4 磁场辅助冷冻技术在水产品中的应用

当前在磁场辅助冷冻食品的研究中,与水产品相关的研究内容还较为缺乏。但随着磁场辅助冷冻技术逐渐成为研究的焦点,其对水产品的冷冻保鲜作用也在逐步积累实践经验。目前已有的研究发现,静磁场对于改善鲤鱼和罗非鱼的品质有积极影响^[42-43]。经静磁场处理后,样品的冷冻速度和微观结构等方面有显著改善,能够保持冷冻后的品质。但还可以扩大选择的磁场范围,以更明确静磁场的作用效果和最佳磁场强度。最近,ZHOU 等^[44]研究了 0~80 mT 静磁场对金鲳鱼肌肉品质的影响,并明确了磁场最佳效果将在相对狭窄的阈值内体现的结论。

另外,当前较多使用振荡磁场应用于水产品的冷冻(表 3),研究者发现振荡磁场能够改善水产品冷冻过程中的冰晶成核,减少组织损伤。OKUDA 等^[45]使用 0.1~0.5 mT 的振荡磁场辅助冷冻鲭鱼,实验结果表明振荡磁场能够缩短鲭鱼的冷冻时间,并在冷冻过程中抑制冰晶生成,减少机械损伤,改善了鲭鱼的冷冻品质。此外,WEI 等^[46]使用 10~50 G 的交变磁

场辅助冷冻罗非鱼,样品经不同强度磁场冷冻处理后所得微观结构如图 4 所示,前三行分别表示背部、腹部和尾部,结果发现磁场能够减少罗非鱼样品不规则冰晶的数量,并且不同的部位磁场作用效果存在差异,由此可见磁场强度以及样品的特征结构和成分都是探究磁场作用效果的要素。

而 OTERO 等^[47]通过使用 CAS 系统,研究振荡磁场辅助冷冻对蟹肉棒的质量影响,并未发现蟹肉棒的品质受磁场显著影响。但蟹肉棒品质不受磁场影响可能是该团队选择的磁场范围较窄(<2 mT),也可能与实验过程中未使用到均匀磁场有关^[48]。WANG 等^[48]在设计实验时则考虑到了磁场的均匀性,在鱼糜冷冻期间施加了均匀的振荡磁场,发现与未处理组相比,磁场处理组的解冻损失减少,鱼糜的持水能力有所提高。另外,该团队还发现在样品中添加铁补充剂能够通过电磁感应对磁场作用效果产生积极影响,增强了磁场对鱼糜冻融过程的作用,样品受到的机械损伤最小。综上可知,磁场在水产品领域的研究也更倾向于参数的探索,但该领域样本量较少,磁场参数各异,还需要深入研究。

5 磁场辅助冷冻技术在谷物产品中的应用

谷物产品含有丰富的碳水化合物,是人体能量

表 3 磁场辅助冷冻在水产品中的应用
Table 3 Magnetic field assisted freezing in aquatic products

处理对象	磁场类型	磁场参数	处理条件	作用效果	参考文献
鲤鱼	静磁场	0~11 G	设置冷冻室温度为-35 ℃	对冻结点几乎无影响,促进相变阶段,延缓冷冻过程	[42]
蟹肉棒	振荡磁场	<2 mT, 6~59 Hz	样品中心温度达到-20 ℃	对冷冻样品质量无影响	[47]
鱼糜	振荡磁场	4 mT, 50 Hz	设置冷冻室温度为-20 ℃	解冻损失减少,持水能力提高	[48]
金鲳鱼	静磁场	0~80 mT	样品中心温度达到-18 ℃	肌肉组织损害减少,良好地保持了肌肉品质	[44]
鲭鱼	振荡磁场	0.1~0.5 mT	样品中心温度达到-50 ℃	缩短冷冻时间,抑制组织冰晶损伤,较好地改善了冷冻样品品质	[45]
罗非鱼	静磁场	0~30 G	设置冰箱温度为-35 ℃	在样品冷冻速度、水分迁移和微观结构等方面起优势作用, 对样品品质有积极影响	[43,46]
	振荡磁场	10~50 G	设置冰箱温度为-35 ℃	冰晶面积减小,肌肉组织的损伤减少,改善了样品冷冻品质	

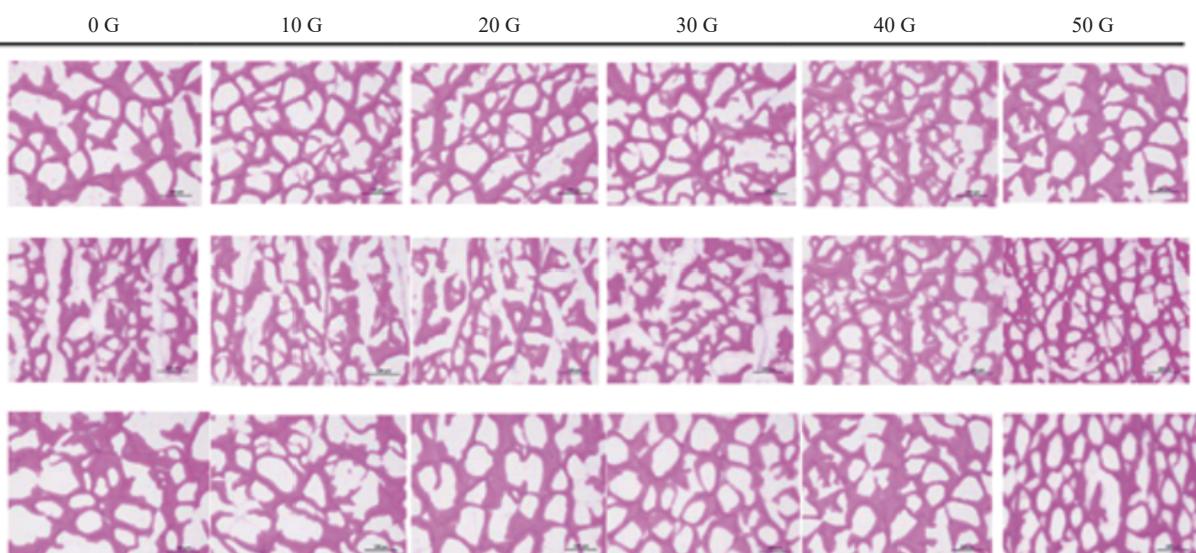


图 4 不同强度磁场下罗非鱼冷冻切片^[46]

Fig.4 Frozen sections of tilapia under magnetic fields of different strengths^[46]

的重要来源, 但其易老化, 保质期较短, 所以部分谷物产品使用低温保藏法来延长保质期限, 如面团, 将其进行冷冻处理能够抑制老化现象, 并且熟化后即可用来制作方便卫生的新鲜面食制品^[49]。但面团在冷冻贮藏过程中微观结构将发生变化, 淀粉也会出现低温损伤现象^[50], 这对冷冻面团及其再加工产品的质量造成了许多不利影响, 因此如何改善谷物产品冷冻后品质也成为了备受关注的热点之一。

有研究者将磁场辅助冷冻技术应用于谷物产品中, 探索其改善谷物产品冷冻后品质的效果。根据 ZHOU 等^[51] 的最新研究显示, 2 mT 的静磁场能够抑制谷蛋白大聚合物的解聚, 解决了冷冻面团中面筋蛋白粘弹性下降的问题。作者还发现静磁场可以抑制面团中的水分迁移, 能够通过减少冻融循环过程中水的流动抑制冰晶生长, 并提高了面团中酵母的存活率, 改善了冷冻面团质量。另外, 也有研究发现磁场可以改善冷冻谷物熟制品复热后的品质。潘治利等^[52] 研究了磁场改善冷冻熟制面条品质的作用效果, 通过对各品质指标发现, 12 Gs 处理下的冷冻熟制面条冻结速率最快, 淀粉分子老化程度最低, 改善品质效果最佳。并且吴阳阳等^[53] 还发现磁场可以改善冷冻熟制面条冻藏期间的品质。但由于目前该领域的研究数据缺乏, 研究开展工作较少, 因此, 磁场改善谷物产品品质的具体成效还需更多试验研究。

6 总结与展望

本文综述了已有研究中磁场辅助冷冻技术的作用机制, 并总结了近年来该技术在食品领域的研究成果。通过综述可知, 许多研究为磁场辅助冷冻技术的应用提供了理论支撑, 并且多数研究发现, 磁场能够减小冰晶尺寸, 缩短相变时间, 改善冻品品质。但也有研究因食品本身特性、参数的不同和设备带来的环境温度的不稳定等原因得出了相反的结论。另外, 当前成果主要集中在果蔬和畜禽肉类, 其他的食品领域如水产品、谷物产品等, 相关的研究数据并不充分, 因此统计实验数据的结果存在一定偏差。

此外, 当下更多的研究聚焦于探索磁场辅助冷冻不同食品的最优参数, 而对于磁场技术改善冻品品质的作用机制并不明晰, 虽然不少研究者从水的角度对磁场的作用机制进行了阐述, 但是意见并不统一, 能够确定的是磁场能够影响水的氢键网络, 改变水分子的原有性质。并且在磁场辅助冷冻的研究中, 相关的机制说明更多是基于对实验现象的猜测, 而不同实验重现性较差, 不能够系统说明磁场的作用机制。因此, 在后续的研究工作中需要综合考虑磁场特性、磁场种类、使用设备、食品种类以及环境等因素, 进行更严谨的实验设计, 从而更系统地揭示磁场的作用规律, 推动磁场辅助冷冻技术在食品领域的应用, 以促进食品工业的发展。

参考文献

- [1] 杨燕, 李娜, 袁训锋. 速冻保鲜过程中冰晶生长形态研究[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(5): 55–59. [YANG Y, LI N, YUAN X F. Study on morphology of ice crystal growth during quick-freezing preservation process[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2020, 56(5): 55–59.]
- [2] 孙国皓. 食品冷冻技术研究现状及进展[J]. 食品安全导刊, 2021(12): 3. [SUN G H. Research status and progress of food freezing technology[J]. China Food Safety Magazine, 2021(12): 3.]
- [3] JHA P K, LE-BAIL A, JUN S. 10-Recent advances in freezing processes: An overview[M]. Food Engineering Innovations Across the Food Supply Chain. United States: Academic Press, 2022.
- [4] CHAKKA AK, SRIRAKSHA MS, RAVISHANKAR CN. Sustainability of emerging green non-thermal technologies in the food industry with food safety perspective: A review[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112140.
- [5] LU N, MA J, SUN D W. Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: Mechanisms, techniques and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 63–85.
- [6] 张虹虹, 苏江鹏, 张俨, 等. 提高冷冻水产品品质的新型速冻技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 6. [ZHANG H H, SU J P, ZHANG Y, et al. Development of novel quick-freezing techniques to improve quality of frozen aquatic products[J]. Food Research and Development, 2021, 42(22): 6.]
- [7] 张亚瑾, 焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021(1): 215–221. [ZHANG Y J, JIAO Y. Research status and prospect of freezing and thawing technologies of aquatic products[J]. Food & Machinery, 2021(1): 215–221.]
- [8] MIÑANO H, SILVA A, SOUTO S, et al. Magnetic fields in food processing perspectives, applications and action models[J]. Processes, 2020, 8(7): 814.
- [9] JIN S, SUN S, JIANG X, et al. Effect of static magnetic field on the freezing process of deionized water and 0.9% NaCl solution[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14663.
- [10] 单亮亮, 刘斌. 电磁场对水及其盐溶液的冻结影响[J]. 制冷, 2017, 36(1): 29–35. [SHAN L L, LIU B. Effects of electromagnetic field on the freezing of water and its salt solution[J]. Refrigeration, 2017, 36(1): 29–35.]
- [11] 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 effect of static magnetic field on ice crystals nucleation process[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2018, 46(3): 84–89, 94.]
- [12] 汪滢, 史慧新, 伍志刚, 等. 磁场与食品保鲜研究进展[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 62–74. [WANG Y, SHI H X, WU Z G, et al. Research progress on magnetic field and food preservation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 62–74.]
- [13] LI Y M, LIN H F, YANG Z D. The effect of magnetic field on freezing point of water[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2194(1): 012034.
- [14] ABIE S M, D MÜNCH, EGELANDSDAL B, et al. Combined 0.2 T static magnetic field and 20 kHz, 2 V/cm square wave electric field do not affect supercooling and freezing time of saline solution and meat samples[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 311: 110710.
- [15] SUTARIYA S G, SUNKESULA V. Food freezing: Emerging techniques for improving quality and process efficiency a comprehensive review[M]. United States: Innovative Food Processing

- Technologies, 2021.
- [16] TANG J, SHAO S, TIAN C. Effects of the magnetic field on the freezing parameters of the pork[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 107: 31–38.
- [17] KAUR M, KUMAR M. An innovation in magnetic field assisted freezing of perishable fruits and vegetables: A review[J]. *Food Reviews International*, 2020, 36(8): 761–780.
- [18] SENESI R, FLAMMINI D, KOLESNIKOV A I, et al. The quantum nature of the OH stretching mode in ice and water probed by neutron scattering experiments[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2013, 139(7): 074504.
- [19] CHANG K T, WENG C I. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(4): 043917.
- [20] CAI R, YANG H, HE J, et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2009, 938(1): 15–19.
- [21] ZHANG G, ZHANG W, DONG H. Magnetic freezing of confined water[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2010, 133(13): 134703.
- [22] WANG Y, ZHANG B, GONG Z, et al. The effect of a static magnetic field on the hydrogen bonding in water using frictional experiments[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2013, 1052: 102–104.
- [23] PANG X F, JALBOUT A F. Conductivity properties of the proton transfer exposed in externally applied fields in hydrogen-bonded systems[J]. *Physics Letters A*, 2004, 330(3): 245–253.
- [24] PANG X F, SHEN G F. The changes of physical properties of water arising from the magnetic field and its mechanism[J]. *Modern Physics Letters B*, 2013, 27(31): 1350228.
- [25] PANG X F. The conductivity properties of protons in ice and mechanism of magnetization of liquid water[J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2006, 49(1): 5–23.
- [26] 顿珠次仁. 磁场和冷冻作用对水团簇特性及 Cu(Ⅱ)跨膜行为的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. [DUNZHU C R. Magnetic field and freezing on the structural properties of water and trans-membrane behavior of Cu(Ⅱ)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.]
- [27] TOLEDO E J L, RAMALHO T C, MAGRIOTIS Z M. Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2008, 888(1): 409–415.
- [28] 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.]
- [29] KANG T, YOU Y, HOPTOWIT R, et al. Effect of an oscillating magnetic field on the inhibition of ice nucleation and its application for supercooling preservation of fresh-cut mango slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 300: 110541.
- [30] PANAYAMPADAN A S, SHAFIQ A M, ASLAM R, et al. Effects of alternating magnetic field on freezing of minimally processed guava[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 163: 113544.
- [31] OTERO L, POZO A. Effects of the application of static magnetic fields during potato freezing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 316: 110838.
- [32] 张群. 磁场处理在果蔬贮藏保鲜中的应用研究[J]. 食品与生物技术学报, 2020(7): 112. [ZHANG Q. Research on the application of magnetic field treatment in fruit and vegetable storage and preservation[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2020 (7): 112.]
- [33] 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.
- [34] 冷冬梅, 唐君言, 张海南, 等. 磁场辅助水果冻结实验研究[J]. 冷藏技术, 2020, 43(3): 20–23. [LENG D M, TANG J Y, ZHANG H N, et al. Experimental investigation on freezing of fruits under magnetic field[J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2020, 43(3): 20–23.]
- [35] PURNELL G, JAMES C, JAMES S J. The Effects of applying oscillating magnetic fields during the freezing of apple and potato[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(12): 2113–2122.
- [36] PUZA E A, MAYO F E C, POLO J M A, et al. Effect of freezing with oscillating magnetic fields on the physical and sensorial characteristics of mango[J]. *Brazilian Journal of Food Technology*, 2019, 22: e2018169–e2018169.
- [37] 赵红霞, 周子鹏, 韩吉田, 等. 直流磁场影响猪肉冷冻过程的实验研究分析[C]//中国制冷学会. 2013 中国制冷学会学术年会论文集, 2013: 90–91. [ZHAO H X, ZHOU Z P, HAN J T, et al. Experimental research of the influence of DC magnetic field on freezing process of pork[C]//Chinese Association of Refrigeration. Proceedings of the Annual Academic Conference of the Chinese Association of Refrigeration, 2013: 90–91.]
- [38] WANG Y R, XU T, TAN G, et al. Effects of low-intensity DC magnetic field on the freezing process of aqueous solution and beef[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 42: e72221–e72221.
- [39] MOK J H, HER J Y, KANG T, et al. Effects of pulsed electric field (PEF) and oscillating magnetic field (OMF) combination technology on the extension of supercooling for chicken breasts[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 196: 27–35.
- [40] HU R, ZHANG M, FANG Z. A novel synergistic freezing assisted by infrared pre-dehydration combined with magnetic field: effect on freezing efficiency and thawed product qualities of beef[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(6): 1392–1405.
- [41] RODRÍGUEZ A C, JAMES C, JAMES S J. Effects of weak oscillating magnetic fields on the freezing of pork loin[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(9): 1615–1621.
- [42] 娄耀邦, 赵红霞, 李文博, 等. 静磁场对鲤鱼冷冻过程影响的实验[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(6): 89–94. [LOU Y J, ZHAO H X, LI W B, et al. Experimental of the effects of static magnetic field on carp frozen process[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2013, 43(6): 89–94.]
- [43] WEI H, FU R, LIN X, et al. Effect of magnetic field-assisted freezing on water migration, fractal dimension, texture, and other quality changes in tilapia[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(11): e15940.
- [44] ZHOU J Q, DONG X P, KONG B H, et al. Effects of magnetic field-assisted immersion freezing at different magnetic field intensities on the muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. *Food Chemistry*, 2023, 407: 135092.
- [45] OKUDA K, KAWAUCHI A, YOMOGIDA K. Quality improvements to mackerel (*Scomber japonicus*) muscle tissue frozen using a rapid freezer with the weak oscillating magnetic fields[J]. *Cryobiology*, 2020, 95: 130–137.
- [46] WEI H, LUO K, FU R, et al. Impact of the magnetic field-assisted freezing on the moisture content, water migration degree, microstructure, fractal dimension, and the quality of the frozen tilapia

- [J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(1): 122–132.
- [47] OTERO L, PÉREZ-MATEOS M, RODRÍGUEZ A C, et al. Electromagnetic freezing: Effects of weak oscillating magnetic fields on crab sticks[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 200: 87–94.
- [48] WANG Z, TAN Y Y, NA Y, et al. Influence of oscillating uniform magnetic field and iron supplementation on quality of freeze-thawed surimi[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(57): 33163–33169.
- [49] 郭海云, 周涛, 李研东, 等. 冷冻面团在馒头加工中的应用[J]. 食品安全导刊, 2022(19): 169–171. [GUO H Y, ZHOU T, LI Y D, et al. Application of frozen dough in steamed bread processing[J]. *China Food Safety Magazine*, 2022(19): 169–171.]
- [50] 白雪, 张美莉. 影响冷冻面团的因素及其品质改良研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 348–353. [BAI X, ZHANG M L. Research progress of influencing factors quality improvement of frozen dough[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(5): 348–353.]
- [51] ZHOU H L, JIN Y, HONG T, et al. Effect of static magnetic field on the quality of frozen bread dough[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: et112670.
- [52] 潘治利, 吴阳阳, 申佳晋, 等. 磁场辅助冻结对冷冻熟制面条品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(14): 312–318. [PAN Z L, WU Y Y, SHEN J J, et al. Effects of magnetic field-assisted freezing on the quality of frozen noodles[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(14): 312–318.]
- [53] 吴阳阳, 温娅晴, 艾志录, 等. 磁场辅助冻结对冷冻熟制面条冻藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 229–237. [WU Y Y, WEN Y Q, AI Z L, et al. Effects of magnetic field-assisted freezing on the frozen storage quality of frozen cooked noodles[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9): 229–237.]