

速冻食品的冰晶形态及辅助冻结方法研究进展

Review on ice crystal shape and assisted freezing methods of quick-frozen food

陈 聪^{1,2} 杨大章^{1,2,3} 谢 晶^{1,2,3,4}

CHEN Cong^{1,2} YANG Da-zhang^{1,2,3} XIE Jing^{1,2,3,4}

(1. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 3. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306; 4. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China; 4. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:文章简述了食品速冻技术以及不同冻结速度下形成的冰晶形态及观测冰晶的方法,综述了压力辅助冻结、电场辅助冻结以及磁场辅助冻结等技术在近几年的研究进展。直接法能直接观察到冻结过程形成的冰晶,而间接法则是通过观察冻结后冰晶在食品内部留下的间隙来分析冰晶特征。压力辅助冻结能提高过冷度,在压力释放时水分瞬间冻结,使形成的冰晶细小且分布均匀;电场辅助冻结能降低成核温度促使形成更小尺寸的冰晶;磁场辅助冻结能增强氢键抑制冰晶的生长,3种辅助冻结方式有利于提高冷冻食品的品质,具有良好的应用前景。

关键词:速冻;辅助冻结;冰晶;过冷度

Abstract: In this paper, the food quick-freezing technology, the shape of ice crystal at different freezing rates and methods for observing ice crystals are described. The research progress of pressure-assisted freezing, electrostatic-assisted freezing and magnetic-assisted freezing in recent years is reviewed. The direct method can directly observe the ice crystal formed during the freezing process. The indirect method analyzes the ice crystal characteristics by observing the gap left by the ice crystal in the food after freezing. Pressure-assisted freezing can improve the su-

per-cooling degree. When the pressure is released, the ice crystals formed by instantaneous freezing are fine and evenly distributed. Electrostatic-assisted freezing reduces the nucleation temperature and promotes the formation of smaller ice crystals. Magnetic-assisted freezing can enhance the hydrogen bond and inhibit the formation of ice crystals. These assisted freezing methods are beneficial to improve the quality of frozen food and have good application prospects.

Keywords: quick-freezing; assisted freezing; ice crystal; super-cooling degree

冷冻是应用最广泛的食品保存方法之一^[1],能长时间保存食品。速冻能最大程度保留食品的品质、口感和营养,其中对食品质量影响最大的是冰晶形成阶段,速冻形成的冰晶细、小对细胞组织损伤小,解冻后汁液外流少、新鲜度高^[2-6]。从食品的冻结方法来看,速冻技术主要有鼓风式冻结、接触式冻结、液化气体喷淋式冻结和沉浸式冻结等^[7]。根据冻品类型,需要采用不同的速冻技术才能到达最佳的冻结效果。

近年来,中国速冻食品的需求增长迅速,速冻食品已经成为食品行业不可或缺的领域。人们对速冻食品需求不断提升的同时,也推动着速冻技术的不断发展^[8-9]。为提升速冻食品的质量,降低速冻设备的能耗和增加生产的经济效益,国内外众多学者一直致力于研究新型的速冻技术,其中辅助冻结技术因为能优化食品冻结过程,减小冻结形成的冰晶尺寸而得到广泛的关注。文章拟简述不同冻结速度下冰晶形态及对冰晶的观测方法,综述压力辅助

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(编号:2018YFD0400605);上海市科委平台能力建设项目(编号:16DZ2280300);上海市科委公共服务平台建设项目(编号:17DZ2293400)

作者简介: 陈聪,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期: 2019-03-06

冻结、电场辅助冻结、磁场辅助冻结等辅助冻结方法的研究进展,以期为建立完善的速冻食品体系提供参考。

1 食品冻结中的冰晶形态

速冻食品是指在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者更低的冷却介质温度下,食品在30 min内通过最大冰晶生成带,冻结结束时中心温度在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,形成的冰晶规格不超过 $100\text{ }\mu\text{m}$ ^[10]。按食品冻结速度可分为3类^[11]:快速冻结($5\sim 20\text{ cm/h}$),中速冻结($1\sim 5\text{ cm/h}$),慢速冻结($0.1\sim 1.0\text{ cm/h}$)。冻结速度与冰晶形状的关系见表1^[12]。

表1 冻结速度与冰晶形状的关系[†]

Table 1 The relationship between freezing rate and ice crystal shape

冻结速度	结晶位置	冰晶形状	冰晶大小(直径 $\times$ 长度)
数秒	细胞内	针状	$(1\sim 5)\text{ }\mu\text{m}\times(5\sim 10)\text{ }\mu\text{m}$
1.5 min	细胞内	杆状	$(0\sim 20)\text{ }\mu\text{m}\times(20\sim 50)\text{ }\mu\text{m}$
40.0 min	细胞内	柱状	$(50\sim 100)\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$ 以上
90.0 min	细胞外	块粒状	$(50\sim 200)\text{ }\mu\text{m}\times 200\text{ }\mu\text{m}$ 以上

[†] 冻结速度指通过 $-1\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间。

快速冻结的食品质量要优于中速冻结和慢速冻结,这是因为快速冻结时,冻品组织细胞内外水分几乎同时达到结晶条件,组织内冰层推进的速度大于水分迁移的速度,冻品中的冰晶分布与冻前食品液态水分布相似,冰晶呈针状,细小且分布均匀,组织结构受到的损伤小。图1为冰晶直径,细胞损伤程度与冻结速度的关系^[13]。

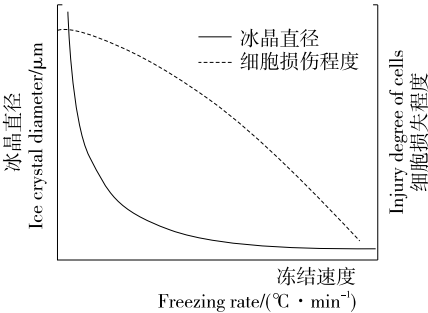


图1 冰晶直径,细胞损伤程度与冻结速度的关系

Figure 1 Relationships between ice crystal diameter, injury degree of cell and freezing rate

2 观测冰晶方法

冰晶特征是影响冷冻食品品质最重要的因素^[14],具体包括冰晶的大小、分布、数量以及形状等。不同辅助冻结方式下形成的冰晶特征会有差异,对食品组织细胞的微观结构造成影响,因此观测冰晶的特征显得尤为重要。观察冰晶特征的方法有直接法和间接法^[15]。直接法是直接观察冰晶,而间接法则是通过观察冻结后冰晶在食品内部留下的间隙来分析冰晶特征,具体分类见图2。

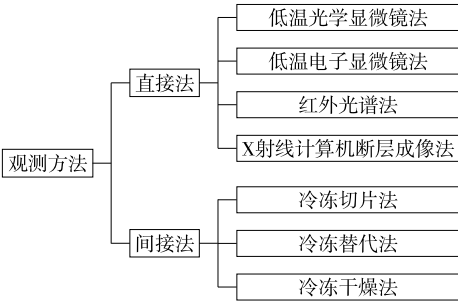


图2 冰晶观测方法分类

Figure 2 Methods for observation ice crystal characteristics

2.1 直接法

Ninagawa等^[16]使用配置高速摄像机的低温显微镜,观察天竺葵细胞内的冰晶形成过程,冰晶分布位置,不同冷冻速率下冰晶的尺寸以及细胞的变形程度。发现冻结速率越快,过冷度越高,冰晶尺寸越小,细胞变形程度越小。Fujikawa等^[17]使用低温扫描电子显微镜观察了冻结落叶松休眠芽组织细胞时形成的冰晶。Kobayashi等^[18]采用X射线计算机断层成像技术研究了金枪鱼肉过冷冻后的冰晶结构。直接观测法能够观察冰晶形态及形成过程,但需要在低温环境下进行,因而对设备的要求严苛。

2.2 间接法

Kaale等^[19]采取冷冻替代法研究三文鱼冻结后的冰晶特征,用提前预冷的刀对冻品进行切片,然后将切片在Clarke溶液(无水乙醇:冰醋酸=3:1)中浸渍固定24 h,接着将固定完的样品升温至室温,随后使用无水乙醇脱水,包埋在石蜡中,最后切片染色观察^[20]。Luan等^[21]采用冷冻切片法间接观察冻结带鱼的冰晶,该方法是用提前预冷的刀对冻品进行切片,然后将切片包埋在包埋剂中,并浸没在干冰和己烷的混合物中直至完全冷冻,然后切除多余包埋剂用黏合剂膜覆盖固定,最后切片染色观察^[22]。该方法较冷冻替代法所需的处理时间短,提高了效率。冷冻干燥法是观察冻品经过脱水干燥后的间隙,该方法认为间隙为冰晶升华后留下。同直接法相比,间接法对设备的要求低,但操作步骤多、耗时长,在试验设备达不到要求时采用间接法也能得到很好的试验结果。

3 辅助冻结方法

食品冻结过程中,大冰晶的形成会使细胞破裂,对食品的微观组织结构造成破坏,解冻后汁液流失严重,食品外观变形而且营养和风味物质流失。而细小且分布均匀的冰晶则对食品组织结构的破坏显著降低,较好地保持了食品原有的品质。为此,新型的辅助冻结技术不断涌现,通过控制冻结过程中形成的冰晶尺寸及分布,来提高速冻食品品质。

3.1 压力辅助冻结

高压技术在食品行业中已开始应用,如高压冻结、高压解冻、高压灭菌、高压钝酶等^[23]。Taylor^[24]在研究活细胞冻结过程中的变化时,采用了高压辅助技术,而后该技术被引入速冻食品领域。压力辅助冻结的方式主要有高压辅助冻结和压力转换辅助冻结。高压辅助冻结是指食品在恒定高压条件下冷却至相变温度进行冻结,完成冻结过程后再释放压力到常压,该过程与常压下冻结相类似,只是在高压条件下进行^[25]。由于水在高压条件下凝结形成的冰的密度大于液态水^[26],水凝固时的体积不会膨胀而使冻品组织细胞破裂,因此能较好保持食品形态和品质。不同于恒定压力下进行的高压辅助冻结,压力转换辅助冻结是食品在高压条件下冷却到过冷状态,

然后迅速释放压力,由于此时食品过冷度较高其中的水分在瞬间发生冻结,从而促使小冰晶的形成,同时冰晶在冻品中分布均匀^{[27]2-3}。

Fernández 等^[28]在相同的压力条件下(0.1, 50.0, 100.0 MPa),对凝胶样品采取高压辅助冻结和压力转换辅助冻结,并对两种压力辅助冻结方式形成的冰晶以及冻品的微观结构进行对比。结果表明,压力转换辅助冻结要明显优于高压辅助冻结,样品在该方式下冻结相变时间少,过冷度高结晶速度快,形成的冰晶小数量多且分布均匀。陈淑花^[29]在食品高压低温冻结试验中,戎云锁^{[27]17-24}在压力辅助冻结鸡心时也得到了相同的结论。因此,在近几年关于压力转换辅助冻结的研究较多,一些研究结果如表 2 所示。

表 2 关于压力转换辅助冻结的研究

Table 2 Research progress on pressure shift freezing

作者	对象	条件	结论
Su 等 ^[30]	虾,猪肝	100,150,200 MPa 的压力以及 -8.4, -14.0, -21.0 °C 的温度	冰晶横截面积小,数量多,规则且分布均匀
Hong 等 ^[31]	鲍鱼	50,100,150,200 MPa 的压力以及 -5.4, -10.2, -15.7, -22.0 °C 的温度	150 MPa 是鲍鱼采用压力转换辅助冻结的最佳条件
Choi 等 ^[32]	猪肉	50,100,150,200 MPa 的压力以及 -4, -9, -14, -21 °C 的温度	当压力<50 MPa 时,与常压条件冻结效果下相同;当压力>150 MPa 时,猪肉品质出现恶化。最佳条件为 100 MPa。解冻后保持新鲜品质
Cheng 等 ^[33]	虾肌球蛋白	100,150,200,300,400,500 MPa 的压力以及 -20 °C 的温度	压力转换辅助冻结可以降低虾肌球蛋白的变性,300 MPa 是诱导变性的临界压力点

Smith 等^[34]建立了适合于高压条件下冻结食品内部冰晶生长的数值模型,该模型能准确预测食品内部冰晶的尺寸随时间演化及分布规律,合理预估食品冻结时间。但该模型是用 NaCl 溶液作为食品模型样品,没有考虑食品实际由多组分构成,以及该数值模型不能得到样品温度随时间的变化规律,还需要进一步研究。

3.2 电场辅助冻结

近几年,电场在食品冷冻领域得到广泛的研究。不同于高压提高过冷度,电场主要是影响冰晶的成核率来辅助冻结。在静电场条件下,极性水分子会出现转动,呈现与静电场方向对齐的趋势,并且电偶极矩沿着静电场方向分布的水分子最稳定^[35]。Orlowska 等^[36]在高压直流静电场控制冰晶成核的研究中,指出随着电压的增加冰晶成核温度提高,电场辅助冻结的机理是由于水分子的重新定向和形成更有序的团簇结构而导致自由能的降低,但这个机理还需要通过试验进一步验证。Saideh 等^[37]同样指出静电场能提高冰晶成核温度,但当静电场强度进一步增强时会造成冰晶成核温度降低。对于不同食品而言,电场辅助冻结的最佳电场强度不

同,要得到各种食品的最佳条件,还需要分别研究。Mok 等^[38]将脉冲电场与磁场结合用于食品冷冻,在脉冲电场与磁场的联合作用下,促进更小尺寸的冰晶形成,明显缩短了相变时间。静电场不仅能控制冰晶成核的温度,还能改善冻品的品质,是一种非常具有前景的辅助冻结方式,表 3 为近几年关于电场辅助冻结的研究。

3.3 磁场辅助冻结

磁场辅助冻结是新兴的辅助冻结技术之一。由于水是一种抗磁性物质,在磁场的作用下产生磁偶极矩,水的物理化学性质受到影响。Cai 等^[45]在研究中发现,在磁场的作用下,水的表面张力下降,分子能量下降,内部结构更加稳定,形成了更多的氢键,更大的水分子簇。当磁场辅助冻结时,磁场会引起水分子振荡,抑制冰晶生长,提高过冷度。单亮亮等^[46]解释在磁场作用下,运动的水分子及团簇结构受到洛伦兹力的作用,呈转动趋势,对氢键的稳定性造成影响,进一步可能导致氢键断裂。王鹏飞等^[47]在磁场辅助冻结果蔬的研究中发现,在磁场的作用下相变时间变短,果蔬组织细胞中冰晶尺寸变小。展

曦鸣^[48]研究了低频电磁场对纯水冷冻过程的影响,结果表明极低频电磁场略微增加了纯水的过冷度,对冷冻时间及冰晶形态几乎无影响。James 等^[49]目前在研究中得到振荡磁场对大蒜的过冷度没有显著影响。目前对于磁场辅助冻结的机理还需要进一步探究,表 4 是目前关于磁场辅助冻结的相关研究。

表 3 关于电场辅助冻结的研究
Table 3 Research progress on electrostatic-assisted freezing

作者	对象	条件	结论
Choi 等 ^[39]	羊肉	静电场:0.0~5.8×10 ⁴ V/m 的电场强度以及-20 ℃ 的温度	电场强度越高,成核速率越快,冰晶直径越小,冰晶数量越多,解冻后汁液流失越少
Jia 等 ^[40]	猪里脊肉	静电场:4,6,8,10 kV 的直流电压以及-20 ℃ 的温度	10 kV 直流电压环境下,形成的冰晶小,猪里脊肉的蛋白质变性程度低,肉质指标更接近新鲜程度
Dalvi-Isfahan 等 ^[41]	琼脂凝胶	静电场:0.0,1.9×10 ⁴ ,3.9×10 ⁴ ,5.8×10 ⁴ V/m 的电场强度以及-20 ℃ 的温度	静电场对冻结速率几乎无影响,电场强度越大,冰晶越小
高文宏等 ^[42]	葡萄糖溶液、蔗糖溶液	静电场:0,4,6,8,10 kV 的电压以及-30 ℃ 的温度	静电场强度越大,对冰晶成长的抑制效果越强
李侠等 ^[43]	牛背最长肌	静电场:2.5 kV 的电压以及-20~-18 ℃ 的温度	冻结速率显著提高,冻品中形成的冰晶小且分布均匀
尚柯等 ^[44]	牛背最长肌	静电场:2.5 kV 的电压	通过最大冰晶生成带的时间显著减少,牛肉肌原纤维蛋白变性程度下降

表 4 关于磁场辅助冻结的研究
Table 4 Research progress on magnetic field assisted freezing

作者	对象	条件	结论
Otero 等 ^[50]	蟹棒	振荡磁场:0~2 mT 的磁场强度,6~59 Hz 的磁场频率以及-25 ℃ 的温度	振荡磁场辅助冻结对蟹棒没有有利的影响,解冻后蟹棒品质下降,损伤程度没有减少
Zhao 等 ^[51]	去离子水、0.9% NaCl 溶液、5%乙二醇溶液	静磁场:0.0,11.4 mT 的磁场强度以及-16 ℃ 的温度	静磁场对成核温度分布无影响,但会提高乙二醇溶液的成核温度,降低 NaCl 溶液的成核温度
王亚会等 ^[52]	西兰花	直流磁场:0,4.6,9.2,18,36 Gs 的磁场强度	36 Gs 磁场辅助冻结的西兰花,贮藏时间长品质高
顾思忠等 ^[53]	豌豆	直流磁场:0,4.6,9.2,18,36 Gs 的磁场强度以及-30 ℃ 的温度	36 Gs 的磁场显著缩短冻结时间,4.6 Gs 的磁场冻结效果最佳
龙超等 ^[54]	马铃薯	直流磁场:0.0,4.6,9.2,18,36 Gs 的磁场强度以及-18 ℃ 的温度	在磁场作用下,马铃薯过冷度增加,冻结时间变短,品质更好。18 Gs 的磁场强度下,通过最大冰晶生成带最快
Zhan 等 ^[55]	0.9% NaCl 溶液、10 mmol/L 的 PDADMAC 溶液	低频电磁场:0,100,150,200,250 Hz 的磁场频率以及-25 ℃ 的温度	随着磁场频率增加,过冷度降低,200 Hz 时达到最小

4 结论与展望

辅助冻结是为了更好地保持食品品质,而冻结形成的冰晶特征是保证速冻食品品质最重要的因素之一。辅助冻结方法就是通过影响形成的冰晶特征来达到更好冻结食品的效果,其中压力辅助主要是增加过冷度使形成的冰晶细小且分布均匀,电场和磁场辅助冻结则是通过

提高成核率来控制冰晶晶核的生长,使最终形成更小的冰晶。对于不同种类的食品所需的辅助冻结方式不同,需进一步研究不同食品的最佳辅助冻结方式,辅助冻结的机理也需要进一步通过试验验证。此外,已经有一系列方法能观测冻结形成的冰晶,直接法能直接观察冰晶但设备成本高,间接法设备要求低但所需处理步骤繁琐且不直观。运用数值模拟技术,可以建立预测冰晶生长

的合理模型,从而建立完善的速冻食品评价体系。

参考文献

- [1] BIGLIA A, COMBA L, FABRIZIO E, et al. Case studies in food freezing at very low temperature[J]. *Energy Procedia*, 2016, 101: 305-312.
- [2] PÜSSA T. Nutritional and toxicological aspects of the chemical changes of food components and nutrients during freezing[C]//CHEUNG P, MEHTA B. *Handbook of Food Chemistry*. Tartu: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 867-896.
- [3] 唐君言, 邵双全, 徐洪波, 等. 食品速冻方法与模拟技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2018, 39(6): 1-9.
- [4] KAALE L D, EIKEVIK T M. The development of ice crystals in food products during the superchilling process and following storage, a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2014, 39(2): 91-103.
- [5] MAGNUSSEN O M, HAUGLAND A, HEMMINGSEN A K T, et al. Advances in superchilling of food: Process characteristics and product quality[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2008, 19(8): 418-424.
- [6] 蔡青文, 谢晶. 微冻保鲜技术研究进展[J]. *食品与机械*, 2013, 29(6): 248-252.
- [7] 舒志涛, 谢晶, 杨大章. 喷嘴结构对冲击式速冻设备性能优化研究进展[J]. *食品与机械*, 2018, 34(6): 187-191.
- [8] 孙向阳, 侯丽芬, 隋继学, 等. 我国速冻食品产业发展现状及趋势[J]. *农业机械*, 2012(21): 69-72.
- [9] 林锦泰. 第 7 章制冷设备市场分析[J]. *制冷技术*, 2018, 38(S1): 56-69.
- [10] 隋继学, 张一鸣. *速冻食品工艺学*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 7-13.
- [11] 谢晶. *食品冷冻冷藏原理与技术*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 160-167.
- [12] 张国治, 田少君, 李果. *速冻及冻干食品加工技术*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 6-17.
- [13] KONO S, KON M, ARAKI T, et al. Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 214: 158-165.
- [14] 赵金红, 胡锐, 刘冰, 等. 几种冷冻新技术对食品冻结过程中冰晶形成的影响[J]. *食品与机械*, 2012, 28(6): 241-245.
- [15] 栾兰兰. 冷冻带鱼冰晶生长预测模型及分形维数品质评价体系的建立[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 21-36.
- [16] NINAGAWA T, EGUCHI A, KAWAMURA Y, et al. A study on ice crystal formation behavior at intracellular freezing of plant cells using a high-speed camera [J]. *Cryobiology*, 2016, 73(1): 20-29.
- [17] FUJIKAWA S, ENDOH K. Cryo-scanning electron microscopy to study the freezing behavior of plant tissues[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2009, 59(2): 214-222.
- [18] KOBAYASHI R, KIMIZUKA N, WATANABE M, et al. The effect of supercooling on ice structure in tuna meat observed by using X-ray computed tomography[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 60: 270-277.
- [19] KAALE L D, EIKEVIK T M. The influence of superchilling storage methods on the location/distribution of ice crystals during storage of Atlantic salmon (*Salmosalar*) [J]. *Food Control*, 2015, 52: 19-26.
- [20] KAALE L D, EIKEVIK T M, RUSTAD T, et al. Ice crystal development in pre-rigor Atlantic salmon fillets during superchilling process and following storage [J]. *Food Control*, 2013, 31(2): 491-498.
- [21] LUAN Lan-lan, WANG Li-ping, WU Tian-tian, et al. A study of ice crystal development in hairtail samples during different freezing processes by cryosectioning versus cryo-substitution method[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 87: 39-46.
- [22] MANO N, WADA N, KAWAMOTO T, et al. A novel application of a cryosectioning technique to undecalcified coral specimens[J]. *Marine Biology*, 2016, 163(5): 1-9.
- [23] 江英. 食品的高压低温处理实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 7-8.
- [24] TAYLOR A C. The physical state transition in the freezing of living cells[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 85(2): 595-609.
- [25] LEBAIL A, CHEVALIER D, MUSSA D M, et al. High pressure freezing and thawing of foods: A review[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(5): 504-513.
- [26] 李志义, 夏远景, 刘学武, 等. 高压冷冻食品的机理及应用[J]. *食品研究与开发*, 2006(5): 145-148.
- [27] 戎云锁. 动植物组织高压低温保存实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [28] FERNÁNDEZ P P, OTERO L, GUIGNON B, et al. High-pressure shift freezing versus high-pressure assisted freezing: Effects on the microstructure of a food model[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(4): 510-522.
- [29] 陈淑花. 食品高压低温处理过程基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 29-57.
- [30] SU Guang-ming, RAMASWAMY H S, ZHU Song-ming, et al. Thermal characterization and ice crystal analysis in pressure shift freezing of different muscle (shrimp and porcine liver) versus conventional freezing method[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 26: 40-50.
- [31] HONG G P, CHOI M J. Comparison of the quality characteristics of abalone processed by high-pressure sub-zero temperature and pressure-shift freezing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016(33): 19-25.
- [32] CHOI M J. Effects of pressure-shift freezing conditions on the quality characteristics and histological changes of pork[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 67(5): 1-9.

- 194-199.
- [33] CHENG Lina, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei, et al. Effects of high pressure freezing (HPF) on denaturation of natural actomyosin extracted from prawn (*Metapenaeus ensis*) [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 252-259.
- [34] SMITH N A S, BURLAKOV V M, RAMOS Á M. Mathematical modeling of the growth and coarsening of ice particles in the context of high pressure shift freezing processes [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2013, 117(29): 8 887-8 895.
- [35] SU Wei, XU Xiao-bin, ZHANG Hong, et al. Effects of dipole polarization of water molecules on ice formation under an electrostatic field [J]. Cryobiology, 2008, 56(1): 93-99.
- [36] ORLOWSKA M, HAVET M, LE-BAIL A. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions [J]. Food Research International, 2009, 42 (7): 879-884.
- [37] SAIDEHF J, NASSER H, EZAT K, et al. Evaluation of the static electric field effects on freezing parameters of some food systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2019(99): 30-36.
- [38] MOK J H, CHOI W, PARK S H, et al. Emerging pulsed electric field (PEF) and static magnetic field (SMF) combination technology for food freezing [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 50: 137-145.
- [39] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016(37): 68-73.
- [40] JIA Guo-liang, HE Xiang-li, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 204: 18-26.
- [41] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, LE-BAIL A. Effect of freezing under electrostatic field on selected properties of an agar gel [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 42: 151-156.
- [42] 高文宏, 陈秋妍, 王启军, 等. 静电场对葡萄糖溶液和蔗糖溶液冰晶生长的影响 [J]. 现代食品科技, 2017, 33(10): 21-29.
- [43] 李侠, 钱书意, 杨方威, 等. 低压静电场下不同隔距冻结—解冻对牛肉品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2017(8): 286-293.
- [44] 尚柯, 杨方威, 李侠, 等. 静电场辅助冻结—解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(3): 157-162.
- [45] CAI Ran, YANG Hong-wei, HE Jin-song, et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds [J]. Journal of Molecular Structure, 2009, 938(1/2/3): 15-19.
- [46] 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.
- [47] 王鹏飞. 电磁场对细胞冻结特性的影响 [D]. 天津: 天津商业大学, 2015: 50-68.
- [48] 展曦鸣. 极低频电磁场对两种液体体系冷冻过程的影响 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 22-29.
- [49] JAMES C, REITZ B, JAMES S J. The freezing characteristics of garlic bulbs (*Allium sativum* L.) frozen conventionally or with the assistance of an oscillating weak magnetic field [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(3): 702-708.
- [50] OTERO L, PÉREZ-MATEOS M, RODRÍGUEZ A, et al. Electromagnetic freezing: Effects of weak oscillating magnetic fields on crab sticks [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 200: 87-94.
- [51] ZHAO Hong-xia, HU Han-qing, LIU Sheng, et al. Experimental study on freezing of liquids under static magnetic field [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2017, 25(9): 1 288-1 293.
- [52] 王亚会, 邸倩倩, 刘斌, 等. 直流磁场辅助冻结对西兰花品质的影响 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 195-199.
- [53] 顾思忠, 刘斌, 宋健飞, 等. 直流磁场对豌豆冻结特性的影响 [J]. 冷藏技术, 2017, 40(4): 23-26.
- [54] 龙超, 吴子健, 宋健飞. 磁场辅助冻结对马铃薯块冻结及贮藏特性影响 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 272-274, 305.
- [55] ZHAN Xi-ming, ZHU Zhi-wei, SUN Da-wen. Effects of extremely low frequency electromagnetic field on the freezing processes of two liquid systems [J]. LWF Food Science and Technology, 2019, 103: 212-221.

(上接第 219 页)

- [38] 孔蒙蒙, 黄忠民, 潘志利, 等. 检测食品中苯并芘的方法研究 [J]. 食品与营养科学, 2018, 7(4): 251-256.
- [39] 宋长虹, 唐生, 佟馨, 等. 食用油脂中苯并- α -芘检测方法比较与优化 [J]. 食品研究与开发, 2014, 35(23): 83-86.
- [40] 张海龙, 张维, 舒楠, 等. 高效液相色谱法定量分析菜籽油中的苯并芘 [J]. 农产品加工, 2017(18): 26-28.
- [41] 谈义萌. 超分子溶剂微萃取—液相色谱荧光法测定多环芳烃 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 1-9.
- [42] 王磊, 樊蕊. 凝胶色谱—气质联用测定花生油中苯并芘残留 [J]. 食品工业, 2019, 40(5): 322-324.
- [43] 杨玲, 张姝姝, 林蔓. 气质联用法和高效液相色谱法测定苯并芘的对比研究 [J]. 湖北师范学院学报: 自然科学版, 2016, 36(4): 11-13.
- [44] 吴春英, 白鹭, 谷风, 等. UPLC-MS/MS 测定地沟油中黄曲霉毒素和苯并芘 [J]. 食品工业, 2017, 38(1): 285-288.
- [45] 肖旺. 基于表面增强拉曼光谱技术快速检测苯并- α -芘的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 23-46.
- [46] 王珊. 表面增强拉曼光谱技术(SERS)快速检测食用油菜苯并- α -芘的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 24-38.