

伍景琼, 黄嘉博, 高东金, 等. 速冻果蔬冷冻链技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 462–473. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100045

WU Jingqiong, HUANG Jiabo, GAO Dongjin, et al. Research Progress on Frozen Chain Technology of Quick-frozen Fruits and Vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 462–473. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100045

· 专题综述 ·

速冻果蔬冷冻链技术研究进展

伍景琼^{1,2,*}, 黄嘉博¹, 高东金¹, 于司墨¹

(1. 昆明理工大学交通工程学院, 云南昆明 650500;

2. 云南省现代物流工程研究中心, 云南昆明 650500)

摘要:随着我国农业结构调整与居民消费水平提升, 速冻果蔬越来越受到大众关注, 速冻果蔬消费及其加工产品需求的持续增长也让速冻果蔬全程冷冻技术成为研究热点。本文对近年来国内外速冻果蔬冷冻链技术的研究和应用现状进行归纳分析, 从物流角度综述了冷加工技术、冻藏技术、运输技术和信息技术在速冻果蔬从前端到末端全链条中的应用, 介绍了应用于速冻果蔬冷冻链的新技术、新材料, 总结了速冻果蔬冷冻链技术研究中存在的问题, 并提出未来应从速冻果蔬冷冻链各个环节的建模仿真、冷冻链技术标准化、绿色化技术和信息技术赋能等方面进行研究, 为促进我国速冻果蔬产业发展提供参考。

关键词:冷冻链, 速冻果蔬, 速冻技术, 信息技术, 研究进展

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)16-0462-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100045



本文网刊:

Research Progress on Frozen Chain Technology of Quick-frozen Fruits and Vegetables

WU Jingqiong^{1,2,*}, HUANG Jiabo¹, GAO Dongjin¹, YU Simo¹

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Modern Logistics Engineering Research Center, Kunming 650500, China)

Abstract: With the adjustment of agricultural structure and the improvement of residents' consumption level in China, frozen fruits and vegetables have attracted more and more attention from the public. The continuous growth of the consumption of frozen fruits and vegetables and the demand for processed products has also made the whole process freezing technology of frozen fruits and vegetables a research hotspot. The research and application status of quick-frozen fruits and vegetables freezing chain technology in recent years are summarized and analyzed in the article. The application of cold processing technology, frozen storage technology, transportation technology and information technology in the whole chain of quick-frozen fruits and vegetables from the front end to the back end is reviewed from the perspective of logistics. The new technologies and new materials applied to the freezing chain of quick-frozen fruits and vegetables are introduced. The problems existing in the research of quick-frozen fruits and vegetables freezing chain technology are summarized. It is proposed that the future research should be carried out from the aspects of modeling research, standardization of freezing chain technology, greening research and information technology empowerment of quick-frozen fruits and vegetables freezing chain, so as to provide reference for promoting the development of quick-frozen fruits and vegetables industry in China.

Key words: frozen chain; frozen fruits and vegetables; quick-freezing technology; information technology; research progress

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71904068); 云南省省院省校教育合作人文社科项目 (SYSX202016); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202310674083)。

作者简介/通信作者*: 伍景琼 (1984-), 女, 博士, 研究方向: 冷链物流系统优化, E-mail: mote_1984@163.com。

速冻果蔬作为冷冻食品工业的四大品类之一,是将原料基地中新鲜采摘的果蔬经过一系列的速冻加工处理使其迅速冻结,并将其贮藏在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,以实现果蔬在工业加工和居民消费领域的周年供应^[1]。研究表明大多数果蔬在新鲜和速冻状态下的矿物质、维生素等营养物质含量没有明显的差异,并且速冻更有利于保持果蔬的色泽、风味和营养物质^[2]。速冻果蔬具有贮藏期长、检测严格、质量可靠、供货稳定 and 大规模标准化生产等优点,有助于缓解我国由于果蔬生产的地域性、季节性 with 需求的普遍性、全年性的对立导致的果蔬供需矛盾与浪费等问题^[3]。目前我国速冻蔬菜品种已有青豆、蚕豆、菜花、蒜苗、莲藕、胡萝卜、菠菜、香菇、蘑菇、松菇、油菜、甜玉米、大青椒、韭菜、黄瓜、茄子、番茄等 30 余种^[4]。随着人们消费观和价值观不断转变,速冻果蔬正逐渐成为国内外市场畅销的果蔬产品,需求量日益增大,发展前景广阔^[2]。此外,速冻果蔬也是维持果蔬食品工业持续生产的重要手段^[5]。由于果蔬深加工行业如预制菜、果蔬汁、果蔬成分提取等产业的蓬勃发展,速冻果蔬对于生产的品质与连续性愈发重要,越来越多速冻果蔬企业选择与高端专业配餐公司、连锁餐饮企业、大型商超以及食品公司达成合作,实现互惠互利、合作共赢^[6]。

随着速冻果蔬需求量日益增多,人们对速冻果蔬在生产、物流及利用过程中的安全与品质提出了

更高的要求。因此,建立一个产、供、销一体化的速冻水果冷冻链的作用显得尤为重要。速冻果蔬冷冻链主要是指果蔬以制冷为技术手段,从原料采收、生产、加工、运输、仓储到销售流通的整个过程中,始终保持合适的冷冻条件^[7]。相比于发达国家,我国现有的速冻果蔬冷冻链整体发展和应用还不够深入,还存在着生产与流通技术装备落后、冷冻链存在“断链”等问题,距离满足消费和工业需求还有较大差距^[8]。加强对速冻果蔬冷冻链技术的发展和研究,有利于提高速冻果蔬产品产量和质量、降低流通损耗,为我国速冻果蔬的产业化发展提供良好的条件,提高国际市场的竞争力,促进行业的高质量发展。

本文旨在从物流角度对速冻果蔬冷冻链中各个环节的技术及优化方向进行了综述,探讨速冻果蔬冷冻链在实际生产流通中的研究现状,分析研究中存在的不足,并对未来速冻果蔬冷冻链的研究方向进行展望,为速冻果蔬行业的科技创新和冷冻链技术的应用推广提供参考。

1 速冻果蔬冷冻链技术发展现状

速冻果蔬冷冻链技术具有集成度高、跨时空、多环节、多业态和学科高度交叉的特点,其各个环节紧密衔接、相互协调,起着非常重要的作用,基于速冻果蔬通用生产工艺,将速冻果蔬冷冻链分为三个环节,其中各个环节、组织载体及技术构成如图 1 所示。

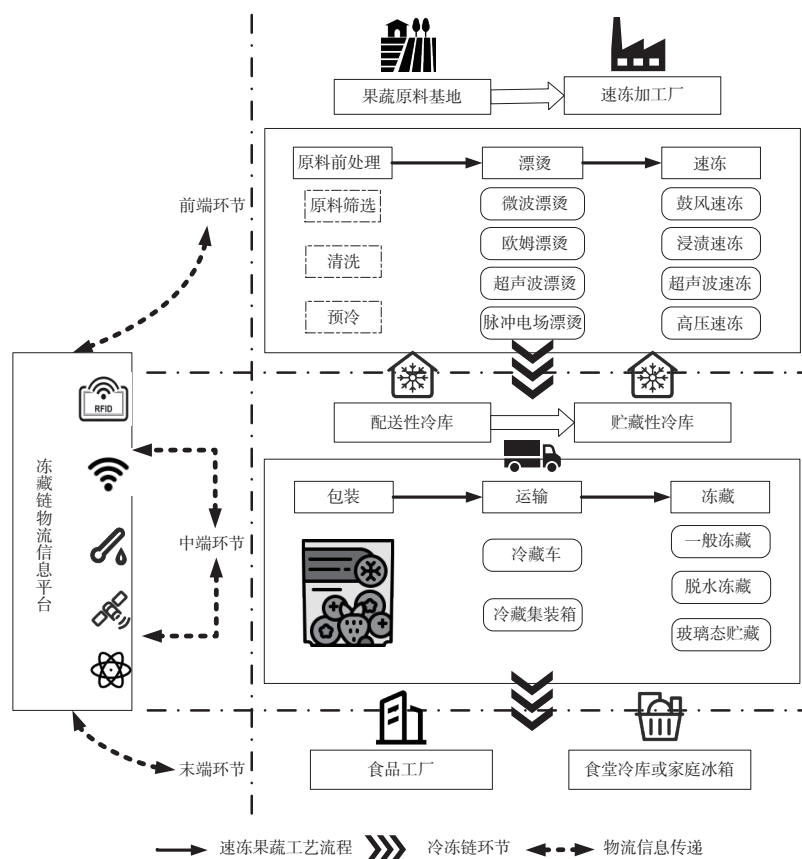


图 1 速冻果蔬冷冻链

Fig.1 Quick-frozen fruits and vegetables frozen chain

1.1 速冻果蔬冷加工技术

1.1.1 预冷技术 预冷对速冻果蔬冷冻链具有重要意义,其作用是去除果蔬田间热,减缓果蔬理化活动,降低果蔬速冻之前的损耗,有助于保持速冻果蔬品质。相关研究表明,在冷链流通过程中,预冷环节可以减少 23% 左右的果蔬质量损失^[9]。由于预冷技术对于农业生产的经济效益日益显现,发达国家已将预冷作为果蔬加工行业必要的第一环节,而我国预冷相关的技术与装备尚不完善。目前常用的预冷技术主要有水冷预冷、空气预冷以及真空预冷,其优缺点与研究方向如表 1 所示^[10]。

1.1.1.1 水冷预冷 水冷预冷是指采用浸泡或喷淋装置将冷水与果蔬充分接触,使果蔬快速冷却到规定温度,减缓果蔬营养物质的消耗,抑制软化,较好地保持果蔬品质,适用于耐水性高且对化学消毒剂不敏感的果蔬^[11]。庄言等^[12]研究了新鲜水芹经冰水预冷处理后的生理生化及贮藏品质变化,发现在冰水预冷基础上进行低温贮藏,延缓了水芹中叶绿素、抗坏血酸的降解及褐变的速度,有助于保持水芹的品质,延长其贮藏期。Zainal 等^[13]采用冷水预冷的方法对哈密瓜进行预冷实验,结果显示水冷减缓了储存期间的重量损失并增加了可溶性固形物的浓度,更好地保持了的果肉颜色、果皮膨胀压力、果肉硬度以及柠檬酸含量。但是水冷预冷也会出现温度传导不均匀、循环的预冷水中杂质过多,易沉积于果蔬表面的问题,使得果蔬出现腐烂、病害等现象,导致速冻加工时产品质量不合格。针对上述问题,在最新的一些研究中提出了流态冰预冷的方式,刘瑶等^[14]通过对玉米进行流态冰预冷实验,发现流态冰预冷处理不仅可以快速降温,更能减少预冷过程中造成的机械损伤;还有的研究采用了向预冷水中添加保护剂、防腐剂如次氯酸钠^[15]、氯化钙^[16]、1-甲基环丙烯(1-MCP)^[17]等方法,来降低预冷循环水中的微生物对果蔬产品的副作用。

1.1.1.2 空气预冷 空气预冷主要分为冷库预冷和差压预冷。冷库预冷是一种先将果蔬置于低温贮藏库中,利用冷风机组的换热将果蔬热量传递到库外,将果蔬热量带走的预冷方式,其预冷效果与果蔬的堆栈方式有关。冷库预冷具有成本低廉、操作简单的优点,现已成为我国果蔬原料基地预冷的主要方

式^[18]。现有研究主要将重心放在通过冷库热力学建模提高预冷效率上。王冠邦等^[19]用数值模拟的方法,对苹果预冷过程中的流场、温度场等物理场的分布特征进行了分析,结果表明,在冷气流速高的位置附近,苹果的降温速率快、温度低。

差压预冷是利用风机将冷空气加压产生压力差作用于果蔬两侧,迫使冷空气全部通过果蔬,使得果蔬温度迅速冷却的预冷方式。相比冷库预冷,差压预冷不仅能明显降低预冷环节的时间,还能降低果蔬的失重率^[20]。当前,差压预冷的研究主要集中于不同运行条件对果蔬预冷品质影响的机理探讨,通过不断调整实验条件进行对比,以期为不同果蔬的差压预冷找到适合的工艺条件^[21]。季丽丽等^[22]以丙二醛、维生素 C、过氧化氢酶活性、香气成分等为指标研究了西葫芦差压预冷的最佳温度。在差压预冷的各种工艺中,送风条件参数也是果蔬原材料预冷品质的关键,Liu 等^[23]通过建立樱桃差压预冷的热力学三维模型,研究了送风参数对预冷时间、预冷能耗和预冷均匀度的影响,得到了樱桃差压预冷的最佳送风参数。Kumar 等^[24]研究了苹果在差压预冷过程中周期性气流回流对预冷速率、均匀性和能耗的影响,比较三种恒定冷却速度(即 1, 2 和 3 m/s)下不同的回流策略,发现循环回流可以缩短预冷时间,降低能量消耗,提高水果冷却均匀性。预冷包装通风设计是差压预冷的另一个研究重点,在选择包装时需要权衡冷却速度和失重率,优化包装设计可以提高预冷效率和果蔬的品质^[25]。Nalbandi 等^[26]通过模拟草莓差压预冷过程,研究了预冷包装箱通风口和托盘设计对草莓预冷效果的影响,结果表明通过改进包装和托盘的设计,可以使预冷更加均匀。

在实际空气预冷的设备研究中,既需要降低差压预冷后果蔬的失重率,又需要满足现实中单体农户在分散的农田中进行预冷的需求。顾洋等^[27]研制出了移动式果蔬产地差压预冷机,该设备既可以移动至田间在果蔬农产品采摘后立即进行预冷,也可以在短途运输中进行预冷,提高预冷自动化、精准化水平。

1.1.1.3 真空预冷 真空预冷指的是利用真空泵的抽吸,降低密闭预冷室中的压力,形成较高的真空度,有利于果蔬中的水汽向外蒸发,带走潜热,促使果蔬温度下降,达到预冷的目的。真空预冷可以有效延缓

表 1 不同预冷技术的适宜品种、评价及研究重点

Table 1 Suitable types, evaluation and research focus of fruits and vegetables with different precooling technologies

预冷技术	适用的果蔬	优点	缺点	研究重点
水冷预冷	耐水性高、对化学消毒剂不敏感,如玉米、芒果、苹果、哈密瓜、桃子、根茎类蔬菜等	成本低 失重率低 冷却均匀	污染风险高 预冷水必须消毒	流态冰预冷 新型消毒试剂 改善水的循环利用和安全
空气预冷	大部分果蔬农产品	成本较低 适用性广	效率较低 预冷不均匀	最佳预冷参数 改进堆栈模式和包装设计
真空预冷	表面积体积比大、含水量高,如葡萄、草莓、叶菜、白菜等	冷却速度快 冷却均匀性好抑制 细菌和微生物 对包装要求不高	设备成本高 失重率高	最佳预冷参数 真空预冷数值模型建立 能耗降低的方式

果蔬原料的生理活动,是果蔬冷却效率和均匀性最高的预冷方式^[10]。现阶段,探究针对不同果蔬原材料的最佳预冷技术参数是真空预冷研究的关键,严锐等^[28]将未经预冷的果蔬作为对照组,研究不同真空预冷条件对果蔬失重率、各项营养品质、感官品质等的影响,为果蔬真空预冷的终压、补水率等预冷条件提供参考依据。张晓娟等^[29]探究了毛豆的最佳真空预冷参数,发现当设置预冷温度 5 ℃,补水量 3%,处理量为 2.5 kg 的预冷参数时,真空预冷处理的毛豆贮藏品质最好。

果蔬在真空预冷过程中,会发生不同程度的失重现象,国内外学者对如何降低果蔬的失重率做了大量的研究。目前,降低失重率的方法主要有预冷前补水、采用化学试剂共处理等,王馨渝等^[30]通过真空预冷与喷雾补水结合共处理上海青,认为喷雾补水共处理既能够防止单独真空预冷造成的失水问题、缩短预冷时间,又使果蔬原料保持较好的品质。另外,采用 1-甲基环丙烯(1-MCP)^[31]、雾化 epsilon-聚赖氨酸^[32]或富氢水^[33]等共处理也被证实可以有效减缓果蔬在真空预冷时的失重率。

随着果蔬真空预冷实验方法的不断完善和研究水平的不断提高,越来越多的学者提出了用于预测不同种类果蔬真空预冷后的温度、保质期、失重率、感官品质等的数值模型,并取得了较好的预测效果。李新平等^[34]建立了针对叶菜类蔬菜的具有适用性的真空预冷模型,对真空预冷的各个参数设定有指导作用;在国外的研究中,Wang 等^[35]建立了根茎类蔬菜真空预冷的传热数学模型,模型模拟结果与实验结果相差不大。

在实际的生产活动中,真空预冷装置还存在高能耗的问题,刘恩海等^[36]研发了以太阳能与生物质能联合驱动的真空预冷设备,为城郊果蔬种植园区及缺电边远山区等区域农户设计果蔬真空预冷冷源的方案提供参考。Deng 等^[37]设计出一台小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置,通过调节盐水泵、改变盐水循环速度解决了目前真空预冷装置体积大、能耗高,且捕水器捕水量不合适的问题。

1.1.2 漂烫技术 漂烫是速冻果蔬冷加工环节的重要步骤,其基本原理是通过营造高温环境,使果蔬原料的酶脱色反应在短期内得到抑制,并将空气从果蔬组织中排出,减少果蔬加工期间的氧化作用,从而达到对果蔬原料护色的目的。漂烫不仅可以减少果蔬中的农药和微生物残留量、防止果蔬腐败,还能软化果蔬组织,提高果蔬在速冻过程中对冰结晶体体积膨胀的承受能力^[38]。目前,应用较为广泛的烫漂方法是传统的热烫漂,如热水烫漂和常压蒸汽烫漂。传统的烫漂因其设备简单,操作方便等优点,已被广泛应用于速冻果蔬的预处理,以提高产品质量^[39]。对于传统烫漂技术的研究主要集中在果蔬烫漂参数优化、烫漂对速冻果蔬营养成分、质构特性的影响等方面。高阳等^[40]探究了不同漂烫时间对南酸枣果实中的糖组分和酸组分的影响,发现 10 min 的热水漂烫处理为南酸枣果实较适宜时长,可以提高果实总糖和总有机酸含量。Ren 等^[41]研究发现洋葱片干燥前在 70 ℃ 下热水烫漂 1 min,或在 60 ℃ 下热水烫漂 3 min,可有效地保护洋葱切片的抗氧化活性物质。但是,传统的漂烫效率不高,并且会产生大量的废水和污染物,增加了环境的负担。

随着技术与设备的进步,烫漂技术也向着快速、节能和操作简便的方向发展。近几年来出现了许多新型烫漂处理方法,如微波烫漂、欧姆烫漂等热力学漂烫和超声波辅助漂烫、脉冲电场漂烫等非热力学漂烫^[42],其处理方式与对果蔬品质的影响如表 2 所示。

在新型热力学漂烫技术方面,微波烫漂的原理是基于使用一定频率的电磁波在果蔬原料中产生热量,达到钝化酶类,降低果蔬内酶促褐变的发生的作用。李凤霞等^[47]以山东红富士为原料在实验中考察了微波漂烫功率和时间对苹果处理后的护色效果的影响,微波漂烫功率为中高火、微波漂烫时间 80 s、干燥时间 4 h、干燥温度 70 ℃ 时,护色效果最佳,且口感好。Delfiya 等^[43]通过实验发现微波漂烫可以在对胡萝卜质构和颜色的影响较小的前提下,提高漂烫后胡萝卜的复水性能和胡萝卜素含量。在实际生产中,由于微波烫漂热源穿透较浅,难以精确控制加

表 2 新型漂烫技术对果蔬特性和品质属性的影响

Table 2 Effects of new blanching technology on the characteristics and quality attributes of fruits and vegetables				
漂烫技术	果蔬种类	处理过程	结论	参考文献
微波漂烫	胡萝卜	微波输出功率: 900 W 工作频率: 2450 MHz 微波漂烫时间: 3 min 盐溶液与样品比例: 2:1	微波漂烫使得胡萝卜原料的最终含水率、颜色、质地变化最小、干燥速率、复水比、β胡萝卜素含量等指标表现更好	[43]
欧姆漂烫	双孢蘑菇	电压: 105 V 温度: 67~90 ℃ 漂烫时间: 5 min	相比传统漂烫,欧姆漂烫处理使蘑菇颜色、硬度损失更小,更有利于酶的失活	[44]
超声波辅助	胡萝卜	溶液: 10 g/L抗坏血酸 溶液温度: 60 ℃ 超声密度: 0.29 W/mL 超声波强度: 178.7 W 作用时间: 10 s	经超声波预处理的胡萝卜样品在产品质构、胡萝卜素含量、V _C 含量、复水率等指标方面都有较好表现	[45]
脉冲电场辅助	苹果	电场强度: 0.66~2.34 kV cm ⁻¹ 脉冲次数: 8~92次 处理温度: 53.18~86.82 ℃	电场强度1.25 kV cm ⁻¹ 、脉冲数50次、处理温度80 ℃的脉冲电场辅助漂烫可以用于生产质量较好的脱水苹果片	[46]

热温度,易造成表面脱水,所以该技术并不适用于大块的果蔬原料以及叶菜类蔬菜。欧姆漂烫的原理是利用果蔬自身的电阻特性,在其两端施加电场,使其在导电的同时,将电能转换为热能的漂烫方法,具有加热速度快、易操作且加热均匀性较好的特点。Barron-Garcia 等^[44]对双孢蘑菇进行欧姆漂烫处理实验,发现相比传统漂烫,欧姆漂烫能在更短的时间内促进多酚氧化酶的失活,减少对蘑菇颜色和质地的影响。但欧姆漂烫也具有一定的局限性,因为欧姆漂烫原理是利用果蔬本身的导电性来加热,所以对于导电性差、含水量低或干燥的原料是不能利用这种方法漂烫的。

在新型非热力学漂烫技术方面,超声波辅助漂烫的原理是利用超声波的机械振动和空化效应使得果蔬中酶的热敏性增强,有效降低漂烫温度和时间。超声波的优势在于加热效应低,可以在环境温度下进行,很好地保护果蔬中的热敏性化合物^[42]。周新丽等^[45]研究了超声波辅助漂烫对冻干胡萝卜品质的影响,发现较于传统漂烫,超声波的应用不仅能极大提升冷冻干燥果蔬的生产效率,还能显著改善冻干产品的品质。脉冲电场辅助漂烫的原理是将短时间的高压电脉冲施加在果蔬原材料上,这种方式可以实现在正常环境温度下灭活微生物和酶,而不会显著影响产品原有的颜色、风味和营养价值。Chauhan 等^[46]研究了漂烫过程中脉冲电场强度、脉冲持续时间和温度对苹果切片能量输入、细胞崩解指数和干燥时间的影响。

1.1.3 速冻技术 速冻果蔬冷加工最后一道工序就是速冻环节,果蔬速冻技术是目前世界上果蔬保存应用最广、发展最快的一种食品加工技术,至今已经在数百种果蔬产品中获得成功应用^[48]。现阶段,果蔬速冻技术的发展主要体现在三个方面:新型速冻技术研究、新型速冻设备研究、果蔬速冻过程模型研究。

目前,最常见的速冻技术主要有鼓风速冻和浸渍速冻两大类,同时近年来出现了超声波、超高压等多种新型速冻辅助技术。鼓风速冻技术是速冻食品行业中的一种传统速冻技术,主要依靠高速的低温空气流对流来传递冷量,其主要优点是果蔬冻结速率均匀,但也存在制冷装置的能耗高、蒸发器结霜、产品干耗、色泽变差和汁液流失严重等问题^[49],随着速冻食品产业的发展和消费者对速冻果蔬品质的要求不断提高,传统鼓风速冻技术的局限日益突出。浸渍速冻技术是以液体载冷剂作为导热介质,通过将果蔬原料直接浸没到低温载冷剂中完成热交换,使食品材料中心温度快速冷却至 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,完成食品速冻加工的技术。Cao 等^[50]研究了浸渍速冻蓝莓的冻结特性,发现相比直接速冻,浸渍速冻荔枝的冻结速率不仅大大提高,蓝莓的细胞组织结构也更完整,营养成分保留率也更高。超声波辅助浸渍速冻技术是在食品冻结过程中加入适宜的高强度低频超声波,以调控

速冻过程的方法,这种技术可以有效地提高速冻速率,使冰晶的体积最小化,从而保持细胞结构的完整性,提高速冻果蔬的质量^[51]。张晓敏等^[52]通过对比实验研究了超声辅助速冻对蓝莓渗透传质特性的影响,发现超声辅助速冻显著缩短了蓝莓的冻结时间,降低解冻后汁液流失率,使果肉状态更接近新鲜蓝莓。高压辅助速冻是在较高的压力下控制果蔬原料的冻结过程。Cheng 等^[53]研究了高压速冻处理蘑菇的理化过程,发现高压更有利于蘑菇中的多酚氧化酶失活,更好保持速冻蘑菇的品质。

在实际生产中,速冻设备性能好坏会直接影响速冻果蔬的品质,我国速冻果蔬生产企业大多采用流态化式、螺旋式和隧道式冻结装置。舒志涛等^[54]分析了冲击式速冻设备喷嘴结构对设备内部换热情况的影响,发现狭缝式喷嘴有助于增加壁面射流区内的传热强度,较好地解决了除停滞区以外其他区域传热强度很低的问题。Zhao 等^[55]研究了在二氧化碳与液氮联合喷射速冻草莓的装置中,不同低温和速冻室不同入口位置下氮气注入速度对速冻草莓冷冻速率的影响。宁静红等^[56]的研究发现液态空气喷雾速冻在传热与节能方面具有突出优势。目前我国研发的速冻设备与国外同类设备在性能指标、结构设计和绿色节能等方面的差距仍然很大。

由于采用实验方法研究速冻过程不具有普适性且成本过高,所以通过精确的建模计算预测整个冻结过程受到了广泛关注。宁静红等^[57]利用 Comsol 软件模拟对草莓进行干冰速冻时的温度场、压力场和喷射速度,对干冰速冻草莓降温性能进行了分析。Zhao 等^[58]采用数值模拟方法对杨梅冷冻过程中的传热过程进行了分析,实验得到杨梅采后保鲜的最佳冷冻速率为 8.51 cm/h ,温度为 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 速冻果蔬冻藏技术

冻藏是果蔬速冻后实现产品长期贮藏以满足销售和加工需求的重要环节,冻藏过程会直接影响产品的最终品质。理想的冻藏技术应该保证速冻果蔬的营养成分及感官状态的损失率尽可能的小,不同的冻藏温度对于速冻果蔬的品质会有不同的影响,不同的果蔬适宜的冻藏温度也会有所偏差^[59]。现阶段,果蔬的冻藏方式可以分为一般冻藏、脱水冻藏和玻璃态冻藏。国内外对于速冻果蔬的一般冻藏和脱水冻藏的研究正逐步趋于成熟,而玻璃态贮藏还处于实验探索阶段,其主要研究如表3所示。

1.2.1 一般冻藏 速冻果蔬一般要求冻藏在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者更低温度下,果蔬在冻藏过程中质地、色泽及营养品质的变化一直都是科研工作者的关注重点。研究表明,冰晶的破坏作用和冷冻浓缩引起的蛋白质变性是引起果蔬冻藏期间品质劣变、营养成分流失的主要原因^[64]。因此,严格控制冻藏温度,优化冻藏工艺参数已成为了速冻果蔬冻藏技术的重要课题。

在不同果蔬的冻藏条件研究方面,陈柏等^[60]研

表 3 速冻果蔬冻藏技术与应用

Table 3 Frozen storage technology and application of quick-frozen fruits and vegetables

冻藏技术	果蔬种类	冻藏条件	结论	参考文献
一般冻藏	鲜核桃	温度: $-6\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-9\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-19\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时间: 8 个月	$(-6\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏的鲜核桃保鲜效果优于其他温度处理的	[60]
	四季豆 胡萝卜	温度: $-8\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-12\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-18\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-23\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时间: 12 个月	冻藏温度波动幅度越大, 对冷冻贮藏期间的品质指标影响越大。	[61]
	芒果	渗透溶液: 混合糖溶液 温度: $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$	玻璃态($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$)的冻藏方式有助于提高冷冻芒果的品质	[62]
玻璃态贮藏	桃子	渗透溶液: 蔗糖、低聚异麦芽糖、葡萄糖、麦芽糖 超声参数设置: 200 W、40 kHz 温度: $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$	麦芽糖处理显著提高了冻干桃片的玻璃化转变温度, 葡萄糖处理则显著降低了玻璃化转变温度	[63]

究了不同温度对鲜核桃冻藏期间感官品质和营养品质的影响情况,发现 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 既可以抑制霉变,又能使其种仁保持较好的营养和风味,在工业上可以实现鲜核桃的周年供应。Matabura 等^[61]研究了温度波动对于速冻四季豆和胡萝卜的成霜、解冻滴漏损失以及抗坏血酸含量影响,说明在冻藏过程应减少温度波动,以延长冷冻四季豆和胡萝卜的储存寿命。

在冻藏工艺参数方面,Li 等^[65]研究了高压冷冻和深度冷冻对冬虫夏草的影响,低温冷冻联合深度冷冻是长期保存冬虫夏草样品的最佳方法。Araujo 等^[66]通过实验探究如何在冻藏过程中利用冷冻保护剂提高益生菌乳酸菌的稳定性,提高速冻果蔬的品质。

1.2.2 玻璃态冻藏 果蔬的冻藏技术的发展与玻璃态贮藏理论有一定的相关性,玻璃态是当体系处于玻璃化转变温度时,分子扩散速率急剧下降,内部黏度大幅升高,整个内部体系稳定,造成品质变化的一切受扩散控制的反应速率均十分缓慢的状态^[67]。Zhang 等^[68]研究发现,在玻璃化转变温度下贮藏能有效抑制芒果维生素 C 含量下降,并能较好地维持芒果原有的营养、色泽和风味。系统研究不同果蔬玻璃化转变温度,阐明玻璃化贮藏下速冻果蔬品质变化规律,对该技术的推广将具有重大的意义。

实现速冻果蔬玻璃化贮藏的研究重点就是测定不同果蔬的玻璃化转变温度,目前,对玻璃转变温度的测定主要采用差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry),核磁共振法(Nuclear Magnetic Resonance),动力机械分析法(Dynamic Mechanical Analysis)等分析手段^[69]。Chigwedere 等^[70]研究了豆类玻璃化转变的温度,测量了体系在达到玻璃-橡胶转变温度区域时的压缩率变化,为长期储存豆类作物提供技术参考。

在此基础上,由于大多数果蔬含有大量的水分,玻璃化转变温度往往较低,因此通过不同方式改变果蔬的玻璃态转化特性,对提升果蔬冻藏的稳定性的具有重要的意义^[71]。Zhao 等^[72]的研究发现不同渗透溶液预处理对芒果玻璃化转变特性的影响不同,由于水分的塑化作用,果蔬的玻璃化转变温度随着水分含量的增加而降低。赵金红等^[62]针对长期冻藏过程中的芒果的品质变化进行对比研究,发现与 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 橡胶态贮藏相比, $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的玻璃态冻藏温度可以长期冻

藏芒果,能更好保持芒果品质。陈腊梅等^[63]探究超声辅助糖液渗透处理对真空冷冻干燥桃片的微观结构、质构特性、吸湿性及玻璃化转变温度的影响,发现超声辅助糖液渗透处理对桃片品质产生影响的同时,也对降低桃片吸湿性和改变桃片体系玻璃化转变温度具有重要影响。

1.3 速冻果蔬运输技术

冷冻运输是保障速冻果蔬产品品质,减少营养成分损失的重要环节,速冻果蔬的运输可以看作是速冻果蔬动态的贮藏,运输过程中果蔬的振动、环境的温度湿度和空气成分都对速冻果蔬的运输效果产生重要的影响。近年来,随着我国冷冻运输设备的建设和完善,速冻食品冷链运输产业得到了蓬勃发展,但在实际冷冻链的应用上远不如发达国家,有研究表明,在我国果蔬产品流通冷链中的损耗率高达 13.2%,而发达国家仅为 5% 左右^[73]。现阶段,我国速冻果蔬的运输以公路运输为主,水路和铁路运输为辅;随着速冻果蔬出口和加工的需求日益旺盛,冷藏集装箱的多式联运的使用率也越来越高。目前,国内外学者主要聚焦于以冷藏车为代表的冷藏运输设备的制冷技术、车内装置优化等方面和冷藏集装箱的箱体设计、空气循环等方面进行研究。

1.3.1 冷藏车技术 冷藏车按照制冷方式可以分为机械制冷、液氮制冷、蓄冷板制冷、LNG 制冷等。它们在冷却能力、温度调节范围等特性的比较如表 4 所示。机械式冷藏车一般利用蒸汽压缩式制冷机组供能,温度可调且范围广,但是机械式冷藏车也存在着运行能耗较高且污染大的问题。为了提高机械冷藏车能源利用效率,扩大配送范围,何仁等^[74]开发了一种太阳能辅助供电制冷系统用于冷藏运输车,该方案不仅具有显著的节能效果,更提高了冷藏运输车的续航能力。

液氮冷藏车是在隔热箱体上装备液氮贮罐,液氮从贮罐中通过喷淋装置实现制冷功能,其经济效率总体上优于机械冷藏车。针对液氮冷藏车动态控制策略和辐射制冷的研究,Wang 等^[75]对包含旁通结构的 LNG 燃料冷藏车车顶辐射冷却系统的性能进行了仿真分析,研究了不同气候条件下各种因素对液氮冷藏车制冷性能的影响,以及制冷系统的动态调节策略。

表 4 冷藏运输设备制冷方式对比表

Table 4 Refrigerated transportation equipment refrigeration mode comparison table

制冷方式	冷却能力	温度调节范围	装载能力	成本	噪声
机械制冷	最低温度约为-20℃,冷却能力取决于车体的大小	-20~15℃	低	设备、燃料以及维修成本均较高	大
液氮制冷	可达-20℃	无温控装置	低	设备成本更低;冷却剂成本较高	无
蓄冷板制冷	冷却温度取决于相变材料的熔化温度	使用不同的相变材料来改变温度	高于机械制冷	比机械制冷便宜	低
LNG制冷	可达-23℃	无温控装置	高	比机械制冷便宜	低

蓄冷板冷藏车利用蓄冷板内的蓄冷剂的吸热溶解特性,吸收车厢内的大量热量,从而达到制冷降温的目的。为提高蓄冷式冷藏车的保冷性能,目前国内外主要的研究方向集中于新型相变材料的蓄冷技术,杨晋等^[76]选用十水硫酸钠(SSD)为主材的相变蓄冷材料,通过 DSC 测试发现混合材料理化性质稳定,经过多次冻融循环,性质变化不大,非常适合用于蓄冷板冷藏车的蓄冷剂;Wu 等^[77]采用机械搅拌与超声振动相结合的方式制备出新型纳米流体相变材料(NFPCMs),经过实验验证其相变温度为-34.54℃,在速冻果蔬冷冻运输领域拥有广阔的应用前景。

在 LNG 冷藏车中,既利用液化天然气驱动运输设备的发动机,又利用 LNG 在汽化过程中回收的冷能提供制冷效果。液化天然气储量丰富,便于运输且安全环保,在冷藏车制冷技术上优势明显。Tan 等^[78]通过理论和实验研究分析了利用液化天然气燃料冷量回收进行自冷的冷藏车的可行性和制冷性能,结果表明:当液化天然气消耗速率大于 5.607 kg/h 时,可以使箱体制冷温度保持在-20℃ 以下,达到自制冷系统可以完全取代原有的机械制冷机组的效果,同时,车厢制冷降温特性良好,温度场分布均匀性效果较好。

为保障速冻果蔬的品质,通常会对冷藏车内的各种设备进行优化。快速精准调节过热度是提高冷藏车制冷性能的有效途径之一。苏之勇等^[79]研究了一种新型电子膨胀阀,可以通过控制蒸发器出口过热度来改善系统蒸发器内温度分布的均匀性,提高蒸发器换热能力,从而提升冷藏车制冷系统性能。在冷藏车系统中,风机是一种重要的制冷设备,其风量的控制与调节直接关系到冷藏车的节能与实用性。针对冷藏车行驶过程中,由于风机风量设定不合理,造成制冷性能衰减,系统能耗增大的问题,李海军等^[80]搭建准双级压缩低压补气型冷藏车制冷系统试验台,测定当库内风量为 7000 m³/h,库外风量达到 7500 m³/h 时,系统冷藏系统能效比达到最大值 2.167,此状况下冷藏车厢的保冷性能较好。冷藏车内部环境实时监测对保障速冻果蔬产品质量安全和降低产品损耗具有重要意义,以传统传感器为主的常规的冷藏车环境监测系统缺乏足够可靠性和动态预警手段。倪锦等^[81]建立了基于荧光光纤技术的冷藏车温度监测方案,可以较好的预估冷藏车温度变化趋势,并根据温度预警域的变化,动态调节预警值,实现对冷藏车厢状况的动态预警。

1.3.2 冷藏集装箱技术 冷藏集装箱因其良好的隔热、抗震、维持低温等特点而被广泛用于速冻果蔬冷冻链中,冷藏集装箱可以实现长距离整体运输,提高运输效率,降低运输成本,更好地服务于速冻果蔬的出口和加工^[82]。目前,研究人员主要聚焦于冷藏集装箱箱体设计、内部气场模拟和货物的堆码方式等。

对冷藏集装箱箱体的设计,国内外研究主要集中在冷板在箱体中的位置和箱体的围护结构设计。冷板放置在合适位置可以提高冷藏集装箱的蓄冷量,延长冷藏运输时间,目前大部分蓄冷冷板安装在箱体顶部,存在重心偏高、不可控温等问题。谢如鹤等^[83]利用流体力学技术对冷板顶置、冷板侧置、冷板部分顶置部分侧置的空载冷藏集装箱内温度场进行了非稳态数值模拟研究,结果表明蓄冷冷板部分顶置部分侧置的方式相较于其他两种方式蓄冷更均匀,能耗更低。箱体围护结构对整个集装箱的隔热性能起着至关重要的作用,国内外研究较多的是将相变材料应用于冷藏集装箱的围护结构,这样可以降低通过厢壁传到厢内的热量,既延长了蓄冷时间,又实现了节能减排的目的。Zdun 等^[84]通过采用石蜡基(pcm)加入集装箱壁上的方式降低外界环境热对冷藏集装箱的影响,不仅可以节约能源,减少制冷设备的尺寸,延长设备的使用寿命,还可以更好地保障速冻产品的质量。

许多学者研究了冷藏集装箱内部的气流组织分布情况,从冷藏车厢内部空间气流的角度,探究如何保证冷藏集装箱内的温度保持恒定范围。贾发铜等^[85]采用流体力学技术对冷藏集装箱的空气流速和冷源温度对果蔬的影响进行模拟,对影响箱体内温度分布的相关因素进行了对比分析,为冷藏集装箱的进一步优化提供参考。

另外,速冻果蔬货物的堆码方式也对冷藏集装箱的运输效果有着影响,Jiang 等^[86]通过建立一种改进冷藏集装箱的三维流体力学模型,研究了货物堆码方式和箱体内部结构对制冷性能的影响,发现改进后的冷藏集装箱内温度分布变化在±1℃ 以内,冷却时间减少 22.9%,气流和温度的分布得到了很大的改善,对不同的水果和蔬菜具有良好的适用性。

1.4 速冻果蔬冷冻链信息技术

速冻果蔬全程监测与产品质量溯源是速冻果蔬冷冻链智慧化的有效手段,在速冻果蔬冷冻链涉及的前端、中端和末端环节上,检测和追溯速冻果蔬的全

流程信息,不仅可以最大限度地提高速冻果蔬的感官品质,让产品可以溯源到产地,为消费者提供更好的产品与服务,还可以降低制冷成本和货物损失,提高果蔬加工行业标准化水平。我国速冻果蔬冷冻链信息的传递过程如图 2 所示。目前,大数据、人工智能、区块链等新一代信息技术正高速发展,但是相关技术在速冻果蔬冷冻链的实际应用受到软硬件设备落后、供应链企业复杂、信息系统分散等多种因素制约^[87]。

目前,研究人员以物联网、云计算等技术建立信

息平台,综合利用全球定位系统(Global Positioning System)、全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications)、射频识别技术(Radio Frequency Identification)、无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)等,实现速冻果蔬冷冻链信息平台集成和可视化,提供对速冻果蔬冷冻链的动态监测、风险预警、精确控制、质量追溯和数据分析与挖掘等功能,有效实现速冻果蔬冷冻链信息资源整合、集聚、共享和服务。Urbano 等^[88]提出了一种基于无线射频识别技术的冷链物流信息实时跟踪系统。采用

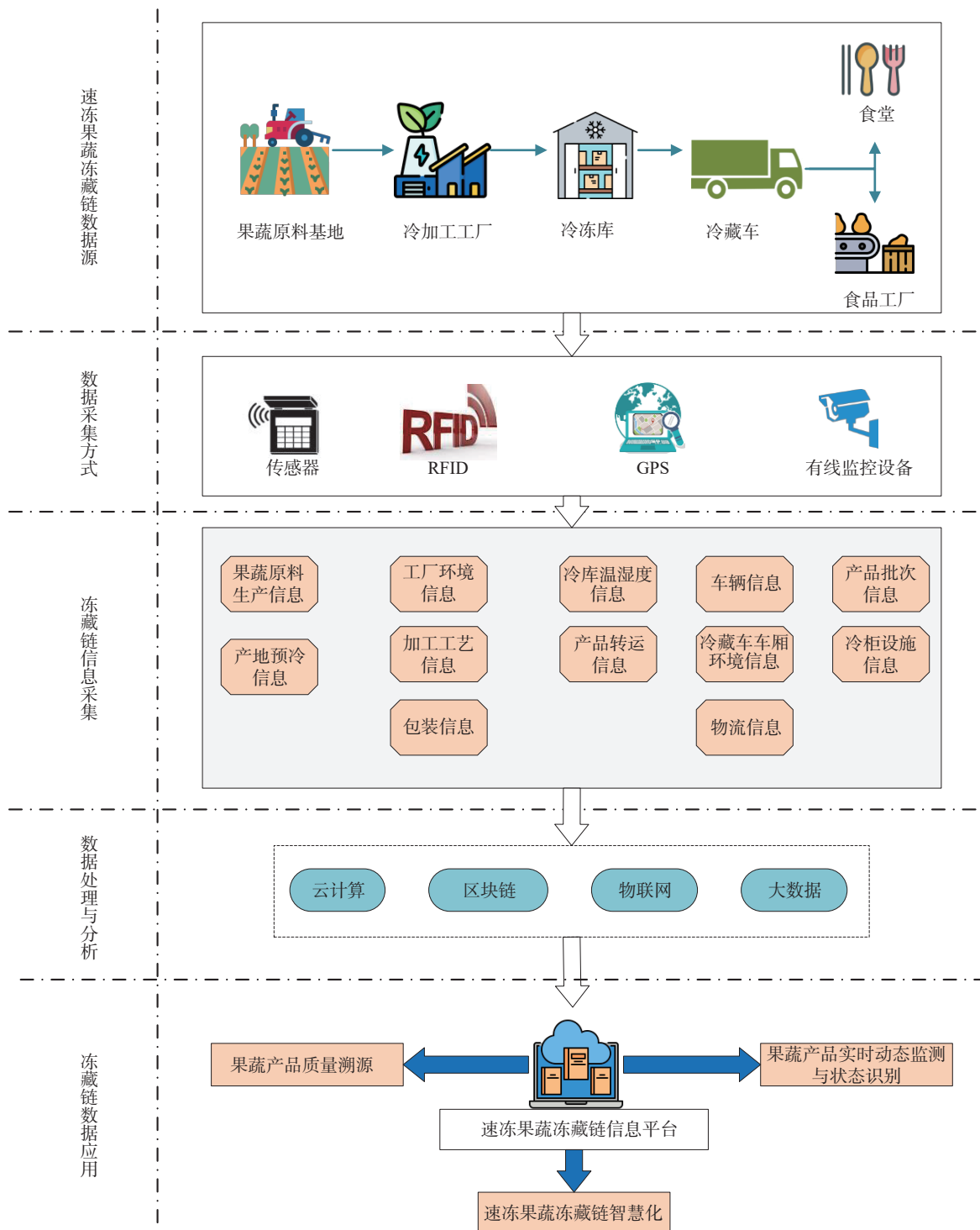


图 2 速冻果蔬冷冻链信息的传递过程

Fig.2 Transfer process of frozen chain information of frozen fruits and vegetables

无线 RFID 读卡器实时获取食品温度、车辆运行位置信息、农产品信息等数据,从而实现冷链物流信息的实时跟踪和监控,解决了可追溯系统中典型的互连和成本实施问题。Mejjaoui 等^[89]建立了一种基于 RFID-WSN-GPS 的冷链实时监控系统的数学模型,可以在运输过程中对所运输的货物进行监测,当出现偏离最佳运输条件或者出现货物变质的风险时,及时通知司机采取补救措施。何静等^[90]将量子区块链技术应用与果蔬冷链追溯系统的构建和运行中,借助量子区块链高速、安全、智能的优势,为解决冷链食品追溯中存在的缺乏信任、信息不对称、环节缺失、数据冗余等问题提供参考。Han 等^[91]基于 RFID 技术、传感设备、GPS 系统、模糊 PID 分级控制等物联网技术构建了一套冷链物流智能系统,通过打通物流信息链,合理化资源配置,实现物流系统能耗可预测、物流信息可追溯,提高整个果蔬供应链的物流效率。

2 速冻果蔬冷冻链技术研究评价

综上所述,越来越多国内外的研究人员对速冻果蔬冷冻链各个环节的技术进行深入研究,使得我国速冻果蔬在生产和流通加工的研发能力稳步提升。但是从技术研究和实践应用角度来看,我国速冻果蔬冷冻链还存在以下几点问题:

a.在果蔬速冻特性研究方面,缺少不同速冻技术对果蔬冰晶尺寸分布和微观结构影响的研究,目前的技术无法完全解决速冻造成的果蔬微观结构退化的问题。果蔬速冻 CFD 建模过程中,忽视了冰核和晶体生长、热膨胀以及细胞变形等伴随冻结过程的其他现象,无法进行全面有效的预测。缺少对于不同种类果蔬生理特性和冷冻环境适应性的研究,无法对不同类型的速冻果蔬进行个性化冷冻链场景设计。

b.在冷冻链设备的研究和应用方面,缺少不同速冻设备能耗和零部件选型的研究,新型可持续能源与冷冻链设备结合的研究尚处于起步阶段,速冻设备绿色化研究水平较低。不同新兴速冻辅助技术联合处理的设备研究仍处于实验室阶段,缺少将实验室结果转化为工业应用的可行性的研究。缺少不同环节之间冷冻链设备衔接的研究,无法营造全程冻藏的环境,容易出现因温度波动而导致冷冻链“断链”的问题。

c.在信息技术方面,缺少新型传感器在速冻果蔬冷冻链场景下的应用研究,传统溯源系统存在追溯信息不全面、数据关联性不足、查询效率低等问题,缺少速冻果蔬冷冻链数据分析与挖掘技术的研究。这些不足制约了速冻果蔬冷冻链全程监控与溯源的功能。

3 结论与展望

本文总结了速冻果蔬冷冻链技术的发展现状,从物流角度归纳了速冻果蔬从前端到末端全链条中的各种技术的应用,发现虽然我国速冻果蔬产业发展

迅速,但是在果蔬速冻特性、冷冻链设备及信息技术等研究方面的研究还存在一些不足。因此,对未来重点研究方向提出展望如下:

a.加强不同速冻果蔬在冷冻链各个环节的模型研究,利用数字成像等新兴技术提高建模准确性,根据不同果蔬在冷冻条件下内部微观结构与生理指标变化规律,对比分析冷冻链设备各部件的布置和设计对设备内部速度场、压力场、温度场的影响,从而优化速冻果蔬冷冻链工艺,为不同品种的速冻果蔬冷冻链场景设计全流程方案。

b.加强速冻果蔬冷冻链技术标准化、绿色化研究。促进新型能源在果蔬速冻、冻藏、运输的各个环节的应用,提高设备自动化、智能化水平,结合智能监控、智能筛选、自动包装、自动抽真空、智能速冻等功能对速冻果蔬冷冻链进行优化,减少在流通加工过程中产品的损耗,提高速冻果蔬品质,推动我国速冻果蔬产业更高水平发展。

c.加强新型传感器、物联网、大数据等先进技术为速冻果蔬冷冻链的赋能作用,采用更小型化、高集成化、柔性化的传感器,优化传感器布局,提高冷冻链全程监测与溯源质量。建立起具有高可视化水平的冷冻链信息监测平台与追溯系统,实现速冻果蔬从产地到终端各个环节的动态监测和信息追溯。

© The Author(s) 2024. 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] ZHAO H X, LIU S, TIAN C Q, et al. An overview of current status of cold chain in China[J]. *Int J Refrig*, 2018, 88: 483–495.
- [2] STOREY M, ANDERSON P. Total fruit and vegetable consumption increases among consumers of frozen fruit and vegetables[J]. *Nutrition*, 2018, 46: 115.
- [3] LU S, CHENG G, LI T, et al. Quantifying supply chain food loss in China with primary data: A large-scale, field-survey based analysis for staple food, vegetables, and fruits[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 177: 106006.
- [4] 宋佳玮, 郑明媛, 王宇, 等. 果蔬速冻技术、设备和质量控制现状分析[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(3): 154–161. [SONG J W, ZHENG M Y, WANG Y, et al. The current situation analysis of quick freezing technique, equipment and quality control for fruits and vegetables in China[J]. *Storage and Process*, 2019, 19(3): 154–161.]
- [5] BOUZARI A, HOLSTEGE D, BARRETT D M. Mineral, fiber, and total phenolic retention in eight fruits and vegetables: A comparison of refrigerated and frozen storage[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2015, 63(3): 951–956.
- [6] 冷鹏, 周楷轩, 崔爱华, 等. 后疫情时代速冻蔬菜产业发展现状与对策研究[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(10): 125–128, 135. [LENG P, ZHOU K X, CUI A H, et al. Development status and countermeasures of quick-frozen vegetable industry in post-epidemic era[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(10): 125–128, 135.]
- [7] AS'AD R, CHAABANE A, GERAMIANFAR R, et al. Utiliz-

- ing energy transition to drive sustainability in cold supply chains: A case study in the frozen food industry[J]. *RAIRO-Operations Research*, 2022, 56(3): 1119–1147.
- [8] 伍景琼, 郑露, 巴雪琴, 等. 果蔬农产品冷链物流技术研究进展[J]. *北京交通大学学报(社会科学版)*, 2023, 22(3): 119–135. [WU J Q, ZHENG L, BA X Q, et al. Progress of research on cold chain logistics technology for fruit and vegetable agricultural products[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 2023, 22(3): 119–135.]
- [9] WU W, DEFRAEYE T. Identifying heterogeneities in cooling and quality evolution for a pallet of packed fresh fruit by using virtual cold chains[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 407–417.
- [10] DUAN Y, WANG G B, FAWOLE O A, et al. Postharvest precooling of fruit and vegetables: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 100: 278–291.
- [11] JUNJIE Y, MEI G, GUISHAN L, et al. Research progress in simultaneous heat and mass transfer of fruits and vegetables during precooling[J]. *Food Engineering Reviews*, 2022, 14(2): 307–327.
- [12] 庄言, 张婷, 韩永斌, 等. 冰水预冷及贮藏温度对水芹贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(24): 279–284. [ZHUANG Y, ZHANG T, HAN Y B, et al. Effects of Ice water precooling and storage temperature on physiological and biochemical characteristics of *Oenanthe javanica*[J]. *Food Science*, 2013, 34(24): 279–284.]
- [13] ZAINAL B, DING P, ISMAIL I S, et al. Physico-chemical and microstructural characteristics during postharvest storage of hydrocooled rockmelon (*Cucumis melo* L. reticulatus cv. Glamour)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 152: 89–99.
- [14] 刘瑶, 左进华, 高丽朴, 等. 流态冰预冷处理对甜玉米贮藏品质的影响[J]. *制冷学报*, 2020, 41(3): 83–90. [LIU Y, ZUO J H, GAO L P, et al. Effect of slurry ice precooling treatment on quality of sweet corn[J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(3): 83–90.]
- [15] TOKARSKYY O, SCHNEIDER K R, BERRY A, et al. Sanitizer applicability in a laboratory model strawberry hydrocooling system[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2015, 101: 103–106.
- [16] SENA E D O A, SILVA P S O D, BATISTA M C D A, et al. Calcium application via hydrocooling and edible coating for the conservation and quality of cashew apples[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256(C): 108531.
- [17] PERVITASARI A N, KIM J H, CHO K, et al. Effects of hydrocooling and 1-MCP treatment on the quality changes of peach fruit during storage[J]. *Hortic Sci Technol*, 2021, 39(6): 769–780.
- [18] WANG G B, ZHANG X R. Evaluation and optimization of air-based precooling for higher postharvest quality: Literature review and interdisciplinary perspective[J]. *Food Qual Saf*, 2020, 4(2): 59–68.
- [19] 王冠邦, 张信荣. 冷库预冷流动传热物理场分布研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(3): 668–675. [WANG G B, ZHANG X R. Study on distribution of physical fields regarding to airflow and heat transfer of room cooling[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(3): 668–675.]
- [20] SHI W, ZHAO Y, YAN Z, et al. Effects of different precooling methods on storage quality of sweet corn[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 218–226.
- [21] 金滔, 李博, 朱宗升, 等. 苹果垂直送风式压差预冷性能模拟与分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 369–375. [JIN T, LI B, ZHU Z S, et al. Simulation and analysis of forced-air precooling of apples with vertical air supply[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 369–375.]
- [22] 季丽丽, 梁芸志, 陈存坤, 等. 不同温度差压预冷及其对西葫芦冷藏效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 287–293. [JI L L, LIANG Y Z, CHEN C K, et al. Forced-air pre-cooling of different temperatures and its effects on cold storage of *Cucurbita pepo*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1): 287–293.]
- [23] LIU F, JIA B G, LI Z C, et al. Thermodynamics analysis for forced air pre-cooling of cherry[J]. *J Food Process Eng*, 2021, 44(11): 11.
- [24] KUMAR A, KUMAR R, SUBUDHI S. Experimental investigations of periodic airflow reversal during forced-air cooling of apples: Impacts on cooling rate and uniformity[J]. *J Food Eng*, 2023, 359: 12.
- [25] CAO Y H, GONG Y F, ZHANG X R. Impact of ventilation design on the precooling effectiveness of horticultural produce-A review[J]. *Food Qual Saf*, 2020, 4(1): 29–40.
- [26] NALBANDI H, SEIIEDLOU S. Sensitivity analysis of the precooling process of strawberry: Effect of package designing parameters and the moisture loss[J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(5): 2458–2471.
- [27] 顾洋, 黄国锋. 移动式差压预冷机, CN212029962U[P/OL]. 2020-11-27. [GU Y, HAUNG G F. Mobile differential pressure precooler, CN212029962U[P/OL]. 2020-11-27.]
- [28] 严锐, 韩延超, 吴伟杰, 等. 真空预冷对鲜食莲子采后贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(13): 331–337. [YAN R, HAN Y C, WU W J, et al. Effect of vacuum pre-cooling on postharvest storage quality of fresh lotus seeds[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(13): 331–337.]
- [29] 张晓娟, 刘贵珊, 余江泳, 等. 真空预冷毛豆参数优化及其对贮藏特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(23): 156–161. [ZHANG X J, LIU G S, YU J Y, et al. Parameter optimization and effect on storage property of vacuum pre cooling soybean[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(23): 156–161.]
- [30] 王馨渝, 安容慧, 赵安琪, 等. 真空预冷过程中喷雾补水处理对低温流通及货架期上海青品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(7): 211–219. [WANG X Y, AN R H, ZHAO A Q, et al. Effect of vacuum pre-cooling co-treatment with atomized water on the quality of pakchoi during low temperature circulation and shelf life[J]. *Food Science*, 2023, 44(7): 211–219.]
- [31] LI J, MA G W, MA L, et al. Multivariate analysis of fruit antioxidant activities of blackberry treated with 1-methylcyclopropene or vacuum precooling[J]. *Int J Anal Chem*, 2018, 2018: 2416461.
- [32] WANG X, AN R, ZHAO A, et al. Effect of vacuum pre-cooling co-treated with atomized epsilon-polylysine on postharvest quality of pakchoi[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(6): 103–115.
- [33] AN R H, LUO S F, ZHOU H S, et al. Effects of hydrogen-rich water combined with vacuum precooling on the senescence and antioxidant capacity of pakchoi (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 10.
- [34] 李新平, 臧润清, 董杰. 叶菜类蔬菜真空预冷模型的研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(12): 265–269, 277. [LI X P, ZANG R Q, DONG J, et al. Vacuum precooling model of leaf vegetables[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(12): 265–269, 277.]
- [35] WANG N, KAN A K, HUANG Z P, et al. CFD simulation of heat and mass transfer through cylindrical *Zizania latifolia* during vacuum cooling[J]. *Heat Mass Transf*, 2020, 56(2): 627–637.
- [36] 刘恩海, 周前, 刘圣勇, 等. 太阳能与生物质能耦合供能在果蔬真空预冷中的试验研究[J]. *食品工业*, 2017, 38(9): 147–151.

- [LIU E H, ZHOU Q, LIU S Y, et al. The application of solar energy and biomass energy supply coupling in the vacuum pre-cooling of fruits and vegetables[J]. The Food Industry, 2017, 38(9): 147-151.]
- [37] DENG G, KANG N, WANG S, et al. Design and experiment of small cooling storage vacuum precooling device for fresh wolfberry with stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 367.
- [38] BASSEY E J, CHENG J H, SUN D W. Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 137-148.
- [39] 龚楚婷, 张杭进, 岳进, 等. 新型果蔬漂烫技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(22): 341-345, 352. [GONG C T, ZHANG H J, YUE J, et al. Research progress of new blanching technology for fruits and vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(22): 341-345, 352.]
- [40] 高阳, 丁菲, 吴南生, 等. 漂烫时间对南酸枣果实糖酸组分的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(4): 759-765. [GAO Y, DING F, WU N S, et al. Effect of different blanching time lengths on sugar and acid components of choerospondias axillaris fruit[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(4): 759-765.]
- [41] REN F Y, PERUSSELLO C A, ZHANG Z H, et al. Enhancement of phytochemical content and drying efficiency of onions (*Allium cepa* L.) through blanching[J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(4): 1300-1309.
- [42] DENG L Z, MUJUMDAR A S, ZHANG Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes - A comprehensive review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2019, 59(9): 1408-1432.
- [43] DELFIYA A, MOHAPATRA D, KOTWALI WALE N, et al. Effect of microwave blanching and brine solution pretreatment on the quality of carrots dried in solar-biomass hybrid dryer[J]. J Food Process Preserv, 2018, 42(2): 14.
- [44] BARRON-GARCIA O Y, NAVA-ALVAREZ B, GAYTAN-MARTINEZ M, et al. Ohmic heating blanching of *Agaricus bisporus* mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture[J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2022, 80: 10.
- [45] 周新丽, 申炳阳, 张三强, 等. 超声波辅助冷冻干燥对胡萝卜品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(8): 196-202. [ZHOU X L, SHEN B Y, ZHANG S Q, et al. Effect of ultrasonic assisted freeze drying on the quality of carrot[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(8): 196-202.]
- [46] CHAUHAN O P, SAYANFAR S, TOEPFL S. Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices[J]. J Food Sci Technol-Mysore, 2018, 55(6): 2251-2258.
- [47] 李凤霞, 雷清玉, 盛红叶, 等. 工艺参数对苹果果脯护色效果的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 207-211, 215. [LI F X, LEI Q Y, SHENG H Y, et al. Effects of different processing parameters on the color protecting of candied apple[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 207-211, 215.]
- [48] 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. [TANG J Y, SHAO S Q, XU H B, et al. Progress in research on the food quick-freezing method and simulation technology[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(6): 1-9.]
- [49] YU L X, JIANG Q X, YU D W, et al. Quality of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) during the storage at 18 degrees C as affected by different methods of freezing[J]. Int J Food Prop, 2018, 21(1): 2100-2109.
- [50] CAO X, ZHANG F, ZHAO D, et al. Effects of immersion freezing methods on freezing characteristics of blueberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(11): 184-190.
- [51] ZHU Z W, CHEN Z B, ZHOU Q Y, et al. Freezing efficiency and quality attributes as affected by voids in plant tissues during ultrasound-assisted immersion freezing[J]. Food Bioprocess Technol, 2018, 11(9): 1615-1626.
- [52] 张晓敏, 张尚悦, 白鸽, 等. 超声波辅助冻结对蓝莓渗透传质特性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 223-231. [ZHANG X M, ZHANG S Y, BAI G, et al. Effect of ultrasonic-assisted immersion freezing on the osmotic mass transfer characteristics of blueberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 223-231.]
- [53] CHENG L N, ZHU Z W, SUN D W. Impacts of high pressure assisted freezing on the denaturation of polyphenol oxidase[J]. Food Chem, 2021, 335: 9.
- [54] 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. [SHU Z T, XIE J, YANG D Z. Research progress on performance optimization of impingement quick-freezing equipment with nozzle structure[J]. Food & Machinery, 2018, 34(6): 187-191.]
- [55] ZHAO Y F, NING J H, SUN Z Y. Study on liquid nitrogen and carbon dioxide combined jet quick-frozen strawberry[J]. Int J Refrig, 2022, 136: 1-7.
- [56] 宁静红, 贾永勤, 王润霞, 等. 基于液态空气喷雾速冻鲜枣片的数值分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 258-266. [NING J H, JIA Y Q, WANG R X, et al. Numerical analysis of quick-frozen jujube slices based on liquid air spray[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 258-266.]
- [57] 宁静红, 赵延峰, 孙朝阳. 草莓干冰喷射速冻过程的数值模拟与优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 306-314. [NING J H, JIA Y Q, WANG R X, et al. Numerical analysis of quick-frozen jujube slices based on liquid air spray[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 37(1): 306-314.]
- [58] ZHAO Y H, JI W, GUO J, et al. Numerical and experimental study on the quick freezing process of the bayberry[J]. Food Bioprod Process, 2020, 119: 98-107.
- [59] NERI L, FAIETA M, DI MATTIA C, et al. Antioxidant activity in frozen plant foods: Effect of cryoprotectants, freezing process and frozen storage[J]. Foods, 2020, 9(12): 35.
- [60] 陈柏, 顾敏华, 吴小华, 等. 不同冷冻温度对‘清香’去青皮鲜核桃冻藏期间品质的影响[J]. 经济林研究, 2019, 37(3): 65-72. [CHEN B, XIE M H, WU X H, et al. Effects of different freezing temperatures on quality of peeled fresh ‘Qingxiang’ walnut during freezing storage[J]. Non-wood Forest Research, 2019, 37(3): 65-72.]
- [61] MATABURA V V. Impact of temperature fluctuations on quality changes of frozen green beans and carrots during storage[J]. Food Sci Technol Int, 2023, 29(1): 62-74.
- [62] 赵金红, 肖红伟, 丁洋, 等. 在长期冻藏过程中渗透脱水前处理和玻璃态贮藏对冷冻芒果品质的影响[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(12): 65-72. [ZHAO J H, XIAO H W, DING Y, et al. Effect of osmotic dehydration pretreatment and glassy state storage on the quality attributes of frozen mangoes under long term storage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12): 65-72.]
- [63] 陈腊梅, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助糖液渗透处理对真空冷

- 冻干燥桃脆片干制品品质及吸湿性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(17): 117–123. [CHEN L M, JIN X, BI J F, et al. Effect of ultrasonic-assisted sugar osmotic pretreatment on quality and hygroscopicity of vacuum freeze-dried peach chips[J]. *Food Science*, 2022, 43(17): 117–123.]
- [64] MA Y C, YI J Y, JIN X, et al. Freeze-drying of fruits and vegetables in food industry: Effects on phytochemicals and bioactive properties attributes-A comprehensive review[J]. *Food Rev Int*, 2023, 39(9): 6611–6629.
- [65] LI D M, ZHU Z W, SUN D W. Effects of high-pressure freezing and deep-frozen storage on cell structure and quality of cordyceps sinensis[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2023, 175: 9.
- [66] ARAUJO C M, SAMPAIO K B, MENEZES F, et al. Protective effects of tropical fruit processing coproducts on probiotic lactobacillus strains during freeze-drying and storage[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(1): 15.
- [67] MAHATO S, ZHU Z W, SUN D W. Glass transitions as affected by food compositions and by conventional and novel freezing technologies: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 94: 1–11.
- [68] ZHANG Y, ZHAO J H, DING Y, et al. Changes in the vitamin C content of mango with water state and ice crystals under state/phase transitions during frozen storage[J]. *J Food Eng*, 2018, 222: 49–53.
- [69] 邢思熙, 梁硕, 徐晓筱, 等. 玻璃化技术及其应用研究进展[J]. *药物生物技术*, 2021, 28(3): 284–290. [XING S X, LIANG S, XU X X, et al. Recent advances in vitrification technology and its application[J]. *Pharmaceutical Biotechnology*, 2021, 28(3): 284–290.]
- [70] CHIGWEDERE C M, FLORES J N H, PANOZZO A, et al. Instability of common beans during storage causes hardening: The role of glass transition phenomena[J]. *Food Res Int*, 2019, 121: 506–513.
- [71] ROOS Y H. Glass transition and re-crystallization phenomena of frozen materials and their effect on frozen food quality[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 10.
- [72] ZHAO J H, DING Y, YUAN Y J, et al. Effect of osmotic dehydration on desorption isotherms and glass transition temperatures of mango[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2018, 53(11): 2602–2609.
- [73] QI T T, JI J, ZHANG X L, et al. Research progress of cold chain transport technology for storage fruits and vegetables[J]. *J Energy Storage*, 2022, 56: 18.
- [74] 何仁, 杨柳, 胡东海. 冷藏运输车太阳能辅助供电制冷系统设计及分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2018, 48(6): 1645–1652. [HE R, YANG L, HU H D. Design and analysis of refrigeration system supplied by solar auxiliary power of refrigerator car[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2018, 48(6): 1645–1652.]
- [75] WANG F, LI M C, ZHANG Y L, et al. Study on roof-mounted radiant cooling system for LNG-fueled refrigerated vehicles[J]. *Int J Low-Carbon Technol*, 2021, 16(2): 268–274.
- [76] 杨晋, 殷勇高, 陈万河, 等. 硫酸钠水合盐相变蓄冷材料的制备及性能优化[J]. *化工进展*, 2022, 41(11): 5977–5985. [YANG J, YIN Y G, CHEN W H, et al. Preparation and performance optimization of phase change cold storage materials with sodium sulfate hydrate salt[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(11): 5977–5985.]
- [77] WU T, XIE N, NIU J Y, et al. Preparation of a low-temperature nanofluid phase change material: MgCl₂-H₂O eutectic salt solution system with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)[J]. *Int J Refrig*, 2020, 113: 136–144.
- [78] TAN H B, LI Y Z, TUO H F. Theoretical and experimental study on a self-refrigerating system for LNG-fueled refrigerated vehicles[J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2014, 20: 192–199.
- [79] 苏之勇, 刘磊, 郭得锋, 等. 蒸发器出口过热度对冷藏车制冷系统性能的影响[J]. *低温与超导*, 2022, 50(6): 49–54, 108. [SU Z Y, LIU L, GUO D F, et al. Effect of superheat at evaporator outlet on refrigeration system performance of refrigerator truck[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2022, 50(6): 49–54, 108.]
- [80] 李海军, 张中来, 苏之勇, 等. 风机对冷藏车制冷系统性能的影响[J]. *流体机械*, 2021, 49(7): 91–97. [LI H J, ZHANG Z L, SU Z Y, et al. The influence of fans on the performance of refrigerated truck refrigeration system[J]. *Fluid Machinery*, 2021, 49(7): 91–97.]
- [81] 倪锦, 徐文其, 沈建. 基于荧光光纤传感的冷藏车温度监测及动态预警[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(2): 157–161. [NI J, XU W Q, SHEN J. Temperature monitoring and dynamic early warning of refrigerated trucks based on fluorescence optical fiber sensing[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(2): 157–161.]
- [82] CUDINA P, BEZIC A. Reefer vessel versus container ship[J]. *Brodogradnja*, 2019, 70(1): 129–141.
- [83] 谢如鹤, 唐海洋, 陶文博, 等. 基于空载温度场模拟与试验的冷藏车冷板布置方式优选[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 290–298. [XIE R H, TANG H Y, TAO W B, et al. Optimization of cold-plate location in refrigerated vehicles based on simulation and test of no-load temperature field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 290–298.]
- [84] ZDUN K, UHL T. Improvement of properties of an insulated wall for refrigerated trailer-numerical and experimental study[J]. *Energies*, 2022, 15(1): 19.
- [85] 贾发铜, 杨大章, 谢晶, 等. 冷藏集装箱温度场均匀性改善研究进展[J]. *食品与机械*, 2020, 36(7): 216–220. [JIA F T, YANG D Z, XIE J, et al. Research progress on improving temperature distribution uniformity of refrigerated containers[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(7): 216–220.]
- [86] JIANG T, XU N Q, LUO B J, et al. Analysis of an internal structure for refrigerated container: Improving distribution of cooling capacity[J]. *Int J Refrig*, 2020, 113: 228–238.
- [87] HAN J W, ZUO M, ZHU W Y, et al. A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 536–551.
- [88] URBANO O, PERLES A, PEDRAZA C, et al. Cost-effective implementation of a temperature traceability system based on smart RFID tags and IoT services[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 19.
- [89] MEJJAOULI S. RFID-WSN-GPS-Based cold supply chain real-time monitoring and control system[J]. *Arab J Sci Eng*, 2022, 47(11): 15117–15131.
- [90] 何静, 胡鑫月. 基于量子区块链的食品冷链追溯系统构建[J]. *食品科学*, 2022, 43(15): 294–301. [HE J, HU X Y. Construction of food cold chain traceability system based on quantum blockchain[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 294–301.]
- [91] HAN Q H. Research on the construction of cold chain logistics intelligent system based on 5G ubiquitous internet of things[J]. *J Sens*, 2021, 2021: 11.