

【产业物流】

# 果蔬农产品冷链物流技术研究进展

伍景琼 郑露 巴雪琴 杨敏

**【摘要】**果蔬农产品在采后受外界温度影响极易发生品质劣变,冷链物流技术能够有效保持农产品的新鲜度,包括色泽、风味和营养品质。通过梳理国内外全程冷链物流环节技术对果蔬品质的保鲜和影响作用的发展现状,总结我国果蔬农产品冷链物流技术研究及应用,可以比较我国与发达国家存在的差距和问题。研究表明,果蔬冷链物流技术研究越来越精细化,数值模拟及仿真成为果蔬冷链物流技术研究常用的方法,果蔬冷链物流技术研究呈现多学科融合发展趋势。但是,仍存在冷链物流技术对果蔬生理和温湿度特性影响研究不全面、果蔬全程冷链信息监测和追溯技术落后、果蔬冷链物流技术应用落后于理论研究等不足。因此,未来应加强各环节冷链物流技术对果蔬特性的影响研究,在研究方法上注重数值模拟和现场实验相结合,以及加快冷链物流技术的推广和应用。

**【关键词】**果蔬冷链物流技术;果蔬农产品;冷链环节;冷却效果;全程冷链

**【作者简介】**伍景琼,女,昆明理工大学交通工程学院副教授,研究方向:冷链物流系统优化;郑露,女,昆明理工大学交通工程学院硕士研究生,研究方向:农产品物流与供应链管理;巴雪琴,杨敏,昆明理工大学交通工程学院(昆明 650500)。

**【原文出处】**《北京交通大学学报》:社会科学版,2023.3.119~135

**【基金项目】**国家自然科学基金项目“交通减贫效应测度及交通资源配置的空间补偿策略”(71904068);云南省省院省校教育合作人文社科项目“云南航空物流业高质量发展对策研究”(SYSX202016)。

## 一、引言

果蔬农产品冷链物流是果蔬在采后的贮藏、包装、运输、销售等环节中,始终处于所需要的低温环境,从而降低果蔬流通损耗的过程。近年来,随着我国农业结构调整和居民消费水平的提高,果蔬农产品的产量和购买量逐年增加,消费者对果蔬农产品的多样性、获得的及时性需求日趋旺盛,同时对果蔬农产品的品质和安全也更为关注。作为保障果蔬农产品质量安全的冷链物流技术,也随着果蔬冷链物流高质量需求的持续增长而不断创新和深化,冷链物流技术由“冷库贮藏—冷藏运输”逐渐丰富为“产地预冷—低温贮藏—低温包装—低温装卸搬运—冷藏运输和配送—冷藏销售”全过程。我国部分冷链物流技术的研究已经达到国际先进水平,但相比于发达国家,国内果蔬冷链物流技术的整体研究和

应用还不够深入,还存在果蔬冷却品质差、冷却效率低等问题,难以满足消费者对高品质的需求。加强对果蔬农产品冷链物流技术的研究和应用推广,有利于提高果蔬农产品的冷链流通率、降低流通损耗,实现果蔬农产品的绿色、安全、品质消费,对促进我国果蔬农产品冷链物流业的高质量发展有着重要意义。

冷链物流技术具有集成度高、跨时空、多环节、多业态和学科高度交叉的特点,结合果蔬农产品多品类、全程冷链技术需求,主要收集、整理了近十五年来发表在中国知网和 Elsevier Science Direct 数据库的相关学术成果,从果蔬冷却效率、冷却后生理品质变化、冷却均匀性等角度,分别对产地预冷、贮藏保鲜、低温气调包装、装卸搬运、冷藏运输和配送、冷藏销售以及冷链物流信息七个环节的冷链技术研究

进展进行梳理,总结果蔬冷链物流技术的研究特点,分析研究中存在的不足,提出未来果蔬冷链物流技术研究的方向,为果蔬农产品冷链物流技术的科技创新和应用推广提供参考。

## 二、果蔬全程冷链物流技术研究进展概况

从果蔬农产品的流通环节来看,生产阶段的主要技术有预冷技术、低温贮藏技术、气调包装技术等,研究人员主要探究了预冷机、冷库的各项工艺参数对果蔬的冷却效果和货架期的影响,并建立动力学模型等数值模型模拟测算了不同类型果蔬的传热、水分迁移、色泽、失重率等变化过程,分析了低温环境下气调包装材料的厚度、气透性和袋内气体比例成分对果蔬品质的影响。流通阶段的技术主要有装卸搬运技术、冷藏运输和配送技术、冷藏销售技术,研究人员对冷链装卸搬运设备的效率、冷藏运输配送及销售设备的制冷性能、制冷温度分布均匀性进行改进,并对设备的内部装置进行优化,以期提高对果蔬的储存效果。果蔬冷链物流信息技术主要以物联网技术作为支撑,实现对各环节果蔬信息的监测。果蔬冷链物流主要技术和设备如图1所示。

### (一)产地预冷

产地预冷对果蔬农产品全程冷链具有重要意义,其不仅可减少生鲜农产品贮、运、销等阶段的制冷成本,还可以有效保持果蔬农产品的鲜度,研究表明,没有预冷的果蔬农产品平均质量损失比有预冷的质量损失高约23%<sup>[1]</sup>。近年来,为降低果蔬农产品采后损失,我国出台多项措施鼓励果蔬农产品产地预冷的发展。预冷方式主要有冷库预冷、冷水预冷、差压预冷和真空预冷四种,由于冷库预冷和冷水预冷的预冷效率相对较低,国内外关于这两种预冷方式的相关研究较少,但对差压预冷、真空预冷的研究均较为成熟。

### 1. 冷库预冷

冷库预冷是将果蔬置于低温贮藏库中,冷风机吹出的冷空气流经果蔬周围,将果蔬热量带走的一种预冷方式。冷库预冷成本低廉,现已成为我国田间地头果蔬预冷的主要方式,由于冷却速度较慢,现有研究主要从提高冷库预冷效率、缩短冷库预冷时间展开。陈存坤等<sup>[2]</sup>(2015)以苹果为试验对象,通过

记录不同风速和不同包装方式下苹果所需的预冷时间,研究使果蔬预冷速率较快的风速和包装方式。王冠邦等<sup>[3]</sup>(2021)通过数值模拟分析了苹果预冷过程的流场、温度场等物理场的分布特性,发现冷气流速高的位置附近的果实降温速率快、温度低。

### 2. 冷水预冷

冷水预冷将果蔬浸入冷水中或者将冷水喷洒在果蔬表面,使果蔬快速冷却到规定的温度,可以减少果蔬表面的水分蒸发,降低果蔬的质量损失率和叶类菜的叶绿素分解速率<sup>[4]</sup>。但循环使用的预冷水中微生物较多,容易导致果蔬出现腐烂、病害现象<sup>[5]</sup>。一些研究通过在预冷水中添加防腐剂、消毒剂等,抑制预冷循环水中微生物对果蔬农产品的副作用<sup>[6]</sup>。但预冷水的有害物质可能会沉积在果蔬表面,影响果蔬农产品的安全性。目前,研究者正着力于如何改善预冷循环水的品质、解决预冷后果蔬农产品表

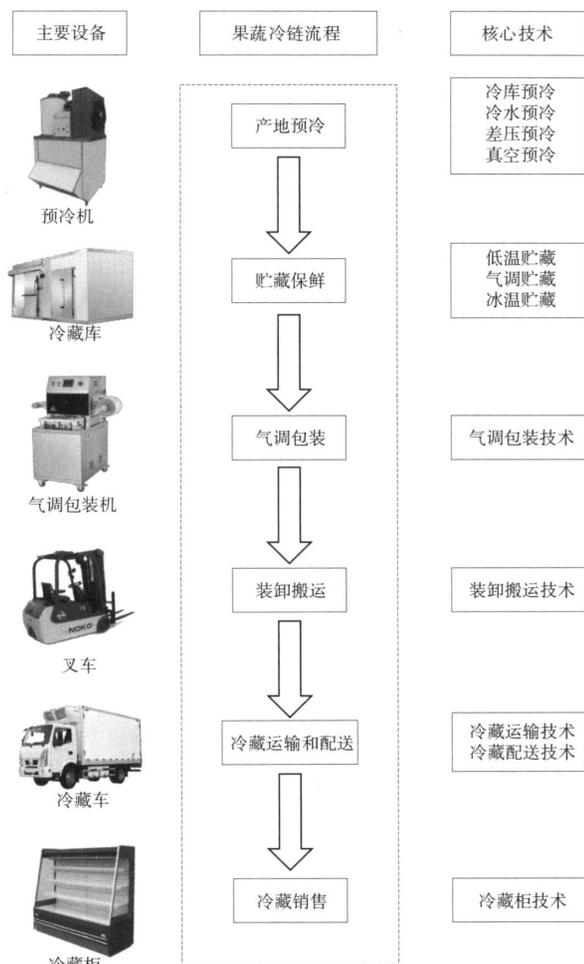


图1 果蔬冷链物流主要技术及设备

面的物质残留问题,相关研究还有待进一步深入。

### 3. 差压预冷

差压预冷通过将冷空气加压在果蔬两侧产生压力差,迫使冷空气全部通过果蔬,使得果蔬温度迅速冷却,可以有效地抑制果蔬的成熟和衰老<sup>[7]</sup>。与普通冷库预冷相比,差压预冷可以显著提升预冷环节效率,并降低果蔬的失重率<sup>[8]</sup>。

适宜的送风条件是保障果蔬农产品预冷品质的关键,目前,研究主要集中在果蔬差压预冷过程中不同工况条件对果蔬预冷品质的影响机理方面<sup>[9]</sup>,并不断调整实验条件进行对比验证,以期为果蔬找到满足多生产目标的工艺条件(如生理品质最佳、预冷时间短、预冷均匀性高等)。杨培志等<sup>[10]</sup>(2017)考虑苹果呼吸热和蒸腾热对预冷温度的影响,探究同时满足预冷时间短、预冷均匀性高两个目标的预冷温度。季丽丽等<sup>[11]</sup>(2018)研究了使西葫芦中丙二醛、维生素C、过氧化氢酶活性、香气成分等多个生理指标达到最佳的预冷温度。为探究适宜的果蔬差压预冷送风速度,韩佳伟等<sup>[12]</sup>(2015)研究了不同风速下预冷果蔬的冷却时间、瞬时冷却速率和瞬时冷却均匀性,发现,当送风速度从0.5m/s提高到2.5m/s时,苹果的冷却时间可缩短70%左右;许茹楠等<sup>[13]</sup>(2018)对比研究了不同风速处理后蒜苔感官品质和生理品质的变化;Elansari等<sup>[14]</sup>(2020)研究了送风方向对橘果实失重百分比和电解质流失的影响,发现自上而下式的垂直通风差压预冷要比水平通风预冷的冷却效果更好。包装箱的通风设计影响着包装内部气流和温度分布,优化包装设计对提高预冷效率和果蔬品质有重要意义<sup>[15]</sup>。Wang等<sup>[16]</sup>(2013)探索了果蔬包装箱的通风孔形状和码垛方式与果蔬降温速率的关系,发现包装箱的通风孔形状为椭圆形时,果蔬差压预冷的降温速率最快,键槽通风孔形状时降温速率最慢,包装箱以交错阵列形式码垛的冷却速度快于平行阵列形式。金滔等<sup>[17]</sup>(2021)提出,包装箱的箱体开孔率不仅影响果蔬降温速率,而且影响箱内果蔬的预冷温度偏差值,当箱体开孔率由15%增大为30%时,冷却速率相近,但箱内苹果的温度偏差增加至1.1℃。因此,在压降满足设计要求的前提下,宜采用较小的箱体开孔面积。

为降低差压预冷后果蔬的失重率,满足单体农户在分散的果园和菜地进行预冷的需求,已有研究对差压预冷设备作出改进。王莹等<sup>[18]</sup>在负压换热室内放置流态冰形成湿冷空气,有效缓解果蔬在差压预冷后失水较多、果蔬品质下降的问题。顾洋等<sup>[19]</sup>(2020)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。

### 4. 真空预冷

真空预冷是在低压或真空状态下,果蔬通过自身水分蒸发吸热达到冷却效果。真空预冷可以提升果蔬内抗氧化物酶的活性<sup>[20]</sup>、抑制亚硝酸盐的积累<sup>[21]</sup>,有效延缓果蔬的衰老,是使果蔬降温速率最快、冷却均匀性最高的预冷方式。

保证预冷后果蔬的营养品质和食用安全是真空预冷的基本要求,探究维持果蔬品质的最佳预冷技术参数是真空预冷的关键。张晓娟<sup>[22]</sup>(2020)、Zhu等<sup>[23]</sup>(2021)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,为果蔬真空预冷的最佳预冷参数提供参考依据。韦升坚等<sup>[24]</sup>(2019)分析了不同降压速率、终压值、复压操作时间处理对卷心菜中大肠杆菌数量的影响,从果蔬质量安全的角度对真空预冷参数作出研究。

经真空预冷处理后果蔬的水分会有一定的损失,如何降低果蔬的失重率非常重要。李新平等<sup>[25]</sup>(2019)研究了预冷终压对不同种类蔬菜失水率的影响,提出使蔬菜失水率最低的最佳预冷终压为:根茎及茄果类600 Pa、含蜡质层类700 Pa、叶菜类800 Pa。真空预冷前补水是有效降低果蔬失水率的有效方法,刘斌等<sup>[26]</sup>(2012)证实了真空预冷前补水可缩短预冷时间、降低食用菌的失水率。喷洒CaCl<sub>2</sub>溶液<sup>[27]</sup>、富氫水<sup>[28]</sup>也被证实可以有效减缓叶菜的失重率。在此基础上,王馨渝等<sup>[29]</sup>(2022)发现,真空预冷过程中对青菜作喷雾补水处理也可以解决青菜的失水问题,维持青菜组织的营养品质。在真空预冷过程中进行补水处理,可防止预冷前已补水处理的果蔬由于未能及时进行真空预冷,造成水分长时间滞留在果蔬表面而引发的品质问题。

真空预冷装置存在能耗高、体积大的问题,刘恩海等<sup>[30]</sup>(2017)将新能源应用于真空预冷装备,研发了以太阳能和生物质能为动力的制冷系统,该设备的供冷能力随预冷热负荷需求的增加而提升,有效提高了果蔬真空预冷的效率。针对真空预冷造成的失水率问题,邓改革等<sup>[31]</sup>(2020)设计了基于盐水蓄冷的小型果蔬真空预冷装置,通过调节盐水泵改变盐水循环速度,实现了捕水器捕水量与水蒸气蒸发量的平衡。

随着果蔬真空预冷实验方法和研究水平的提升,越来越多的学者建立数值模型对真空预冷后各类果蔬的温度、货架期、失重率、感官品质等进行预测,并且取得了良好的预测效果。Wang等<sup>[32]</sup>(2020)建立了根茎类蔬菜真空预冷的传热数学模型,Song等<sup>[33]</sup>(2016)建立了鲜切叶菜真空预冷过程的热质传递数学模型,杨国华等<sup>[34]</sup>(2020)运用动力学分析模型测算果蔬的货架期,上述数学模型的模拟结果与实验结果均吻合。张晓娟等<sup>[35]</sup>(2020)发现预冷终温对毛豆颜色和失重率的影响变化符合零级动力学规律和 Arrhenius 方程。吴冬夏等<sup>[36]</sup>(2018)以草莓为研究对象建立真空预冷数学模型,得出草莓的水分蒸发量与其表面温度及真空预冷压力的数量关系。

## (二)贮藏保鲜

果蔬的冷藏方式可以分为自然冷藏和人工冷藏两种。自然冷藏利用外界自然低温(气体温度或土壤温度)来调节储存环境的温度和湿度,主要用于北方的冬季和早春,适用于白菜、洋葱、萝卜、苹果、梨等果蔬。人工冷藏不受季节或地区的影响,通过自动温度控制技术降低果蔬储存环境的温度,适用于各类果蔬,主要有低温贮藏、气调贮藏和冰温贮藏三种。我国对气调贮藏和冰温贮藏的研究尚处于起步阶段,对低温贮藏的研究已达到国外同期水平。

### 1. 低温贮藏

低温贮藏是以控制温度条件为主要措施的贮藏方法,能有效减缓果蔬外观品质的变化和内部营养成分的流失。Ikegaya等<sup>[37]</sup>(2020)发现,草莓在0℃下贮藏比在3℃贮藏的糖类和有机酸含量更高,薄膜包装可改善草莓冷藏后的失重问题。低温贮藏结合保鲜剂处理是优化果蔬贮藏品质的方法,相关研究指

出,低温贮藏结合淀粉溶液<sup>[38]</sup>、SO<sub>2</sub>保鲜剂<sup>[39]</sup>、钙处理<sup>[40]</sup>等都可以较好地保持果实较高的感官品质。生鲜果蔬的低温贮藏主要是通过冷库实现的,根据冷库设计温度不同,主要有高温冷库(5~15℃)和中温冷库(-5~5℃)两种。相关研究指出,当冷库内的风机设置在长度方向<sup>[41]</sup>、采用侧中送风方式<sup>[42]</sup>时更有利于果蔬温度分布的均匀,有利于提高整批果蔬的贮藏品质。果蔬在低温储存下可能会出现冷害效应,不同储存温度下冷害发生的程度不同<sup>[43]</sup>,学者们尝试使用植物激素来缓解果蔬的冷害问题,并对贮藏期间抑制果蔬冷害的机理进行了研究,如Trina等<sup>[44]</sup>(2020)采用水杨酸处理冷藏后的梨果实,有效抑制果实内多酚氧化酶的活性,显著降低了梨果实的腐烂率和褐变程度。

分析和预测低温贮藏过程中果蔬内部的品质变化也是目前的研究热点之一,朱丹实等<sup>[45]</sup>(2014)研究李子在不同贮藏温度下果实水分、果皮硬度、果肉硬度的品质变化规律,并分析了不同状态下果实水分迁移和品质变化间的相关性。田梦琦等<sup>[46]</sup>(2015)通过模型拟合腐败菌在低温贮藏期间的变化,根据腐败菌的生长速率预测水芹的货架期。一些学者研究了低温贮藏对果蔬生理品质和香气挥发物变化的影响,Mitalo等<sup>[47]</sup>(2019)发现,低温贮藏可以促进水果果实的软化和糖分积累,但低温通过调节参与挥发物合成所需的关键酶和基因抑制了果味挥发物的产生;张琴等<sup>[48]</sup>(2021)将果实的香气物质分为游离态和结合态,研究出两类香气物质随贮藏时间的推移和果实内葡萄糖含量变化而变化的规律。

### 2. 气调贮藏

气调贮藏通过调节密闭贮藏环境中O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>等气体的比例成分,抑制果蔬的呼吸作用和微生物侵害<sup>[49]</sup>,对呼吸跃变型果实有较好的贮藏效果。由于气调库的建设成本相对较高,目前,关于气调贮藏果蔬的实验研究还不够深入,已有研究主要集中在两个方面:一方面,验证了气调贮藏对果蔬货架期的延长作用。陈翔等<sup>[50]</sup>(2019)发现气调贮藏雪梨186天后仍能保持良好的商品性,比普通商业冷库的贮藏期延长3个月左右;Fang等<sup>[51]</sup>(2021)指出,叶菜类蔬菜可以在气调低温环境下贮藏3~5个月,但在普通低温

环境中只能保存8-21天。另一方面,一些研究通过模拟研究气调库的温度场和湿度场分布,为果蔬气调库系统的改进提供了理论基础和解决方案。季阿敏<sup>[52]</sup>(2006)建立了果蔬气调冷却阶段传热过程数学模型,用于预测果蔬在气调冷却过程中的温度变化,为气调库制冷系统的优化设计方案提供了理论基础。杨巧银等<sup>[53]</sup>(2017)采用CFD软件模拟了贮藏期间气调库内的传热过程,研究了库内相对湿度的分布,提出了改善库内湿度环境的方案。

### 3. 冰温贮藏

果蔬的冰温是指0℃以下、冰点以上的温度区域,冰温技术既能保证果蔬细胞不受损,减少食品的浪费,又能保证果蔬长期贮藏而不腐烂,对果蔬的长期贮藏具有重要意义。研究对象主要集中在冬枣、

荔枝、李子<sup>[54]</sup>等球状类水果和青椒、莲藕、西兰花<sup>[55]</sup>等茄果类蔬菜。研究人员就冰温贮藏技术对果蔬品质的影响及规律进行了大量研究,取得了丰富成果。Liu等<sup>[56]</sup>(2019)比较了10℃、5℃和近冰点贮藏下杏果实的挥发性物质、糖类、有机酸等含量的变化,研究发现,近冰温贮藏是杏果实低温贮藏后保持风味和品质的最有效方法。李家磊等<sup>[57]</sup>(2020)测量了冰温贮藏时间不同的西洋参中的淀粉含量,发现淀粉含量随贮藏时间的增加呈现小幅下降趋势。冰温气调贮藏技术和超冰温贮藏技术是冰温贮藏技术的发展和延伸,学者们对比分析了这三种贮藏技术对果蔬生理品质的影响。宋健飞等<sup>[58]</sup>(2016)发现冰温气调贮藏下冬枣的各项品质如脆性、可溶性果胶含量等均比仅冰温贮藏的效果好。张哲等<sup>[59]</sup>(2019)通过试

表1 常见水果的冷链温度要求及预冷、储存方式

水果类型	产品名称	预冷温度/℃	贮、运、销温度/℃	预冷方式	储存方式
大浆果类	木瓜	7~10	7~13	差、库	高
	菠萝	7~13	8~13	差、库	高
小浆果类	草莓、葡萄	-1~0	0~3	差、真	中、气调
	番石榴、杨桃	5~10	5~10	差	高
柑橘类	甜橙	4~8	4~8	差、库	高、中、气调
	柠檬	11~13	10~13	差、库	高
核果类	荔枝	3~5	3~5	差、水	中、气调
	芒果	13~15	13~15	差	高
梨果类	苹果、梨	0~1	0~4	差、库	中、气调
	李、杏、桃	0~3	0~3	差	中、气调
瓜果类	西瓜、甜瓜	10~15	7~10	差、水	高

表2 常见蔬菜的冷链温度要求及预冷、储存方式

蔬菜类型	产品名称	预冷温度/℃	贮、运、销温度/℃	预冷方式	储存方式
根茎菜类	白萝卜	0~1	0~3	差、水	中、气调
	洋葱、胡萝卜	0~1	0~2	差、真、库	中、气调
	土豆	0~1	2~5	库	中、气调
花菜类	菜花	0~2	0~2	差、库	中、气调
	茼蒿、洋白菜	0~1	0~2	差、真	中、气调
果菜类	初熟西红柿	9~10	7~10	差、库	高
	甜玉米	0~2	0~2	差、真、水	中、气调
叶菜类	菠菜、茼蒿、油菜	0~1	0~2	差、真	中、气调
瓜菜类	黄瓜、南瓜	7~10	10~13	差、库	高
菌菇类	蘑菇、金针菇	0~2	0~2	差、真	中、气调
辛香类	葱、蒜苗	0~5	0~5	真	中、气调

注:四种预冷方式表示方法为:差压预冷—差、真空预冷—真、冷库预冷—库、冷水预冷—水。储存方式表示方法为:高湿库——高、中湿库——中、气调保鲜库——气调。

验确定葡萄冰点、超冰温贮藏条件,发现葡萄在 $-3^{\circ}\text{C}$ 的超冰温条件下贮藏后的生理品质比冰温和低温贮藏的效果好。

由于果蔬种类繁多,其体积、外形、组织结构以及采后生理变化和耐冷性等方面存在着较大的差别,表1和表2列出了具有代表性的果蔬的冷链温度要求<sup>[60]</sup>和适宜的预冷、储存方式<sup>[61]</sup>。

### (三)低温气调包装

气调包装技术通过控制或调节包装袋内的气体比例,达到抑制果蔬呼吸速率的目的,从而实现对果蔬的保鲜。国内外的果蔬气调包装技术发展均已较为成熟,现已广泛应用于猕猴桃<sup>[62]</sup>、芒果<sup>[63]</sup>、杨梅<sup>[64]</sup>、花椰菜<sup>[65]</sup>等果蔬,也大量应用在鲜切苹果、鲜切胡萝卜<sup>[66]</sup>等鲜切果蔬的保鲜方面。研究表明,气调包装对果蔬的保鲜效果优于普通保鲜袋和保鲜剂<sup>[67-68]</sup>,可有效抑制果蔬受到微生物的侵害。Sun等<sup>[69]</sup>(2022)研究了气调包装对鲜切黄瓜中微生物的抑制机理,并发现气调包装对黄瓜表皮中大肠杆菌的生长抑制效果优于黄瓜果肉组织,完善了气调包装对鲜切蔬菜的保鲜机理研究,为气调包装技术的广泛应用提供参考。

气调包装膜的厚度是影响果蔬贮藏品质的重要因素,一定程度上还可以预防果蔬冷害的发生。罗政等<sup>[70-71]</sup>(2021)研究了气调包装袋的厚度对果蔬品质的保鲜效果,发现在 $0^{\circ}\text{C}$ 下,用MP30(厚度30微米)比用MP20气调包装袋对冬枣的保存品质更好,但是MP20包装袋对红心猕猴桃的保鲜效果优于MP30包装袋。Jiao等<sup>[62]</sup>(2021)研究了不同气调包装膜厚度对猕猴桃采后冷害的影响,发现 $0^{\circ}\text{C}$ 下厚度为30微米的气调包装袋能有效缓解果实的褐变和冷害。

不同气体比例的气调包装对果蔬的保鲜效果不同,当前,国内外常用的保护气体是 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 三种,其中, $\text{N}_2$ 与果蔬不发生反应,仅用来作为充填气体。多数研究主要以较高浓度 $\text{CO}_2$ 和较低浓度 $\text{O}_2$ 组合的气体比例构成,Wei等<sup>[63]</sup>(2021)对比研究了4种不同 $\text{CO}_2$ 成分的气调包装对芒果的水分分布、生理代谢及果实品质的影响,发现 $7\%\text{CO}_2+30\%\text{O}_2+90\%\text{N}_2$ 贮藏的芒果品质最好。但是,也有研究指出<sup>[71]</sup>,由于呼吸跃变型果蔬在贮藏后期的呼吸作用增强,较高浓度 $\text{CO}_2$ 和较低浓度 $\text{O}_2$ 的组合不利于这类果蔬进行后熟期间的

呼吸代谢。濮艳青等<sup>[66]</sup>(2020)以混合的鲜切苹果、胡萝卜、橙子为研究对象,发现果蔬保鲜效果最佳的气调包装比例为 $5\%\text{O}_2+5\%\text{CO}_2+90\%\text{N}_2$ ,此气体比例可以有效抑制鲜切果蔬间呼吸作用的相互影响。

设计气调包装材料时还需考虑果蔬农产品储存温度的影响,石润润等<sup>[72]</sup>(2015)的研究表明,温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ,果蔬的呼吸速率就会增加2~3倍。当包装材料的气透性与果蔬的呼吸速率相匹配时,果蔬的保鲜品质可以达到最佳效果。王颖荣等<sup>[73]</sup>(2015)分别研究了 $0$ 、 $4$ 、 $8$ 、 $12^{\circ}\text{C}$ 等低温条件对自发气调包装鸡毛菜保鲜效果的影响,发现 $0^{\circ}\text{C}$ 下聚乙烯(PE)气调包装袋内的鸡毛菜品质最好。为了降低外界温度波动对包装袋气体透过性的影响,一些学者在果蔬气调包装膜中加入相变材料,通过改变温度依赖性气体的渗透率来控制包装内的气体浓度,为研究动态低温下的气调包装保鲜开辟了新方向。例如,Down等<sup>[74]</sup>(2021)在聚丙烯(PP)薄膜中加入相变材料后用作小番茄的包装袋,发现与PP包装相比,复合薄膜包装袋内小番茄的生理品质更好。

气调包装与其他技术结合可以更有效地延长果蔬的货架期。目前,学者们多是以单一采用气调包装或未处理的果蔬作为对照组,对与气调包装结合的其他技术的最优工艺参数进行研究,通过实验确定其他技术的最优工艺参数或最优使用量,从而使果蔬拥有更长的货架期,部分研究见表3。

### (四)低温装卸搬运

装卸搬运是果蔬冷链物流过程中不可或缺的一个环节,在装卸搬运过程中,若果蔬脱离冷藏环境长时间暴露在常温环境中,冷却的果蔬与热空气进行热交换后果蔬表面将出现明显的结露现象,极易受到微生物的危害。为了尽可能地保障果蔬的生理品质,张桂新等<sup>[80]</sup>(2012)提出,果蔬冷链物流应在 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 的温度缓冲区进行装卸、搬运,装卸搬运时间应控制在30 min内。

国内外关于装卸搬运环节的冷链技术研究和应用较少,相关研究多是从控制装卸搬运作业环境温度、提高装卸搬运效率两方面探索,减少装卸搬运期间果蔬的温度波动。张建一等<sup>[81]</sup>(2005)的研究表明,封闭式低温月台不仅可以保证果蔬在装卸搬运期间

表3 气调包装与其他技术复合保鲜果蔬的研究

研究者	实验对象	实验温度	处理方式	处理效果
田全明等 <sup>[75]</sup> (2021)	白杏	4℃	真空预冷+气调包装(100%N <sub>2</sub> )	果实的硬度提高了28.68%,过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶、过氧化物酶、多酚氧化酶的活性分别提高了54.58%、45.34%、56.82%、24.87%。
孙思胜等 <sup>[76]</sup> (2020)	葡萄	4±0.5℃	1.0μL/L浓度的1-甲基环丙烯+自发气调包装	果实中可滴定酸含量、VC含量和多酚含量较高,果实的衰老进程更缓慢。
SERGIO L等 <sup>[77]</sup> (2018)	芦笋	4℃	微波+气调包装(30%CO <sub>2</sub> +70%N <sub>2</sub> )	较好地保存了芦笋的生理化学成分、总抗氧化能力,储藏30天后仍可保持较高的品质。
ZHANG X J等 <sup>[78]</sup> (2022)	白菜	4℃	红白LED辐照+气调包装(5KPaO <sub>2</sub> +5KPaCO <sub>2</sub> )	显著降低了小白菜的质量损失、叶绿素损失等,有效缓解了小白菜褐变的发生,使小白菜货架期延长至30天。
FASAKE V等 <sup>[79]</sup> (2021)	花椰菜	4℃	臭氧水、抗菌剂预处理+气调包装	花椰菜的感官品质和生理生化指标保持较好,货架期从一周延长至贮藏28天。

始终处于低温状态,在流通过程中形成一个连续的冷藏链,而且可以减少外界进入冷库的热负荷和水分,提高冷库的制冷效率。马丽等<sup>[82]</sup>(2021)在冷链物流仓库内部划分了卸货搬运区和停车区,合理规划果蔬搬运流程,保证了果蔬在装卸搬运环节的生理品质和卫生安全。周执海等<sup>[83]</sup>(2011)设计了一种用于小尺寸货物的移动式装卸车,实验发现,使用移动式装卸车后的装载时间比未使用移动式装卸车的装载时间缩短了近40%,该设备可用于小批量果蔬的装卸使用,既能够降低果蔬的损坏率,还可以节省果蔬装卸时间。冷链专用叉车可用于果蔬冷库环境的搬运作业,中联重科新研发出的叉车采用防锈、耐低温配置<sup>[84]</sup>,可以在湿度为80%~90%的低温环境中长期使用,车架上增加了耐腐蚀的蓄电池废液收集结构,可避免酸液污染果蔬农产品的品质。

#### (五)冷藏运输和配送

低温运输是保障果蔬农产品品质、降低果蔬腐烂率和营养成分损失的重要环节,冷藏运输和配送对保持各类果蔬以高新鲜度品质在市场流通有着极其重要的意义。我国冷藏运输和配送技术研究达到国外同期水平,但在技术的应用推广方面远落后于发达国家。

#### 1. 冷藏运输技术

果蔬农产品的冷链运输以公路运输为主,为了有效控制运输过程中果蔬的品质,扩大果蔬的冷链运输范围,国内外学者从冷藏运输车的制冷可持续性、保冷性能、厢体内气流分布、车内装置优化等方面进行研究。

冷藏运输设备的制冷方式主要有机械制冷、蓄冷板制冷和液态气体制冷三种方式。在制冷可持续性方面,虽然机械制冷式的制冷技术较为成熟,但机械制冷式冷藏车的故障率和能耗相对较高,在晚上或中途长时间停车时的制冷效果较差。针对此问题,何仁等<sup>[85]</sup>(2018)在机械制冷冷藏运输车上设计了太阳能辅助供电制冷系统,将太阳能电池发电量存储于蓄电池中,增强了冷藏运输车的制冷可持续性和制冷效果。蓄冷板式冷藏车是一种新兴的冷藏车,为提高蓄冷式冷藏运输设备的保冷性能,李靖等<sup>[86]</sup>(2018)将相变蓄冷技术应用于冷藏车,发现蓄冷冷藏车的稳定性优于机械制冷式冷藏车;孔琪等<sup>[87]</sup>(2020)对蓄冷板中的蓄冷材料进行优化研究,研发出的新型复合相变蓄冷材料可有效降低果蔬的质量损失率。为了提升冷藏车的制冷和保冷性能,液氮<sup>[88]</sup>、液化天然气<sup>[89]</sup>、液化二氧化碳<sup>[90]</sup>等新冷源被投入到冷藏运输设备制冷系统中。

保证冷藏车厢内温度的恒定范围,是冷藏运输技术需解决的关键问题。为此,许多学者探索了冷藏车车厢内的气流组织分布情况。De Micheaux等<sup>[91]</sup>(2015)针对冷藏运输车车门开启过程中空气渗透的动态过程进行研究,拓展了冷藏运输车的渗透热负荷理论。So等<sup>[92]</sup>(2021)分析了不同装载方式下冷藏车车体内部的最大温度点,试验结果与模型预测结果吻合较好,为不同类型果蔬在车厢的堆码位置提供参考依据。申江等<sup>[93-94]</sup>(2011)探讨了果菜类和叶菜类蔬菜在不同运输振幅时的最佳运输温湿度;还有一些学者研究了果蔬堆码方式<sup>[95]</sup>、车外环境温度<sup>[96]</sup>和冷

源的温度、流场、位置<sup>[97]</sup>等对冷藏车内温度场分布的影响,为提高厢内果蔬的温度均匀性提供理论基础。

为提高冷链运输果蔬的品质,通常会对冷藏车内的设备进行优化。张翔等<sup>[98]</sup>(2018)认为车内加装侧通风槽对果蔬的冷却速度和均匀性都优于加载地导轨的效果,同时加装通风槽、地导轨后车厢内果蔬的温度均匀性最好。苏霞等<sup>[99]</sup>(2020)研究了加湿器对果蔬冷链运输的作用,指出当果蔬供应链的总固有损失超过24%时,使用超声波加湿器可以减少20%以上的损失。郭嘉明等<sup>[100]</sup>(2013)分析了不同工艺对超声波加湿装置湿度调节特性的影响,为冷藏运输车厢用加湿装置的优化设计提供了参考。

## 2. 冷藏配送

果蔬冷藏配送主要有单温配送和多温配送两种形式。传统的单温配送以“普通保温箱+冰块”方式进行,虽然配载形式灵活、方便使用,但配送距离有限、且配送效果较差。20世纪80年代初期,研究人员将普通保温箱与蓄冷板相结合,发明了蓄冷保温箱<sup>[101]</sup>。蓄冷保温箱依靠配置不同的蓄冷板实现长时间保冷,其优良的保温性成为小批量高品质生鲜果蔬的优质配送设备<sup>[102]</sup>。优化蓄冷保温箱的材料结构是提高其保温性能的方向之一。市面上广泛使用聚苯乙烯(EPS)和聚氨酯(PU)保温箱进行短途果蔬运输<sup>[103]</sup>,真空绝热板(VIP)是近几年新兴的一种箱体隔热材料,王达等<sup>[104]</sup>(2018)研究了VIP+PU复合结构蓄冷保温箱的保温时间,发现VIP+PU、PU和EPS蓄冷箱对桃子的保温时间比为5.7:2.5:1;在此基础上,吴如书等<sup>[105]</sup>(2021)指出,VIP+PU冷藏箱对番茄的保温性能、冷却速度及冷却均匀性都比PU冷藏箱好。部分研究通过使用相变蓄冷材料提高蓄冷保温箱对果蔬的冷藏性能。蔡宋宋等<sup>[106]</sup>(2015)提出,添加相变蓄冷剂冰块、使用锡箔辐射层处理EPS保温箱两种方式都可以提高果蔬的保鲜效果;邱倩倩等<sup>[107]</sup>(2017)采用相变蓄冷材料制成了蓄冷箱,研究了蓄冷箱蓄冷效果的影响因素,发现相变蓄冷材料质量对果蔬蓄冷效果的影响仅次于预冷温度的影响。

多温共配是将不同温控需求的果蔬安排在同一运输设备上,实现了果蔬农产品集约化与规模化配送。徐笑锋等<sup>[108]</sup>(2019)使用相变材料和真空绝热板

设计了大型果蔬用多温区蓄冷箱,实验结果表明,温区2可保冷7~9℃约13 h,可用于冷藏苦瓜、冬瓜、山药等蔬菜的短途配送,温区3保冷-2~0℃约14 h,可用于冷藏菠菜、芹菜、苹果等果蔬产品的配送。翟纪强等<sup>[109]</sup>(2019)研究了蓄冷剂对多温蓄冷箱内温度的影响,发现将蓄冷剂放置在侧面和顶部时,多温蓄冷箱的保温隔热效果最好。多温冷藏车主要分为机械制冷式和蓄冷式多温冷藏车等。李锦<sup>[110]</sup>(2013)对含有冷藏、冷冻两个温区的机械制冷式多温冷藏车进行研究,分析了车外温度、车辆行驶速度、车厢密封性等因素对多温冷藏车降温性能的影响;赵曜等<sup>[111]</sup>(2017)研究了机械制冷式多温冷藏车厢内气流供出的组织方式对温度分布的影响,为多温区冷藏车的温度均匀性优化提供了理论依据。相关研究指出,蓄冷式比机械式多温共配车更具有经济性和实践应用性<sup>[112]</sup>。刘广海等<sup>[113]</sup>(2019)设计了含有冷冻、冷藏两个区域的多温蓄冷车,两个温区单元的温度均可以得到较好的控制,且其中冷藏单元可有效控温10 h以上,可以满足实际配送需求。

## (六) 冷藏销售

冷藏销售是果蔬冷链物流中的薄弱环节,低温销售可以增加果蔬的货架期,有效维持果蔬的品质。冷藏展示柜是进行低温销售的主要设备,它不仅可以更好地保持果蔬的品质,还可以通过陈列的方式吸引顾客、方便顾客进行挑选。国内外果蔬冷藏销售技术研究均处于高速发展阶段,但我国大部分果蔬仍以常温售卖为主,商超内只有鲜切果蔬和少量高价值果蔬会使用冷藏展示柜。

由于冷藏展示柜冷藏果蔬时存在温度分布不均、能耗高等问题,导致商场或超市在果蔬销售环节投入冷藏保鲜所产生的经济效益不够理想,阻碍了冷藏展示柜在果蔬销售环节的广泛应用。为了提高果蔬等食品的销售品质和商超的经济效益,一些学者在冷藏展示柜内食品的温度分布特性和提高食品储存性能方面开展了大量的研究工作。

果蔬的冷藏温度与其在冷藏柜内的摆放位置有关,目前主要通过袋装食品来研究冷柜内食品摆放位置与温度的关系。Nunes等<sup>[114]</sup>(2008)测量了3家零售店冷藏柜的温度,发现冷藏柜顶部的温度通常较

高, Chaomuang<sup>[115]</sup>(2019)发现靠近风幕一侧食品的温度高于靠近后方区域食品的温度。冷藏柜外环境的温度、湿度、灯光照射强度等对冷藏柜内气流的温度、速度分布有很大的影响<sup>[116]</sup>, Chang等<sup>[117]</sup>(2019)指出,如果环境温度升高2℃,冷藏陈列柜内食品温度将会升高约0.6℃;若环境相对湿度升高20%,柜内食品温度将升高约0.9℃。Yuan等<sup>[118]</sup>(2021)研究了敞开式多层冷柜中不同位置的传热和流动特性,发现面朝后摆放方式的食品温度比面朝下摆放方式低0.3~0.5℃。在冷藏柜内摆放果蔬产品时,可考虑冷藏柜各区域温湿度的波动特性,根据适合储存果蔬的温湿度条件,将果蔬分类摆放,以提升果蔬的保鲜效果。

由于冷藏柜内部分位置的实际温度比控制温度高,虽然冷藏柜按照建议温度进行设置,但柜内总有一部分果蔬易发生变质。已有研究从冷藏陈列柜柜体结构方面入手,对如何提高冷藏柜内的温度均匀性进行了研究。Gray等<sup>[119]</sup>(2007)发现当风幕和背风板出风量保持在30%~70%的比例时,将有利于保证冷藏柜内风幕的稳定性以及柜体内部速度场和温度场的均匀性。游孟醒等<sup>[120]</sup>(2019)提出,当冷藏柜的蒸发器温度越高、空气质量流量越快、风道厚度越宽、搁架长度越小时,冰箱内部的温度均匀性越好。

为了提高冷藏展示柜的储存性能,保证果蔬在流通末端的冷链保持完整,可以通过调节冷藏柜的温湿度、增加风幕等装置来实现。江峰等<sup>[121]</sup>(2016)在冰箱中设计加入调湿模块,通过提升冰箱冷藏室内的湿度,有效降低了鸡毛菜的失重率。Chen等<sup>[122]</sup>(2005)指出,风幕通过抑制冷柜内外空气的对流,可以减少冷柜25%~40%的热负荷,更好地维持柜内产品的温度。傅涛等<sup>[123]</sup>(2014)研究了带有单层风幕敞开式果蔬冷柜内部的温湿度场分布特性,对比实验表明,有节能帘冷柜的柜内平均相对湿度较无节能帘升高了5.74%,平均温度降低了0.43℃。Sun等<sup>[124]</sup>(2017)在单层风幕的敞开式冷藏柜货架前端面设计了导风条,发现与没有导风条的风幕相比,带有导风条的冷柜内的产品平均温度下降了4.9℃。汪厚银等<sup>[125]</sup>(2018)研究了冰箱储藏天数和储藏层数对冷藏菠菜的品质影响,建立了一套冰箱冷藏保鲜效果

的评价方法。

### (七)全程冷链信息技术

果蔬冷链监测和追溯系统已成为果蔬安全监管的最有效手段之一,在果蔬农产品冷链物流所涉及的生产、储存、包装、运输、销售等基础环节上,监测和追溯果蔬农产品的全程冷链信息,不仅可以优化果蔬全程冷链物流体系,还可以最大限度地保持果蔬的感官品质和生理品质,为消费者提供绿色安全的果蔬农产品。但我国果蔬全程冷链信息技术水平相对滞后,果蔬冷链物流信息化平台建设较为缓慢。

学者们以物联网技术作为平台,利用射频识别技术(RFID)、无线传感器网络(WSN)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等,构建出不同环节的冷链信息系统,通过不断改进计算机技术和网络架构,实现对冷链物流过程的精确监控和管理。陈志新等<sup>[126]</sup>(2019)设计了一种冷链物流实时监测系统,该系统使用双模定位替代传统的单GPS定位,提高了冷藏运输设备在复杂环境下的定位精度,为将来研究冷链无人配送的定位问题奠定基础。陈世超等<sup>[127]</sup>(2019)构建了一套包括仓储、运输及销售的冷链云服务系统,该系统解决了各业务环节无法共享、监测数据“断链”等问题,但若用于果蔬冷链物流系统,还需对系统优化补充其他果蔬的其他冷链环节,以实现对果蔬冷链物流的全程监控。La Scalia等<sup>[128]</sup>(2017)设计了一种新型的冷链运输信息监测系统,该系统不仅可以实时监控草莓的温度,还可以利用挥发性有机成分传感器监测草莓的品质变化,并根据挥发性成分的浓度变化来预测果蔬剩余货架期。

果蔬全程冷链物流信息传递过程如下:在产地预冷环节中,工作人员将包含该批果蔬的生长地、采摘时间、预冷处理工艺等信息的电子标签贴在果蔬采摘容器的外表面,作为果蔬开始流通的原始数据。当带有电子标签的果蔬进入储存、包装环节时,工作人员通过RFID读写器将果蔬的储存和包装方式、操作员信息记录到电子标签的相应字段中,同时,利用RFID阅读器识读电子标签内的信息数据,读取的果蔬信息连同无线温湿度传感器监测到的信息被送到本地服务器的冷链仓库、包装管理系统中,并通过GPRS无线通信技术传送到果蔬冷链信息专

用平台。装卸搬运和运输环节是果蔬冷链物流各环节相互联系的纽带,贯穿于整个冷链物流活动之中。当载有生鲜果蔬的冷藏运输车辆入场院时,场院基于有线监控设备和车牌识别技术,实时监控冷链运输车辆的出入时间<sup>[129]</sup>,并利用RFID技术识别冷链运输车辆的装载果蔬品类和装载率,各管理系统根据装载果蔬产品的温度需求,合理安排冷藏车的装卸地点和装卸时间。驶出场院的果蔬冷藏车均安装了无线温湿度传感器和GPS定位跟踪系统,基于GPRS无线通信技术,将监控的果蔬温度、环境参数、位置数据传输到冷链运输管理系统<sup>[130]</sup>,保证其他服务器可以随时读取该批果蔬的相关信息,当传感器监测到果蔬产品的温度超出限定范围时,系统会发出警报提醒司机采取措施。在果蔬农产品的销售阶段,销售单位可以通过扫描电子标签查询该批次果蔬的所有信息,通过无线温湿度传感器实时监控冷藏展示柜内果蔬的温湿度状态,当零售店的消费者想购买果蔬农产品时,可以通过登录果蔬产业链信息查询服务平台,查询果蔬信息。信息采集设备

和技术在果蔬冷链物流中的应用见表4,果蔬全程冷链物流信息的传递过程如图2所示。

### 三、果蔬全程冷链物流技术研究评价

综上所述,果蔬冷链物流技术研究取得了较为丰富的成果,整体上呈现出以下特点。

1. 果蔬冷链物流各环节技术研究越来越精细化。在冷链物流的各个环节中,对果蔬温度影响因素的研究从传统的冷链技术工艺参数逐渐深入到果蔬自身品质特性、冷链设备的设计结构和布置方式、冷链设备的外部环境等多个方面,通过改进各种因素对果蔬温度的影响,达到精准控制果蔬冷链温度的目的。

2. 数值模拟及仿真成为冷链物流技术研究的常用方法。由于数值模拟及仿真方法在可操作性、可重复性上都有较大的优势,因此,多数学者在研究和预测果蔬在不同冷链物流过程中的温度分布、生理品质成分变化规律时都会采用该方法,从冷却速率、冷却均匀性、冷却品质变化等多尺度模拟评估不同的冷链处理方式,为冷链物流技术的蓬勃发展提供

表4 信息采集设备和技术在果蔬冷链物流中的应用

信息采集设备和技术	处理的果蔬冷链物流信息
RFID读写器	读取电子标签内已有的果蔬信息,并写入新的果蔬处理信息
无线传感器网络(WSN)	采集各流通环节中果蔬的温湿度、气体含量等信息
有线监控设备	记录冷藏车辆果蔬出入库时间、车辆装载率,识别冷藏车辆的车牌信息
全球定位跟踪系统(GPS)	实时监控冷藏车辆的地理位置、环境参数等数据
无线通信技术(GPRS)	实现各流通环节冷链物流信息的共享

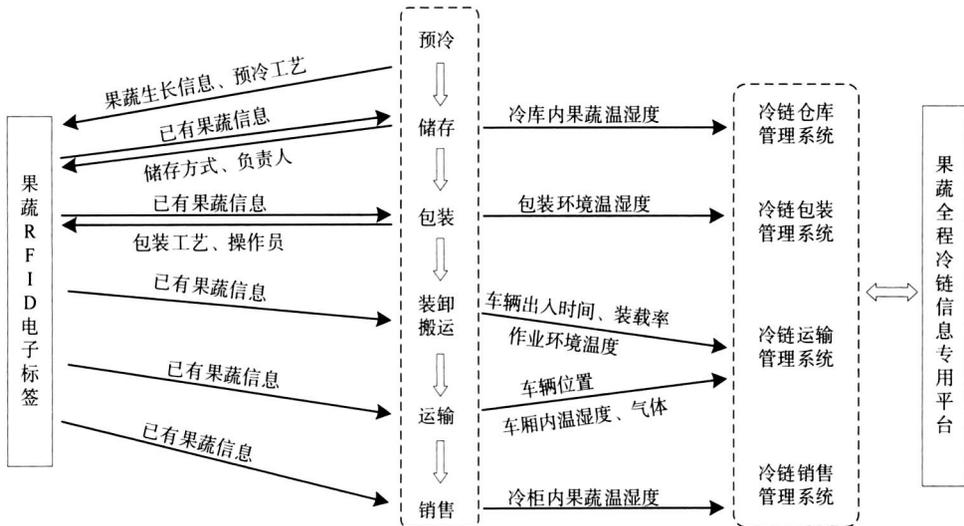


图2 果蔬全程冷链物流信息的传递过程

理论支撑。

3. 果蔬冷链物流技术研究呈现多学科融合发展趋势。各环节的冷链技术基本能够保证果蔬所需的冷却温度,但仍面临处理效率低、处理后果蔬品质差等问题,已有研究通过结合其他学科的理论来解决果蔬冷链过程中出现的各类问题。例如,结合生物化学的相关研究降低果蔬在预冷、贮藏、包装处理后的失重率、冷害率、病害率,延长果蔬的货架期;结合材料学等的研究提高冷藏运输配送设备的制冷和保冷性能;结合物理学科理论研发耐冷装卸搬运设备、降低冷藏展示柜内的温度波动等。

从果蔬冷链物流各环节的技术研究和实践应用来看,我国还存在以下不足。

1. 冷链物流技术对果蔬生理品质特性影响的研究有待提升。目前,我国对气调贮藏、冰温贮藏技术的研究主要集中在对果蔬货架期、感官品质的影响作用上,对果蔬生理品质成分影响的研究不够深入;关于气调包装设计的研究多是通过实验法进行,但实验的果蔬对象较为分散,缺乏系统性,尚未探明不同情形下不同气调包装设计对果蔬生理品质的影响机制。而国外学者已经基本上完成了气调贮藏、冰温贮藏影响果实各项感官品质和生理品质成分的量化研究,并探索了不同贮藏技术对果蔬内部微观分子的影响机理。

2. 冷链物流技术对果蔬温湿度特性影响的因素研究不全面。首先,已有关于冷藏运输和配送、冷藏销售技术对果蔬温度分布规律的研究主要考虑静态因素影响,如冷藏车内冷源的位置、冷藏柜外温湿度等,缺少对动态因素如车辆颠簸产生热量、车门开启时热空气的渗透对冷藏车和冷藏柜内温度特性的影响研究。其次,对果蔬在冷藏销售设备内的温度变化研究有所欠缺,目前多是用袋装食品模拟研究冷藏销售设备内部的温湿度分布场,但袋装食品本身的热量是恒定不变的,并未考虑到果蔬在冷藏柜内呼吸代谢产生的热量影响。

3. 果蔬全程冷链信息监测和追溯技术落后。一方面,我国果蔬冷链物流监测的信息数据不全面,监测的信息数据大多只有温湿度,且离传感器较远的果蔬温湿度信息与监测到的数据存在偏差,无法及

时判断这部分果蔬是否因温度过高出现变质问题;另一方面,果蔬全程冷链信息技术监测系统和追溯系统建设落后,尚未在全国范围内建立起果蔬农产品全程冷链信息监测平台、追溯系统。而国外已对果蔬在各冷链环节中的挥发性气体物质进行监测研究,通过挥发性气体成分含量可判断果蔬是否出现变质情况;美国、英国等已实现果蔬农产品从产地到终端销售全程冷链环节的信息追溯。

4. 果蔬冷链物流技术的实践应用落后于理论研究。虽然针对差压预冷、真空预冷、低温贮藏等的研究水平已达到国际先进水平,且气调贮藏和冰温贮藏的研究也在不断进步,但国内将研究成果投入到实际生产中应用的较少,例如,我国田间地头果蔬预冷主要方式依然是冷却效率较低的冷库预冷方式。虽然果蔬农产品实现全程冷链在技术上已不是难题,但我国果蔬农产品流通依旧以常温状态为主。日本、美国等发达国家果蔬冷链流通率达到95%以上、损耗率控制在5%以下,但我国果蔬冷链流通率仅为35%、损耗率高达25%~30%。

#### 四、果蔬全程冷链物流技术研究展望

随着果蔬农产品低温流通过程中的技术研究越来越深入,衡量果蔬冷链技术效果的指标从简单的外观形状逐渐转变到果蔬的各项生理指标和营养参数,各阶段最佳冷却工艺参数的研究对象从单个果蔬逐渐转变为多品类多数量的混合果蔬,冷链设备的优化重点由设备的经济性转变为果蔬冷藏温湿度的均匀性、精确性等方面,冷链保鲜技术正在由单一的低温控制向多种技术结合的绿色、安全、高效的复合方向研究发展。但是冷链技术研究发展依然有很大的空间,在以下几个方面还需开展更多的工作。

1. 加强冷链物流技术对果蔬特性影响的研究。加强冷链物流技术对果蔬生理品质影响机制的研究,如加强气调贮藏、冰温贮藏和气调包装技术对果蔬冷却的传热传质机理研究,探明不同冷链技术下果蔬内部微观结构生理指标的变化规律,根据我国果蔬品类建立完善的果蔬冷链技术标准数据库。探索不同冷链环境对果蔬温湿度的影响,降低温度波动对冷藏果蔬品质的影响,如对冷藏车辆运输颠簸过程、冷藏展示柜节能帘或柜门开合过程中

冷链技术设备内果蔬的温度均匀性与温度波动状况进行研究,避免温度敏感性果蔬放置在温度波动较大的区域,为果蔬在冷链设备内的放置位置提供理论依据。

2. 注重数值模拟和现场实验相结合。一方面,应根据现场实验数据不断调整和改进数值模拟模型。如研究果蔬在冷藏展示柜内温湿度分布场时,建立的数值模型忽略了果蔬本身的呼吸热与蒸腾热对冷藏展示柜内温度特性的影响,需要根据实验结果对已建立的数值仿真模型进行优化,使研究更贴近实际复杂环境。另一方面,在实验的基础上应充分运用数值模拟方法,以便更好地探索和发展冷链技术。如在设计不同温度下果蔬的气调包装方式时,除了进行对比试验研究果蔬的最佳气调包装方式外,还可以运用数值模拟法,通过设计果蔬在气调包装内的呼吸速率模型,研究不同温度下使包装薄膜气体交换速率与果蔬呼吸速率平衡的包装方法,促进果蔬气调包装技术的发展与应用。

3. 加快先进冷链物流技术的推广和应用。鼓励和推广应用先进冷链物流技术,提升果蔬农产品冷链流通率。结合果蔬预冷、贮藏技术的研究成果,根据不同类别果蔬农产品的生理品质变化规律,合理规划和建设田间地头预冷库、贮藏库,提高我国果蔬农产品的预冷比例。加强挥发性气体传感器的研发和应用,增加果蔬冷链监测信息种类,构建果蔬全程冷链物流实时信息监测和追溯系统,实现果蔬冷链物流信息资源的有效传输与共享。

#### 参考文献:

[1]WU W T, 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.

[2]陈存坤,王文生,董成虎,等.冷库内不同风速及不同包装对富士苹果降温速率的影响[J].山西农业科学,2015,43(10):1321-1325.

[3]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.

[4]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.

[5]李健,王友升,曹建康,等.冷水预冷对芒果贮藏品质的影响[J].食品科学,2012,33(16):314-317.

[6]TOKARSKYY O, SCHNEIDER K R, BERRY A, et al. Sanitizer applicability in a laboratory model strawberry hydrocooling system[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 101: 103-106.

[7]白友强,许建,姚军,等.预冷方式对哈密瓜货架期品质及抗氧化酶活性的影响[J].食品科技,2016,41(4):56-60.

[8]白宇皓,李超,张晓宇,等.差压预冷对夏秋蔬菜预冷效果评价[J].山西农业科学,2020,48(12):1994-1997.

[9]解海卫,张晶,张艳,等.苹果差压预冷均匀性的实验研究[J].食品研究与开发,2019,40(5):42-47.

[10]杨培志,胡霞,廖刚.送风温度对苹果差压预冷降温效果的影响[J].热科学与技术,2017,16(5):381-386.

[11]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.

[12]韩佳伟,赵春江,杨信廷,等.送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J].农业机械学报,2015,46(11):280-289.

[13]许茹楠,于晋哲,刘斌,等.不同差压预冷风速对贮藏期蒜薹品质的影响[J].制冷学报,2018,39(4):38-41.

[14]ELANSARI A M, MOSTAFA Y S. Vertical forced air pre-cooling of orange fruits on bin: Effect of fruit size, air direction, and air velocity[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(1): 92-98.

[15]CAO Y H, GONG Y F, ZHANG X R. Impact of ventilation design on the precooling effectiveness of horticultural produce—A review[J]. Food Quality and Safety, 2020, 4(1): 29-40.

[16]WANG Q, WANG F, WANG Q, et al. Analysis of Influencing Factors of Pressure Pre-Cooling Rate for Fruits and Vegetables[J]. Advanced Materials Research, 2013, 732-733: 581-584.

[17]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.

[18]张冲,魏娟,杨鲁伟,等.一种果蔬差压预冷系统:中国,201821837503.4[P].2019-09-06.

[19]顾洋,黄国锋.移动式差压预冷机:中国,202020451191.4[P].2020-11-27.

[20]LI J, MA G W, MA L, et al. Multivariate analysis of fruit

antioxidant activities of blackberry treated with 1-methylcyclopropane or vacuum precooling[J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2018, 2018: 1-5.

[21]安容慧,周宏胜,罗淑芬,等.真空预冷及不同流通方式对上海青货架品质的影响[J].食品科学,2021,42(13):241-248.

[22]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.

[23]ZHU Z W, GENG Y, SUN D W. Effects of pressure reduction modes on vacuum cooling efficiency and quality related attributes of different parts of pakchoi (*Brassica Chinensis* L.)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 173: 1-9.

[24]韦升坚,谢思芸,宋燕青,等.真空预冷处理对大肠杆菌 O157:H7 在卷心菜中渗透的影响[J].现代食品科技,2019,35(8):84-90.

[25]李新平,臧润清,董杰.预冷终压对蔬菜真空预冷失水率的影响[J].低温与超导,2019,47(5):75-80.

[26]刘斌,朱龙华,叶庆银,等.不同装载率及补水量对杏鲍菇真空预冷的影响[J].农业工程学报,2012,28(3):274-277.

[27]闫静文,王雪芹,刘宝林,等.真空预冷及贮藏方式对生菜品质的影响[J].食品工业科技,2011,32(1):261-263.

[28]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: 1-10.

[29]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.

[30]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.

[31]邓改革,康宁波,王松磊,等.小型蓄冷式带柄鲜枸杞真空预冷装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(4):367-372.

[32]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 and Mass Transfer: Wärme- und Stoffübertragung, 2020, 56(2): 627-637.

[33]SONG X Y, LIU B L, JAGANATHAN G K. Mathemati-

cal simulation on the surface temperature variation of fresh-cut leafy vegetable during vacuum cooling[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 65: 228-237.

[34]杨国华,刘贵珊,何建国,等.预冷后宁夏菜心贮藏期内品质分析及货架期的预测[J].食品工业科技,2020,41(18):263-271.

[35]张晓娟,刘贵珊,邓改革,等.真空预冷毛豆冷藏期间色泽和失重率变化动力学模型构建[J].食品安全质量检测学报,2020,11(12):3861-3867.

[36]吴冬夏,申江,张川,等.草莓真空预冷理论分析及实验研究[J].食品工业科技,2018,39(6):270-274.

[37]IKEGAYA A, OHBA S, NAKAJIMA T, et al. Practical long-term storage of strawberries in refrigerated containers at ice temperature[J]. Food Science & Nutrition, 2020,8(9): 5138-5148.

[38]DADZIE R G, AMOAH R S, ASIAMA J A, et al. Physicochemical properties of eggplant (*Solanum aethiopicum* L.) fruits as affected by cassava starch coating during low temperature storage: Optimisation of coating conditions[J]. International Journal of Postharvest Technology and Innovation, 2020, 6(4): 276-300.

[39]王宁,邓冰,李珍,等.低温贮藏结合 SO<sub>2</sub> 保鲜剂对无核白葡萄保鲜效果研究[J].食品工业科技,2016,37(6):330-334.

[40]GILL P P S, JAWANDHA S K, SANGWAN A K, et al. Post harvest calcium treatments extend the storage life of pear fruits under low temperature storage[J]. Vegetos-An International Journal of Plant Research, 2017, 30(special): 180-184.

[41]周轲,王瑞华,孙海亭,等.CFD 模拟两种风机位置的苹果冷藏库的温度场[J].中国农机化学报,2016,37(7):75-79.

[42]刘泽勤,徐静,高行恭,等.送风高度对果蔬冷藏库内热环境的数值模拟研究[J].低温与超导,2019,47(12):72-77.

[43]安瑞丽,王斌,魏长庆,等.不同贮藏温度对采后伽师瓜果实冷害及品质的影响[J].食品科学,2018,39(9):196-201.

[44]TRINA A, GILL P P S, JAWANDHA S K, et al. Browning and quality management of pear fruit by salicylic acid treatment during low temperature storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 101(3): 853-862.

[45]朱丹实,梁洁玉,吕佳煜,等.秋红李子贮藏过程中水分迁移对其质构的影响[J].现代食品科技,2014,30(12):100-105.

[46]田梦琦,杨润强,庄言,等.鲜切水芹贮藏期间微生物

生长模型及货架期预测[J]. 食品科学, 2015, 36(18): 231-236.

[47]MITALO O W, TOKIWA S, KONDO Y, et al. Low temperature storage stimulates fruit softening and sugar accumulation without ethylene and aroma volatile production in kiwifruit[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 888.

[48]张琴, 周丹丹, 彭菁, 等. 油桃采后结合态香气变化规律及其与可溶性糖的关联性[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 206-214.

[49]郭春阳, 曹玉华, 张立, 等. 浅析气体调节保鲜技术在杨梅贮藏中的应用[J]. 南方农机, 2021, 52(21): 8-10.

[50]陈翔, 严伟东, 付兵, 等. 云和雪梨气调贮藏效果研究[J]. 中国果菜, 2019, 39(2): 1-5.

[51]FANG Y J, MINATO W. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies[J]. *Agriculture*, 2021, 11(10): 992.

[52]李阿敏. 果蔬气调贮藏冷却阶段温度变化的数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 24-27.

[53]杨巧银, 南晓红. 气调库湿度场的CFD模拟及加湿设备的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(3): 55-59.

[54]李静仪, 王增利, 昌萍, 等. 冰温贮藏及出库方式对欧李保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 155-161.

[55]林本芳, 鲁晓翔, 李江阔, 等. 冰温贮藏对西兰花保鲜的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 312-316.

[56]LIU B D, JIAO W X, WANG B G, et al. Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 100-109.

[57]李家磊, 管立军, 王昆仑, 等. 双波长法测定冰温贮藏西洋参中直链淀粉和支链淀粉的含量[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 223-227.

[58]宋健飞, 刘斌, 吴子健, 等. 冰温及冰温气调贮藏对冬枣品质的影响[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 70-74.

[59]张哲, 张秋月, 王怀文, 等. 冰温贮藏对采后葡萄果实品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 156-159.

[60]福建省市场监督管理局. DB35/T 1805-2018 食品冷链物流储存、运输、销售温度控制要求[EB/OL]. (2019-10-18) [2022-08-27]. <https://www.docin.com/p-2267862315.html>.

[61]张玉华, 王国利. 农产品冷链物流技术原理与实践[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018: 189.

[62]JIAO J Q, GUO L Y, LIU H, et al. Effect of different packaging film thicknesses on chilling injury in postharvest 'Cuixiang' Kiwifruit[J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2021, 49(2-3): 168-181.

[63]WEI S C, MEI J, XIE J. Effects of different carbon dioxide-modified atmosphere packaging and low-temperature storage at 13°C on the quality and metabolism in mango (*mangifera indica* L.) [J]. *Agriculture*, 2021, 11(7): 636.

[64]雷婷婷, 殷诚, 孙陟岩, 等. 气态臭氧结合微孔气调包装对杨梅品质和抗氧化性能的影响[EB/OL]. (2022-09-16) [2022-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220915.1744.012.html>.

[65]唐月明, 高佳, 朱永清, 等. 自发气调包装薄膜透气性对花椰菜低温贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 169-174.

[66]濮艳清, 卢立新, 潘嘹, 等. 预处理结合气调包装对混合鲜切果蔬品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 114-120.

[67]杨绍兰, 丁君, 李晓娜, 等. 低温下不同包装方式对生菜贮藏品质影响的研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(11): 127-131.

[68]王瑞庆, 冯建华, 魏雯雯, 等. 1-MCP处理和气调包装对枸杞鲜果低温贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 287-292.

[69]SUN Y T, ZHAO X Y, MA X, et al. Inhibitory effect of modified atmosphere packaging on *escherichia coli* O157: H7 in fresh-cut cucumbers (*Cucumis sativus* L.) and effectively maintain quality during storage[J]. *Food Chemistry*, 2022, 369: 1-8.

[70]罗政, 耿子坚, 陈飞平, 等. 不同气调包装对鲜食冬枣保鲜效果的比较[J]. 广东农业科学, 2021, 48(3): 151-159.

[71]罗政, 袁兆飞, 陈飞平, 等. 不同气调包装袋对红心猕猴桃后熟品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4506-4512.

[72]石润润, 王允祥, 庞林江. 气调保鲜体系关键因子对樱桃桃保鲜的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13): 261-262.

[73]王颖荣, 谢晶, 陶佳佳, 等. 低温对自发气调包装鸡毛菜保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(20): 331-334.

[74]DOWAN K, SARINTHIP T, KAEUN L, et al. Smart packaging with temperature-dependent gas permeability maintains the quality of cherry tomatoes[J]. *Food Bioscience*, 2021, 41:

1-8.

[75]田全明,魏佳,王曼,等.真空预冷结合氮气包装对小白杏采后活性氧代谢的调节作用[J].食品与发酵工业,2021,47(22):150-156.

[76]孙思胜,张晓娟,马传贵,等.1-MCP结合自发气调包装对夏黑葡萄保鲜效果[J].食品研究与开发,2020,41(22):93-99.

[77]SERGIO L, CANTORE V, SPREMULLI L, et al. Effect of cooking and packaging conditions on quality of semidried green asparagus during cold storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 712-718.

[78]ZHANG X J, ZHANG M, BIMAL C, et al. Novel combined use of red-white led illumination and modified atmosphere packaging for maintaining storage quality of postharvest pakchoi [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022(publish).

[79]FASAKE V, DASH SK, DHALSAMANT K, et al. Effect of ozone and antimicrobial treatments on the shelf life of cauliflower under modified atmosphere packaging[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 59(8): 1-11.

[80]张桂新,张艳艳.HACCP体系在果蔬冷链物流中的应用[J].华东科技,2012,(12):58-59.

[81]张建一,冯波,王庆德.冷藏库采用封闭式月台的技术经济分析[C]//2005福建省冷藏技术研讨会论文集,福建省制冷学会、厦门市制冷学会,2005:51-57.

[82]马丽,茅健.基于改进SLP方法的冷链仓储布局优化研究[J].物流科技,2021,44(3):141-145.

[83]周执海,刘永兴,林志军.一种移动式辅助装卸搬运工具的设计研制[J].大众科技,2011,(11):110-111.

[84]中联重科叉车.中联重科叉车研发推出CS-I级冷链专用叉车产品[J].物流技术与应用,2018,23(1):65.

[85]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.

[86]李靖,谢如鹤,刘广海,等.冷藏运输用新型低温相变材料及装备的研制[J].制冷学报,2018,39(4):32-37.

[87]孔琪,穆宏磊,韩延超,等.复合相变蓄冷材料的制备及对香菇贮藏品质的影响[J].食品科学,2020,41(15):238-246.

[88]李晓宇.液氮冷藏车内雾化喷淋对冷藏性能的影响[D].天津:天津商业大学机械工程学院,2016.

[89]王方,李梦楚,张燕玲,等.蓄冷型LNG重卡冷能利用

空调系统全路况特性[J].化工学报,2018,69(S2):459-465.

[90]PAN M Z, ZHU Y, LIANG Y C, et al. Performance assessment of a waste-heat driven CO<sub>2</sub>-based combined power and refrigeration cycle for dual-temperature refrigerated truck application[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 249: 1-19.

[91]DE MICHEAUX T L, DUCOULOMBIER M, MCUREH J, et al. Experimental and numerical investigation of the infiltration heat load during the opening of a refrigerated truck body[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 54: 170-189.

[92]SO J H, JOE S, SUNGYONG J, SEONHO Y, HWANG S H, et al. Analysis of the temperature distribution in a refrigerated truck body depending on the box loading patterns[J]. Foods, 2021, 10(11): 2560.

[93]申江,李超,和晓楠.果菜类蔬菜公路冷藏运输模拟试验研究[J].安徽农业科学,2011,39(3):1510-1513.

[94]申江,李超,和晓楠.叶菜类蔬菜公路冷藏运输模拟试验研究[J].食品科技,2011,36(5):70-73.

[95]郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等.保鲜运输车果蔬堆码方式对温度场影响的数值模拟[J].农业工程学报,2012,28(13):231-236.

[96]徐笑锋,章学来,王建军.不同环境温度下蓄冷式冷藏车温度场的模拟研究[J].低温与超导,2018,46(2):65-69.

[97]ZHU Y F, XIE J. Simulation and experiment of temperature field of different refrigerated trucks[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 594(1).

[98]张翔,韩佳伟,杨信廷,等.不同构造冷藏车厢体的冷却性能模拟与对比[J].制冷学报,2018,39(2):89-98.

[99]苏霞,王宝成.4种常见果蔬保鲜运输超声波加湿的生命周期模拟研究[J].食品与机械,2020,36(2):155-158.

[100]郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等.保鲜运输车厢用超声波加湿装置的设计与试验[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(6):181-187.

[101]陈海洋,张建一.蓄冷型运输保温箱在冷链中的应用[J].冷藏技术,2010,(3):12-16.

[102]张博,李喜宏,张新,等.樱桃番茄简约冷链物流蓄冷保温参数研究[J].食品工业,2018,39(3):193-197.

[103]高恩元,荆华乾.番茄冷链运输保鲜技术研究[J].制冷技术,2014,34(5):49-53.

[104]王达,吕平,贾连文,等.不同隔热材料对桃子蓄冷保温运输效果及品质影响的研究[J].食品科技,2018,43(2):

58-63.

[105]吴如书,刘升,章学来,等.基于CFD模拟研究不同保温结构和温度对番茄冷藏配送品质和效果的影响[J].制冷学报,2021,42(4):149-157.

[106]蔡宋宋,韩澄,廖甜甜,等.生鲜电商冷链物流包装技术研究[J].北方园艺,2015,(19):122-125.

[107]邸倩倩,杨兆丹,刘斌,等. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 纳米蓄冷箱蓄冷效果的影响因素[J].制冷学报,2017,38(1):73-79.

[108]徐笑锋,章学来,周孙希,等.蓄冷式多温区保温箱系统设计与实验研究[J].制冷学报,2019,40(3):92-98.

[109]翟纪强,宋海燕,肖婕.EPP多温区保温箱温控效果的特性研究[J].包装工程,2019,40(1):93-99.

[110]李锦,谢如鹤,刘广海,等.多温冷藏车降温特性及其影响参数研究[J].农业机械学报,2013,44(2):128-135.

[111]赵曜,唐刚志,朱孙科.多温区冷藏运输车气流组织特性研究[J].食品与机械,2017,33(1):119-121.

[112]王淑云,陈菡伟.冷链品配送系统双目标优化研究——基于多温共配的比较研究[J].工业技术经济,2017,36(11):71-78.

[113]刘广海,吴俊章,FOSTERA,等.多温蓄冷车设计与车内温度场分析[J].农业机械学报,2019,50(4):309-316.

[114]NUNES M C N, EMOND J P, RAUTH M, et al. Environmental conditions encountered during typical consumer retail display affect fruit and vegetable quality and waste[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 51(2): 232-241.

[115]CHAOMUANG N, FLICK D, DENIS A, et al. Experimental analysis of heat transfer and airflow in a closed refrigerated display cabinet[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 101-114.

[116]薛牡丹,吕彦力,石海军,等.柜外环境对立式冷藏陈列柜食品温度影响的研究[J].现代食品科技,2007,23(12):13-14.

[117]CHANG Z J, WU X H, LU Y L, et al. Numerical simulation on the food package temperature in refrigerated display cabinet influenced by indoor environment[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 5(1): 1-7.

[118]YUAN P, ZENG Q H, LEI Z L, et al. Experimental and

numerical study of heat transfer and flow characteristics with different placement of the multi-deck display cabinet in supermarket [J]. Open Physics, 2021, 19(1): 256-265.

[119]GRAY I, LUSCOMBE P, MCLEAN L, et al. Improvement of air distribution in refrigerated vertical open front remote supermarket display cases[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 31(5): 902-910.

[120]游孟醒,刘学平,向东,等.风冷冰箱冷藏室温度均匀性优化[J].机电产品开发与创新,2019,32(1):19-21.

[121]江峰,任猛,胡海梅,等.冰箱冷藏室高湿度方法研究及对鸡毛菜保鲜效果的影响[J].家电科技,2016,(9):57-59.

[122]CHEN Y, YUAN X. Experimental study of the performance of single-band air curtains for a multi-deck refrigerated display cabinet[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(3): 261-267.

[123]傅涛,李君,王海林,等.果蔬用敞开式制冷陈列柜湿度场分布特性实验[J].制冷学报,2014,35(4):34-41.

[124]SUN J N, TSAMOS K M, TSAAOU S A. CFD comparisons of open-type refrigerated display cabinets with/without air guiding strips[J]. Energy Procedia, 2017, 123: 54-61.

[125]汪厚银,史波林,欧克勤,等.基于菠菜品质变化的冰箱冷藏保鲜效果综合评价[J].食品工业科技,2018,39(19):278-285.

[126]陈志新,董瑞雪,卢成林,等.基于双模定位的冷链物流实时监测系统[J].保鲜与加工,2019,19(5):178-184.

[127]陈世超,田滨,吕宜生,等.冷链云服务体系研究与应用[J].智能科学与技术学报,2019,1(2):125-132.

[128]LA SCALIA G, NASCA A, CORONA O, et al. An innovative shelf life model based on smart logistic unit for an efficient management of the perishable food supply chain[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(1): 1-13.

[129]张蓉.新零售时代生鲜农产品“智慧+冷链”物流发展路径探究[J].商业经济研究,2022,(9):112-115.

[130]SHIH C W, WANG C H. Integrating wireless sensor networks with statistical quality control to develop a cold chain system in food industries[J]. Computer Standards & Interfaces, 2016, 45: 62-78.