

食品冷链物流专题

食品冷链的技术发展

申江, 杨萌

(天津商业大学, 天津 300134)

摘要目的 综述食品冷链的技术发展现状,为促进食品冷链发展提供参考依据方法 对近年来国内外食品冷链技术的应用和研究现状进行分析,介绍食品冷链中各个环节(预冷、速冻、冷库、冷藏运输及冷藏销售等)的技术进展结果 我国食品冷链各个环节的技术及应用还存在一些问题,还有较大的发展空间

空间结论 食品冷链技术的发展,不仅需要完善冷藏链的相关法律、法规及标准体系,更需要研究和开发能耗低、可靠性高且具有智能化的冷链设施和装置。对于果蔬冷链,发展智能化产地冷链装置是完善果蔬冷链的必要条件。冷链设施正常运行还需要专业的长期售后服务或巡回维护。

关键词: 食品冷链; 预冷; 冷库; 运输; 销售

中图分类号: TS205.7; TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)15-0001-08

Technological Development of Food Cold Chain

SHEN Jiang, YANG Meng

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper was to summarize the current development of the food cold chain and provide a reference for promoting the development of food cold chain. The application and research status of food cold chain technology all over the world in recent years were analyzed, and the developments in different sections of the food cold chain (pre-cooling, quick-frozen, cold storage, transport, marketing, et al.) were introduced. The results showed that there are still some problems in the technology and application of the food cold chain in China. And there is still a large room for development. In conclusion, the development of food cold chain does not only need to improve the related laws, regulations and standards, but also need to study and develop intelligentized cold chain facilities with low energy consumption and high reliability. For fruits and vegetables cold chain, it is necessary to develop intelligent cold chain facilities in the place of production. The operation of cold chain facilities requires long-term professional service and circuit maintenance.

KEY WORDS: food cold chain; pre-cooling; cold storage; transport; marketing

食品冷链是以制冷技术与设备为手段,使易腐食品在加工、贮藏、运输、销售等各个环节中始终处于规定的低温环境下,以保障食品质量、降低食品损耗的一项系统工程。随着人民生活水平的不断提高,对食品的要求越来越高,食品冷藏链得到快速发展。目前我国果蔬冷链运输率为15%,冷链流通率仅为5%,产后流通腐损率达到20%~30%,而发达国家果蔬冷链流通率均达到95%以上,产后流通腐损率仅为5%左右^[1],可见我国果蔬冷链物流与发达国家相比仍存在很大差

距。食品冷链按流通环节包括冷加工(果蔬采摘后预冷和冷冻食品的冻结过程)、冷藏(按不同食品的储藏条件的储藏过程,包括气调冷藏)、运输(按储藏条件的异地运输过程)、销售冷柜(食品超市和便利店在储藏温度下展示销售过程)等技术的应用。

1 预冷技术

预冷是保持果蔬品质、延长货架寿命的重要措施

收稿日期: 2015-07-12

作者简介: 申江(1960—),男,河北人,天津商业大学教授,主要研究方向为食品冷链技术、制冷系统优化及节能技术等。

之一,它可以迅速去除田间热,降低呼吸强度,减少微生物的侵袭,防止果蔬产品的腐烂,最大限度地保持果蔬产品的新鲜品质^[2-4]。果蔬腐损率高的主要原因之一就是没有应用果蔬产地专用预冷设备。常用的有效预冷方法包括水预冷、空气预冷和真空预冷。

1.1 水预冷

水预冷是用接近0℃的水同果蔬表面直接接触以使果蔬快速冷却到规定温度的方法,通常是将果蔬浸入冷水中或者将冷水喷洒到其表面。冷水预冷装置有喷雾式、洒水式、浸渍式和混合式等4种结构形式。喷雾式、洒水式预冷的优点是动力消耗小,缺点是易出现预冷“热点”,且预冷不均匀。浸渍式、混合式(浸渍+洒水)预冷的优点是预冷均匀,预冷效率高,有清洗功能,其缺点是需要往水中加入防腐剂,对产品会产生污染。各种水预冷方式都适用于甜玉米、芹菜、芦笋和荔枝等沾水不易腐烂的果蔬等^[5-9]。

Liang 等在对荔枝进行冷水预冷的实验中发现,冷水预冷不仅能将过氧化酶的活性降低,而且能延迟电解质液渗漏现象^[10]。阮文瑜等在对荔枝预冷方式选择的对比实验中发现,冷水预冷不仅能将荔枝降到较低的温度,而且降温速率比真空预冷和强制通风更快^[11]。

水预冷通过冷水直接同果蔬表面换热,预冷速度较快,且装置简单,是一种较好的预冷方法。应用的主要问题是防止循环冷水被污染。

1.2 空气预冷

常用的空气预冷方法有冷库预冷、差压预冷等2种方式。

1) 冷库预冷是将果蔬放在冷库中降温,利用空气强制对流来实现预冷的方法,是使用较早的一种冷却方法。它具有包装要求低、费用低、易于操作、预冷过程中果蔬能随时运入预冷间等优点,冷库预冷应用非常广泛,但由于效率低,能耗高,且易造成局部冻伤或冷却不到位等缺点,不会成为未来的发展趋势。

2) 差压预冷是通过冷空气同果蔬的所有表面进行对流换热,达到快速降温的目的。差压预冷要求必须在果蔬包装箱两侧打孔,使冷空气仅通过包装箱上的小孔进入果蔬的缝隙中,为使一定量的空气流入箱内,在箱两侧必然存在压差。通常采用风机强制冷风循环在箱体两侧产生压力差,冷风从箱内通过,将箱内果蔬热量带走,以达到冷却的目的^[12]。它具有设备成本低、冷却均匀、耗能低等优点,但它的收容能力较

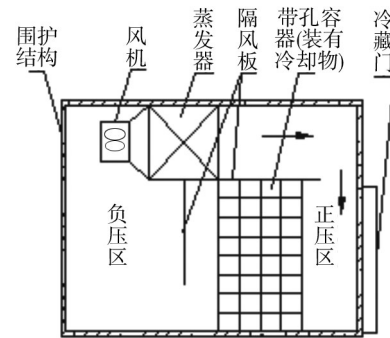


图1 差压预冷原理

Fig.1 Principle of pressure pre-cooling

低、码垛时间长。

李键采用差压预冷的方法对芒果的涂膜处理进行了实验研究。研究发现差压预冷结合涂膜处理能有效地抑制果实失水率的增加,并能够有效地维持芒果贮藏期间的果实品质^[13]。L.R.De Castro 等^[14]采用隧道式差压预冷的方法进行了实验研究。研究得出了设计隧道宽度的经验公式。John Kienholz 等^[15]通过对压差风机的改造,采用橡胶管道和静压箱与风机连接的方法进行了实验研究,发现这种方法的预冷效果更加均匀。

差压预冷作为一种有效的预冷技术,一直被国内外广泛研究和应用,将成为未来的主要发展趋势之一。

1.3 真空预冷

真空预冷是通过真空泵的抽吸来降低密闭预冷室内的压力,形成较高的真空度,利于产品中的水汽向外蒸发,带走蒸发潜热,从而促使产品温度降低,达到预冷的目的,其原理见图2。

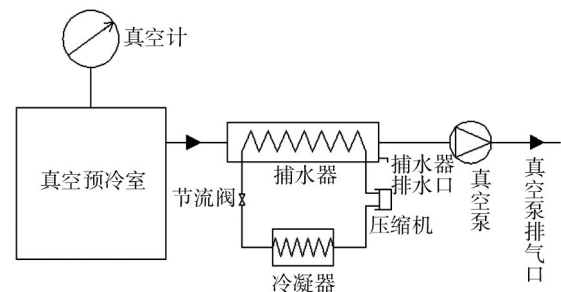


图2 真空预冷原理

Fig.2 Principle of vacuum pre-cooling

真空预冷具有冷却时间短、冷却均匀、蔬菜不与空气接触、更卫生等特点。真空预冷也有缺点,比如:适宜冷却的品种有限,一般适于单位质量表面积大的

蔬菜类,如叶菜类;会导致质量损失,温度每下降10℃,产品的水分会损失1.7%,对于叶菜类会影响其新鲜度^[16-23];成本较高,真空预冷装置的投资和运转费用都较高。

Wang^[24]采用有限元计算的方法对熟肉在真空预冷过程中的三维瞬态热质交换进程做了数值模拟,与实验结果对比分析发现熟肉的平均温度、表面温度以及中心温度的模拟误差都在2.5℃以内,熟肉的失水率模拟误差在7.5%以内。Sun^[25]采用CFD软件模拟了肉类食品真空预冷过程中影响肉类食品温度和失水率的各种因素,并通过模拟预测了真空预冷过程中肉类食品温度以及失水率的变化情况。

由于初期投资高,国内真空预冷设备推广率很低,就目前现状而言真空预冷更适合于处理量大的产地使用。

1.4 存在问题及对策

目前国内对果蔬预冷技术的研究较多,但应用较少。需要进行冷链处理的大多采用冷库预冷,方便之处是预冷和贮藏在一个地方,减少了搬运费用,但效率低、能耗高。出口果蔬根据目的国的要求,基本采用真空预冷或差压预冷。另外,进行预冷不仅投资高,还要增加一次搬运。针对国内预冷技术存在的问题,建议采用机械搬运,制定合理的预冷操作工艺,提高效率;研究发展连续性预冷设备,同冷库贮藏和冷藏运输有机结合,降低成本;预冷的应用主要在果蔬产地,考虑到技术人员的匮乏问题,应该发展可靠性高的智能化预冷设备和移动式预冷装置;以提高预冷效率为目的,继续进行预冷工艺的研究,包括包装箱形式、码垛方式、气流组织、预冷过程的干耗控制等方面。

2 速冻技术

2.1 设备分类及特点

食品快速冻结的方法及装置多种多样,根据冻结装置的结构特征和热交换方式不同,可分为空气强制循环式、接触式、喷淋浸渍式^[26]。其中空气强制循环式包括强烈鼓风机式、流化床式、隧道式、螺旋式。强烈鼓风机式的优点是冻结速度较快,缺点是冻结不均匀、能耗大、生产成本低。流化床式的优点是冻结均匀、速度较快,缺点是只适用于颗粒状物料的速冻。隧道式的优点是冻结速度较快,缺点是设备占地面积大、结构复杂、能耗大。螺旋式的优点是

结构紧凑、生产能力大,缺点是能耗大、生产成本较高。接触式的优点是能耗低,缺点是不能进行连续性生产。喷淋浸渍式的优点是冻结速度快,缺点是对冷媒的要求较高。

2.2 存在问题及对策

目前我国的速冻食品种类较少,相比于发达国家,人均占有量偏低,产品质量参差不齐。为了满足速冻产品的多元化需求,急需开发不同种类、结冰点、速冻温度的定制化速冻设备。为了提高产品质量,还需对设备的安全、清洁、卫生等因素进行改进。

我国速冻设备的自动控制方面与国外先进水平还存在较大差距。自动控制可以更加精确地控制温度,提高设备运行效率,从而提高速冻产品的质量和产量。在速冻技术中,对低温工质(如液氮、液体二氧化碳、液化天然气(LNG)等)的需求也不断上升,该技术能够方便、快捷、低廉、可靠且可控地获得深低温,解决一些货架期极短的易腐食品的保鲜问题。速冻过程中能耗较大,应发展节能型速冻装置,如开展小换热温差高效冷风机、融霜技术、多段蒸发温度等研究。

3 技术

冷库是应用制冷设备制造特定的低温环境,用来加工和贮存食品、工业原料、生物制品以及医药等物资的专用建筑物^[27]。随着食品冷链的发展,冷库的功能已不再拘泥于传统的冷加工和低温储藏,而是向着库存中心、调度中心、增值服务中心、先进冷链物流技术应用中心等多重角色演化,因此冷库是食品冷链的重要组成部分。

3.1 分类及特点

典型的冷库包括土建式冷库、装配式冷库、气调冷库、自动化立体冷库以及冰温冷库^[28]。

1) 土建式冷库。主体结构和地下荷重采用钢筋混凝土结构,围护结构墙体采用砖砌,可就地取材,造价低,隔热材料选择范围大,热惰性大,建筑周期长,易出现建筑质量问题,库容量较大。

2) 装配式冷库。主体结构采用轻钢,围护结构由预制的聚氨酯或聚苯乙烯夹芯板拼装而成,库体组合灵活,建设速度快,维护简单,可整体供应,库容量为中、小型冷库。

3) 气调冷库。除了控制库内温度和湿度外,还要

控制库内氧气、氮气、二氧化碳和乙烯的含量,可以抑制果蔬的呼吸作用和新陈代谢,但设备成本投入较高,库容量不宜过大。

4) 自动化立体冷库。在高架冷库中采用计算机控制技术提高空间利用率、出入库能力,采用数字自动化的制冷设备,库容量较大。

5) 冰温冷库。将食品储藏在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下至各自的冻结点,储藏时间增加2~10倍,不破坏细胞,库容量不大^[29-30]。

3.2 气调贮藏技术

气调贮藏保鲜技术是通过控制贮藏空间的气体组分(主要是氧气和二氧化碳的浓度)来实现控制水果呼吸作用等生理活动的进行,以达到延长水果保质期的目的。气调贮藏所用的气体主要有 O_2 、 CO_2 、 N_2 ,起贮藏保鲜作用的气体组分主要是 O_2 和 CO_2 , N_2 往往作为一种填充气体使用^[31]。

Liu等^[32]在莱阳梨气调贮藏研究中发现,在温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, $\text{O}_2(2\%)+\text{CO}_2(2\%)$ 气调组的超氧化物歧化酶(SOD),过氧化物酶(POD),过氧化氢酶(CAT)等3种抗氧化酶保持在相对较高的水平,清除超氧自由基等活性氧的能力增强,而LOX活性显著降低,脂质过氧化反应受到有效抑制,从而较好地维持了细胞膜的完整性,延缓了衰老变质,延长了贮藏期。Serradilla等^[33]在对甜樱桃的气调贮藏研究中发现,在温度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, $\text{O}_2(5\%)+\text{CO}_2(10\%)$ 和 $\text{O}_2(8\%)+\text{CO}_2(10\%)$ (N_2 作为填充气体)的气调组分能够非常有效地抑制嗜常温好氧菌、嗜冷菌、假单胞菌、酵母菌和霉菌的生长,有效抑制由微生物引起的腐烂变质。麦馨允等^[34]等发现主动气调包装(初始气体比例为 $\text{O}_2(21\%)+\text{N}_2(79\%)$)贮藏能够很好地保持杨桃的色泽、硬度和营养成分。

3.3 冰温贮藏技术

冰温的定义为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下至食品结冰点以上的温度区域。冰温贮藏是在此温度区域内对食品进行贮藏^[35-38]。冰温贮藏技术的优点在于温度尚未达到结冰点,进而不会破坏细胞结构,有害微生物的活动也受到抑制,从而能延长保鲜时间,提高贮藏食品的品质。

近年来对冰温贮藏技术的研究工作越来越广泛,并取得了一定的研究成果。胡位荣^[39]测定了中国8种主要荔枝品种的结冰点,并确定了冰温贮藏荔枝最适宜的温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时也对龙眼冰温贮藏中缓释剂的添加浓度进行了研究,得到质量分数为0.4%的 SO_2

缓释剂能够较好地贮藏龙眼^[40]。白丽娟^[41]研究发现对于不同种类的树莓,其冰点温度也是不同的,冰温贮藏可以提高CAT的活性,降低多酚氧化酶的活性,贮藏效果要好于普通冷藏,同时厚度为 0.04 mm 的PE袋的保鲜效果最好。周拥军^[42]等利用冰温贮藏对柿果细胞壁物质代谢进行了研究,结果表明冰温贮藏显著抑制了多聚半乳糖醛酸酶和纤维素酶的活性,延长了贮藏期。

3.4 现有技术存在问题及对策

目前我国冷库现有技术存在以下问题。

1) 冷库节能。由于我国冷库总量中20世纪七八十年代建造的冷库比重很大,这些冷库普遍存在设备老化、制冷效果差、配套设施不健全等诸多问题,因此需要在冷库节能技术上有所突破,同时对现有冷库进行节能改造。欧美发达国家通常采用 NH_3/CO_2 复叠式制冷系统^[43]。从冷库运行情况来看, NH_3/CO_2 复叠式制冷系统比 NH_3 单级制冷系统在制取单位冷量消耗功率减少了25%,比 NH_3 双级压缩制冷系统少7%,并且与 NH_3 双级压缩制冷系统相比成本降低了7%~8%^[44]。发达国家还应用一些新技术节能,主要包括变频技术、冷库和LNG结合技术,以及冷库和热电联产单元结合的技术等。变频技术使设备能够根据实际的工况环境做出调整,减少耗电量。1976年日本已在神奈川县的根岸基地使用LNG技术对金枪鱼进行冷加工,这种系统较机械制冷来说可以节能37.5%^[43]。另外,热电联产也是一种节能减排的有效手段。英国南岸大学的G.G. Maidment和G. Prosser在1998年提出将冷库和热电联产单元结合的方法来综合利用能量并减少碳排放量^[45],其原理见图3。发展大型自动化冷库是减少冷链运行成本的措施之一,一方面可以降低其单位能耗,如 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷库的能耗可达到每天吨耗电量 $0.3\text{ kW}\cdot\text{h}$,最好的可接近 $0.1\text{ kW}\cdot\text{h}$;另一方面可大量减少人工费

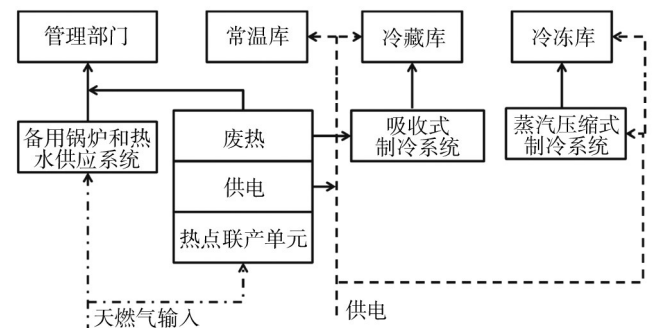


图3 热电联产单元和冷库结合原理

Fig.3 Principle of the combination of CHP unit and cold storage

用。

2) 涉氨冷库安全。我国的氨冷库事故发生率很高,在2010—2013年的4年间,约有12起重大的涉氨冷库泄漏事故发生,造成的经济损失及人员伤亡非常巨大。从技术层面来看,要降低事故发生率和危害,一是要减小氨的充注量,例如采用分散式制冷系统;可以采用改变氨泵供液方式的方法,采用直接膨胀式制冷系统,同时利用冷风机代替盘管式蒸发器;采用间接式制冷系统,可以在很大程度上减少氨的使用量,而且还能做到将氨区域和库内区域隔离,使得人员操作更加安全。二是要加大企业的技术投入力度,开发并应用先进的氨泄漏检测技术,例如流量-压力检测、温度信号检测等,在泄漏的第一时间发出警报,同时为后期维修提供泄漏信息。三是应用冷库的自动化技术,减少不必要的操作人员,完善泄漏应急处置装置,最终实现冷库自动、安全运行。

3) 特种功能型冷库。同大型及超大型冷库相比,中、小型冷库及功能型冷库虽然库容量较小,但是有其独特的优势。例如金枪鱼需要贮藏在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中才能保证品质,因此离不开超低温冷库。这些冷库技术相比于传统冷库技术来说,无论从研究方面还是应用方面均有较大的不足。

4) 果蔬冷藏链。由于技术人员条件的限制,需要发展可靠性高且具有一定智能化的产地冷库,智能化包括根据贮藏对象自动设定温湿度条件和远程自动诊断系统运行状况。

4 冷藏运输技术

冷藏运输技术主要有公路、铁路、水路、航空、集装箱等5种方式。

1) 公路运输有机械冷藏车、液氮冷藏车、干冰冷藏车和冷板冷藏车等。冷藏车具有运输周期短、灵活性高、短途运输时经济性高等特点。

2) 铁路运输有机冷车和冷藏集装箱等。机冷车是铁路冷链运输的重要工具,有运输量大、速度快、安全性高等优点,目前多以车组形式出现,不过也有单节机冷车,主要缺点是成本高且难于管理。

3) 水路冷链运输有渔业冷藏船、冷链运输船等,以远洋运输和渔业捕捞应用为主,虽然运量大,经济性好,但是速度较慢,且易受恶劣天气的影响。

4) 航空业中主要使用的是航空集装箱,在各种运输工具中速度最快,但同时运费较高昂,适合运送附加值高且腐损快速的水果和鲜花等货品。

5) 冷藏集装箱有内藏式冷藏集装箱、外置式冷藏集装箱、液氮和干冰冷藏集装箱、气调式冷藏集装箱等。它是冷链运输业的重要工具,可以看成小型冷库系统,可实现“门到门”运输,目前计算机网管理系统和电子数据交换系统在冷藏集装箱上有所应用,在冷链物流业的发展中起到了重要的作用^[43]。

制冷系统是冷藏运输装备的重要部分之一,对车厢内的温度起着关键作用。随着数字化控制技术的发展,制冷系统已由以往的人工操作PTI检查变为现在的自动PTI检查。同时制冷剂也从过去用于制冷装置的R12和R22到R134a和R404a。再到现在研究很热门的液氮喷淋技术和液态 CO_2 气化制冷技术。其中,Lorentzen等研制并对 CO_2 制冷系统与传统制冷剂制冷系统在降温性能、制冷量、性能系数方面进行了比较分析,发现 CO_2 制冷系统具有良好的性能,在未来会有广阔的发展与应用前景。由此看来, CO_2 制冷系统、液氮喷淋技术和液态 CO_2 气化制冷等节能、环保型制冷方式就是未来的研究重点^[46]。冷链运输的能耗是通过运输工具的油耗来表征的,制冷系统耗能在运输工具总耗能中占有大约1/3的比例^[47]。采用新型制冷机(如喷射循环系统)以及蓄冷技术可以在一定程度上节省冷链运输的耗能,并且保证货物的品质。

目前,我国冷链运输技术与发达国家相比,冷链运输率较低(见表1),但冷链物流产业正以迅猛的姿态保持增长(见图4—5)^[48]。结合国内外当前冷藏运输装备技术现状不难发现,改进现有冷藏运输装备技术性能,研发适应我国冷藏运输市场需求的节能、环

表1 国内外冷藏汽车发展状况对比^[48]

Tab.1 The development comparison of refrigerated trucks in China and overseas

国家	保有量/万辆	货运汽车占比/%	冷链运输率/%
中国	5.4	0.42	25
美国	20	0.8~1	85
日本	12	5.4~6	95
英国	2.8	2.5~2.8	80
德国	3.3	2~3	90

保、经济、新型设备是未来的发展趋势。

5 冷藏销售技术

在食品超市和便利店,冷藏陈列柜具有在储藏温度下展示和销售的功能。高广通等人在研究中证明,蒸发温度的提高会有效减少结霜量,减少除霜方面的

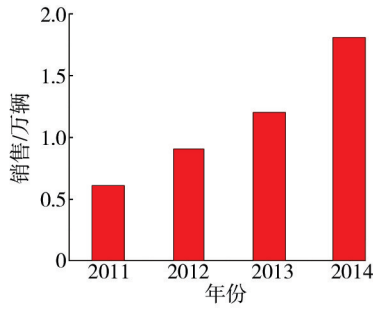


图4 2011—2014年冷藏车整体市场的销量走势
Fig.4 Market sales trend in refrigerated trucks from 2011 to 2014

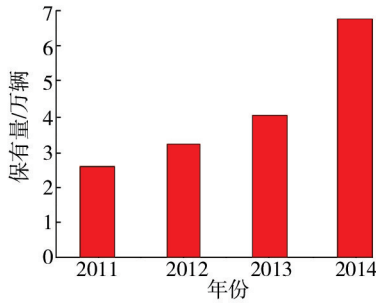


图5 2011—2014年冷藏汽车市场保有量的变化趋势
Fig.5 Market holding trends in refrigerated trucks from 2011 to 2014

耗电量^[49]。Vishaldeep Sharma对7种不同的CO₂系统进行了理论计算,得出了美国各个地区最适合的超市CO₂制冷系统,为美国超市CO₂制冷系统的发展提供了理论依据^[50]。IN.Suamir等通过理论和实验研究得到:与常规系统相比,超市使用CO₂系统可以节省30%的能源,温室气体排放量可减少43%,CO₂系统的投资回收期为3.2年,远小于常规系统^[51]。Samer Sawalha通过研究发现,跨临界CO₂系统适合寒冷气候,而NH₃/CO₂系统在炎热地区的能耗最低,这2种系统是常规系统很好的替代系统^[52]。

目前我国CO₂制冷系统在超市中的应用还比较少,但必将成为一种趋势。

6 冷链信息化

食品冷链物流过程中主要应用的信息技术包括传感器技术、包装标识技术、远距离无线通信技术、过程跟踪与监控技术以及智能决策技术。不同类别的技术在包装仓储、物流配送和批发零售等物流的各个阶段各司其职,是组成食品物流过程信息化管理不可或缺的要素。各种信息技术在冷链物流过程信息技术的作用见图6。

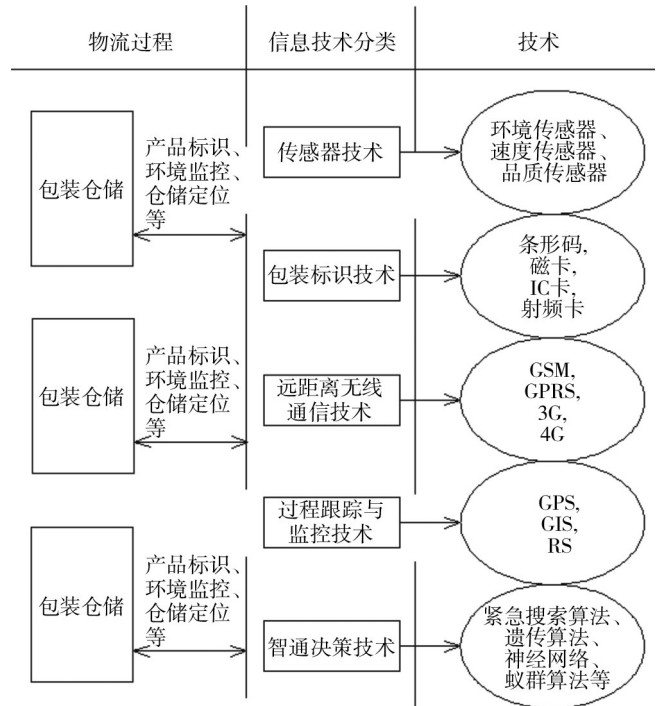


图6 食品冷链物流过程信息技术体系结构
Fig.6 The IT architecture diagram in food cold chain logistics process

冷链信息化主要利用现代传感器技术、通信技术、网络技术以及数据库技术,将冷链中的各个要素信息汇总至数据库,用以深入开发并合理利用冷链资源。冷链信息化技术是冷链物流与信息技术结合的新兴产物,是冷链物流降低成本的一种解决方案,同时是食品质量安全的一个重要保障。很多发达国家建立了诸如虚拟的农产品冷链物流供应链管理系统,实现了对各种货物的全程跟踪、动态监控,同时通过网络连接全国的需求信息以及产品信息,提高了冷链物流的运作效率。我国整个物流行业的信息化进程起步较晚,总体水平不高,具体到冷链物流尤其如此,因此迫切需要在冷链物流信息技术研究和推广应用等方面加大投入力度。

7 结语

目前,我国经济的快速发展及人们生活水平的逐步提高为食品冷藏链的发展提供了广阔的发展平台。要使食品冷藏链得到快速的发展,不仅需要完善冷藏链的相关法律、法规及标准体系,更需要研究和开发能耗低、可靠性高且具有智能化的冷藏链设施和装置。对于果蔬冷链,发展智能化产地冷链装置是完善果蔬冷链的必要条件。冷链设施正常运行还需要

专业的长期售后服务或巡回维护。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 农产品冷链物流发展规划[R]. 北京:国家发展和改革委员会, 2010.
National Development and Reform Commission. The Plan of Agriculture Products Cold Chain[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2010.
- [2] 苗玉涛, 邹同华, 黄健. 压差预冷技术的研究现状与发展趋势[J]. 制冷空调与电力机械, 2005(6): 14—18.
MIAO Yu-tao, ZOU Tong-hua, HUANG Jian. Present Situation and Developing Tendency of Pressure-difference Precooling Technology[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2005(6): 14—18.
- [3] TADHG B, SUN Da-wen. Pre-cooling Technique and Application for Horticultural Products are View[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24: 154—170.
- [4] 张现红. 送风参数对果蔬压差预冷效果的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2014.
ZHANG Xian-hong. Effect of Parameters of Supply Air on Pressure Precooling of Fruits and Vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014.
- [5] 翟家佩, 蒋伟. 冷水冷却式果蔬预冷装置设计[J]. 食品研究与开发, 2001, 22(1): 56—59.
ZHAI Jia-pei, JIANG Wei. The Pre-cooling Device Design of Vegetables with the Way of Cold Water Cooling[J]. Food Research and Development, 2001, 22(1): 56—59.
- [6] 赵如进. 关于我国铁路蔬菜水果运输预冷环节的探讨[J]. 铁道货运, 1998(4): 40—46.
ZHAO Ru-jin. The Pre-cooling Discussion of Fruits and Vegetables on Chinese Railway Transport[J]. Railway Freight Transport, 1998(4): 40—46.
- [7] 高红岩, SIGURJON A, 胡瑞卿, 等. 流化冰预冷与冰温贮藏新鲜鳕鱼片质量特性分析研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 48—55.
GAO Hong-yan, SIGURJON A, HU Rui-qing, et al. Analysis on Quality of Fresh Cod (Gadus Morhua) Fillets Pre-cooled with Slurry Ice and Further Superchilled Storage[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(2): 48—55.
- [8] BELLAS I, TASSOU S A. Present and Future Application So-fice Slurries[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28: 115—121.
- [9] DAVIES T W. Slurry Ice as a Heat Transfer Fluid with a Large Number of Application Domains[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28: 108—114.
- [10] LIANG Y S, WONGMETHA O, WU P S, et al. Influence of hydrocooling on Browning and Quality of Litchi Cultivar Feizixiao during Storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2013(36): 1173—1179.
- [11] 阮文疏, 刘宝林, 宋晓燕. 荔枝的冷却方式选择[J]. 食品工业科技, 2012(11): 352—354.
RUAN Wen-liu, LIU Bao-lin, SONG Xiao-yan. Comparison of Cooling Method for Litchi Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012(11): 352—354.
- [12] WILLS R B H. Postharvest[M]. Australia: UNSW, 2007.
- [13] 李健, 曹建康, 姜微波. 涂膜处理对芒果压差预冷效果的影响[J]. 食品科技, 2013, 38(7): 34—37.
LI Jian, CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. The Effect of Wax Coating on Quality of Mango Fruits during Pressure Precooling Process[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(7): 34—37.
- [14] CASTRO L R. Effect of Container Opening Area on Air Distribution during Precooling of Horticultural Produce[J]. Transaction of the ASAE, 2004, 47(6): 2033—2088.
- [15] KIENHOLZ J, EDEOGU L. Methods for Precooling Produce [J]. Alberta Agriculture Food and Rural Development, 2002, 5(6): 5—9.
- [16] 韦公远. 果蔬真空预冷装置[J]. 保鲜与加工, 2002, 2(3): 31.
WEI Gong-yuan. Vacuum Cooling Equipment of Vegetables and Fruits[J]. Storage and Process, 2002, 2(3): 31.
- [17] NOBLE R. A Review of Vacuum Cooling of Mushrooms[J]. Mushroom Journal, 1985, 149: 168—170.
- [18] 陶菲, 张慙. 真空预冷对白蘑菇贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2006, 22(2): 47—48.
TAO Fei, ZHANG Min. Effect of Vacuum Cooling on Quality of Agaricus Bisporus during Storage[J]. Food and Machinery, 2006, 22(2): 47—48.
- [19] MCDONALD K, SUN D W. Vacuum Cooling Technology for the Food Processing Industry: A Review[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45: 55—65.
- [20] 王如林, 夏睿. 真空预冷技术的开发和应用[J]. 广州食品工业科技, 1999, 56(1): 54—55.
WANG Ru-lin, XIA Rui. Development and Application of Vacuum Cooling Technology[J]. Guangzhou Food Science and Technology, 1999, 56(1): 54—55.
- [21] 周山涛. 果蔬贮运学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
ZHOU Shan-tao. Storage Research of Fruits and Vegetables [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2000.
- [22] 邓东泉, 孙恒, 肖尤明, 等. 真空预冷技术的现状和发展前景[J]. 食品工业科技, 2002, 23(8): 73—75.
DENG Dong-quan, SUN Heng, XIAO You-ming, et al. Situation and Development Prospects of Vacuum Cooling Technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2002, 23(8): 73—75.
- [23] 王丽琼. 果蔬贮藏与加工[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
WANG Li-qiong. Storage and Processing of Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008.

- [24] WANG Li-jun, SUN Da-wen. Modeling Vacuum Cooling Process of Cooked Meat-Part 2: Mass and Heat Transfer of Cooked Meat under Vacuum Pressure[J]. International Journal of Refrigeration, 2002(25):862—871.
- [25] SUN Da-wen, HU Ze-hua. CFD Simulation of Coupled Heat and Mass Transfer through Porous Foods during Vacuum Cooling Process[J]. International Journal of Refrigeration, 2003(26):19—27.
- [26] 申江. 制冷装置设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
SHEN Jiang. Design of Refrigeration Equipment[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010.
- [27] 湖北工业建筑设计院. 冷藏库设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1988.
Hubei Industrial Architectural Design Institute. Design of Cold Storage[M]. Beijing: China Architectural Industrial Press, 1988.
- [28] LI Zhi. The Thermal Performance and Optimized Design for Inflatable Mini-cold Storage[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013.
- [29] 王世清, 姜文利, 李凤梅, 等. 气调库与气调贮藏保鲜技术[J]. 粮油加工, 2008(10):124—127.
WANG Shi-qing, JIANG Wen-li, LI Feng-mei, et al. The Technology of Cold Storage and Controlled Atmosphere Storage[J]. Cereals and Oils Processing, 2008(10):124—127.
- [30] 石文星, 彦启森, 马灵芝, 等. 冰温技术及其在食品工业中的应用[J]. 天津商学院学报, 1999(5):58—62.
SHI Wen-xing, YAN Qi-sen, MA Ling-zhi, et al. Controlled Freezing-point Technique and Its Application in Food Industry[J]. Journal of Tianjin University of Commerce, 1999(5):58—62.
- [31] 戚英伟, 田建文, 王春良. 水果气调贮藏保鲜研究进展[J]. 保鲜与加工, 2014, 14(4):53—58.
QI Ying-wei, TIAN Jian-wen, WANG Chun-liang. Research Advances in Modified Atmosphere Preservation of Fruits[J]. Storage and Process, 2014, 14(4):53—58.
- [32] LIU R L, LAI T F, XU Y, et al. Changes in Physiology and Quality of Laiyang Pear in Long Time Storage[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 150(4):31—36.
- [33] SERRADILLA M J, VILLALOBOS M C, HERNANDEZ A, et al. Study of Microbiological Quality of Controlled Atmosphere Packaged 'Ambrunes' Sweet Cherries and Subsequent Shelf-life[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 166(1):85—92.
- [34] 麦馨允, 胡长鹰. 气调包装对杨桃贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(6):213—218.
MAI Xin-yun, HU Chang-ying. Effects of Modified Atmosphere Packaging on the Quality of Carambola[J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(6):213—218.
- [35] 张辉玲, 刘明津, 张昭其. 果蔬采后冰温贮藏技术研究进展[J]. 热带作物学报, 2006, 27(1):101—105.
ZHANG Hui-ling, LIU Ming-jin, ZHANG Zhao-qi. Advances on Post-harvest Ice Cold Storage of Fruits and Vegetables[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2006, 27(1):101—105.
- [36] WANG Jie, LI Li-te, DAN Yang. The Correlation between Freezing Point and Soluble Solids of Fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2003(60):481—484.
- [37] ZHANG Min, LI Chun-li, HUAN Yan-jun, et al. Preservation of Fresh Grapes at Ice Temperature High Humidity[J]. International Agrophysics, 2001, 15(2):139—143.
- [38] LI Wen-xiang, ZHANG Min. Effects of Combined Hypobaric and Atmosphere Cold Storage on the Preservation of Honey Peach[J]. Int Agrophysics, 2005, 19:1—6.
- [39] 胡位荣, 张昭其, 蒋跃明, 等. 采后荔枝冰温贮藏的适宜参数研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4):797—802.
HU Wei-rong, ZHANG Zhao-qi, JIANG Yue-ming, et al. Study on the Parameter of Ice Temperature Storage in Litchi[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(4):797—802.
- [40] 张辉玲, 胡位荣, 庞学群, 等. 冰温与SO₂缓释剂对龙眼贮藏的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(6):1325—1328.
ZHANG Hui-ling, HU Wei-rong, PANG Xue-qun, et al. Effect of Ice Temperature Technique and SO₂ Releaser on Storage of Longan Fruits[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(6):1325—1328.
- [41] 白丽娟. 冰温贮藏对红树莓品质影响的研究[D]. 天津:天津商业大学, 2014.
BAI Li-juan. Study on the Effect of Ice Temperature Storage on Quality of Red Raspberries[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014.
- [42] 周拥军, 郝海燕, 陈杭君, 等. 冰温贮藏对柿果细胞壁物质代谢的影响[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4):134—138.
ZHOU Yong-jun, HAO Hai-yan, CHEN Hang-jun, et al. Effects of Ice Temperature Storage on Metabolism of Cell Wall Material in Persimmon Fruits[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2011, 11(4):134—138.
- [43] 申江. 低温物流技术概论[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
SHEN Jiang. The Introduction of Low Temperature Logistics[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [44] 刘杨, 臧润清. NH₃/CO₂复叠式制冷系统概述[J]. 制冷与空调, 2010, 10(2):53—56.
LIU Yang, ZANG Rui-qing. Summary of NH₃/CO₂ Cascade Refrigeration System[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2010, 10(2):53—56.
- [45] MAIDMENT G G, PROSSER G. The Use of CHP and Absorption Cooling in Cold Storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2000(20):1059—1073.
- [46] 李锦, 谢如鹤. 冷藏运输装备技术研究进展[J]. 流体机械, 2014, 42(5):82—87.

(上接第8页)

- LI Jin, XIE Ru-he. Research Progress of Refrigerated Transport Equipment Technology[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(5):82—87.
- [47] 山田悦久. 小型货车用喷射式冷冻机[J]. 制冷技术, 2010(2):35—39.
- ETSUHISA Y. Ejector System for Small Truck Refrigerators[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2010(2):35—39.
- [48] 宝鹤鹏, 饶晓鑫. 2014年我国冷藏车市场高速增长[J]. 专用汽车, 2015(2):46—48.
- BAO He-peng, RAO Xiao-xin. The Rapid Growth of Refrigerated Trucks in China in 2014[J]. Special Purpose Vehicle, 2015(2):46—48.
- [49] 高广通, 杨一帆, 谭永安, 等. 提高蒸发温度对超市制冷系统经济性的影响[J]. 制冷与空调, 2012, 12(6):19—23.
- GAO Guang-tong, YANG Yi-fan, TAN Yong-an, et al. Influence of Increasing Evaporating Temperature on the Economy of Supermarket Refrigeration System[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(6):19—23.
- [50] VISHALDEEP S, BRIAN F, PRADEEP B. Comparative Analysis of Various CO₂ Configurations in Supermarket Refrigeration Systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2014(46):86—99.
- [51] SUAMIR I N, TASSOU S A, MARRIOTT D. Integration of CO₂ Refrigeration and Tri-generation Systems for Energy and GHG Emission Savings in Supermarkets[J]. International Journal of Refrigeration, 2012(35):407—417.
- [52] SAMER S. Theoretical Evaluation of Trans-critical CO₂ Systems in Supermarket Refrigeration. Part 2: System Modifications and Comparisons of Different Solutions[J]. International Journal of Refrigeration, 2008(31):525—534.