

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-908-06

应用于冷链的前置仓现状与展望

赵 举¹ 顾 瀚² 陈 曦²

(1. 上海市质量监督检验技术研究院 上海 200072;
2. 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

【摘 要】 前置仓作为解决冷链配送“最后一公里”难题的有效解决手段之一,通过广覆盖的方式以实现有效的短时效配送。在生鲜电商及消费市场迅速发展的背景下,以冷链相关方面为研究对象,结合国内外小型冷库及设备的研究,对前置仓货物存储方面进行分析,为相关设施建设给出了一定的指导建议。

【关键词】 前置仓; 小型冷库; 冷链

中图分类号 TB658 文献标识码 A

Situation and Prospect of Front Warehouse Applied to Cold Chain

Zhao Ju¹ Gu Han² Chen Xi²

(1. Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai, 200072;
2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093)

【Abstract】 As an effective way to solve the last-kilometer problem in the distribution process, the front warehouse can realize the short-term distribution by means of wide coverage. In the background of the rapid development of fresh food e-commerce and consumer markets, this article took cold chain as the research object, combined with research on small cold storage and equipment at home and abroad, and analyzed the storage of goods in the front warehouse, some guidance and suggestions for related facilities are provided.

【Keywords】 Front warehouse; Small cold storage; Cold chain

作者(通讯作者)简介: 赵 举(1990-),男,硕士,研究方向为制冷设备检测及标准化, E-mail: zhaaju199007@163.com
收稿日期: 2021-04-16

0 引言

近年来,我国生鲜市场在电商的带动之下发展迅速,2019年中国生鲜电商的市场规模达到1620亿元^[1],并持续保持增长势头,如图1所示。随着疫情的发生而导致消费习惯的改变,越来越多的消费者采用线上下单线下配送的方式购买生活用品,生鲜农产品占据其中的较大比重,然而食物本身的特性导致在常温下极易发生腐烂变质现象,从而对消费者的健康与安全造成隐患,因此运输该类产品对于冷链的完整性及时效性都有着严格的要求^[2]。

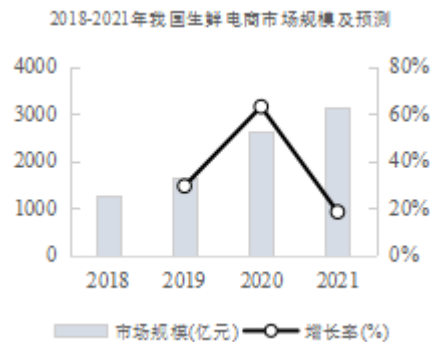


图1 2018-2021年我国生鲜电商市场规模及预测

Fig.1 Scale and forecast of fresh e-commerce market in

China from 2018 to 2021

前置仓是电商发展、市场需求增加及冷链产业推进的背景之下所提出的一种仓储新概念, 根据《前置仓管理规范》(T/CCFAGS 016-2020) 定义是一种通过企业总部线上经营, 将顾客订单通过前置在社区的服务站, 实现商品快速到达的零售业态, 店面承担日常商品储存和履约配送服务, 是解决“最后一公里”问题的有效方式之一^[3]。

但受限于发展初期的运营成本, 区域数据的积累分析, 以及早期基础性设施的老旧问题, 前置仓概念受到关注的同时在推广及运营过程中存在不少挑战^[4]。

目前, 国内已涌现出一批采用前置仓模式的电商企业, 以每日优鲜为例, 其截止至 2019 年已于 20 个主要城市开设了 1500 多个前置仓, 如图 2 所示, 然而前置仓在发展的过程中缺少具体的详细标准及适用的规范^[5], 因此前置仓建设需要参考传统冷库的相关研究并结合其实际运营过程中的特点。

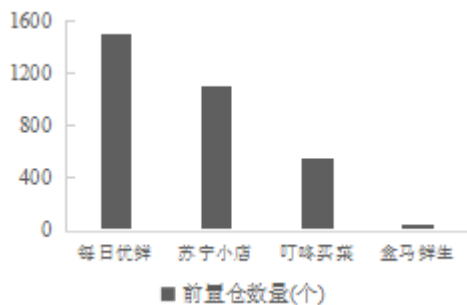


图 2 2019 部分电商前置仓数量

Fig.2 The number of some e-commerce front warehouses in 2019

1 前置仓制冷设备

前置仓根据运营模式可主要分为两大类^[6]: 店仓一体类前置仓及纯仓储类前置仓。不同类型的前置仓所采用的制冷系统上也会有着各方面的差异, 如表 1 所示。

根据 GB/T 24616-2019 标准中对于冷藏产品的规定其存储温度范围应控制在 0~8℃, 对于冷冻产品温度需低于-18℃, 其中尤其需要注意蔬果生鲜产品有别于普通冷藏货物对存储环境具有特殊的保鲜要求, 因此前置仓进一步细分存储模式就

具有必要性。

表 1 不同类别前置仓的特点及代表企业

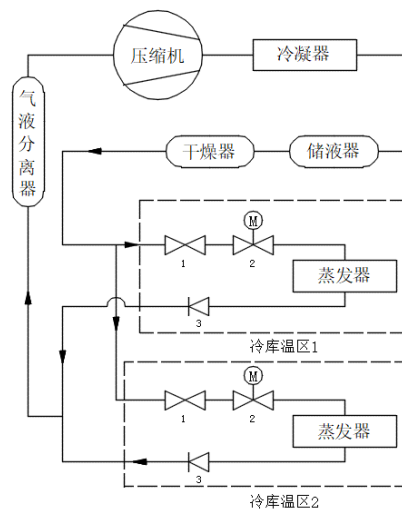
Table 1 Characteristics and representative enterprises of different types of front warehouses

代表企业	叮咚买菜	每日优鲜	盒马鲜生	永辉、沃尔玛、大润发
运营模式	纯仓储类	纯仓储类	店仓一体类	店仓一体类
存储方式	冷库为主、冷柜为辅		综合	综合
产品品类	以蔬菜生鲜产品为主		全品类	全品类
特点	社区配送时效性高		线上线下结合	产品种类齐全, 店仓面积大

1.1 纯仓储类前置仓

目前, 纯仓储类小型前置仓主要使用装配式冷库进行货物的统一存储。

为应对货物的多温区存储需求, 目前前置仓及商超所采用的主要方案为一机单库或一机多库模式。其中一机双库方案适通过使用多个冷风机分别为不同的冷库进行供冷, 如图 3 所示, 当库温达到设定点后关闭电磁阀停止该区域的制冷, 该方案对于库内温度控制得较好, 但由于多个风机的分别运行会出现交替工作的状况, 因此需要合理设置蒸发温度或安装延时装置防止压缩机频繁的启停^[7]。



1-电磁阀; 2-电子膨胀阀; 3-单向阀

图 3 一机双库制冷系统流程图

Fig.3 Schematic of a refrigeration system about one machine with two rooms

1.2 店仓一体类前置仓

随着移动设备及互联网的普及, 传统商超企业为应对市场变化、改变运营模式, 对门店进行了店

仓一体化的转型,使其同时履行到店购物及社区配送的作用,如图4所示。该类前置仓相较小型纯仓储前置仓具有更多的冷柜设备,随着我国对于冷柜设备自主研发能力的不断增强,商超领域对蔬菜、肉类储存保鲜方面意识的提高,商用冷柜的市场份额增幅因此不断上升。

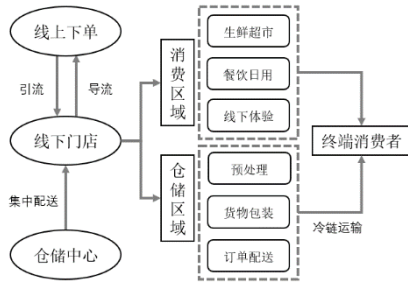


图4 店仓一体类前置仓示意图

Fig.4 Schematic diagram of store warehouse integrated front warehouse

市场上针对生肉、熟肉、海鲜、乳品等产品也进行了专用冷柜设备的划分,为丰富前置仓的货物种类提供了方案;互联网智能技术可帮助管理者进行货物盘点、实时监控等管理工作,为消费者食品安全提供了保障^[8]。针对如三文鱼等最佳存储温度在-45°C以下的特殊商品可选择低温冷柜设备进行独存储,以此进一步完善前置仓的货物种类、提升服务质量。

2 前置仓性能研究

2.1 围护结构

目前前置仓的主流保温材料主要有膨胀珍珠岩、聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚氨酯、真空绝热板等,材料的优缺点如表2所示^[9]。

表2 前置仓主流保温材料比较

Table 2 Comparison of main thermal insulation materials for front warehouse

保温材料	优点	缺点
膨胀珍珠岩	保温, 环保, 使用寿命长	吸水性较强, 施工难度高
聚苯乙烯	密度低, 抗冲击, 吸水率低	有毒易燃, 施工难度高, 材料强度差
聚氯乙烯	吸水率低, 价格便宜	低温下发泡率低, 成型板材平整度低
聚氨酯	热阻大, 综合性能较好	价格高, 低温下发泡率低
真空绝热	导热系数低, 环保	价格高, 无法现场切割

板 防潮

由于前置仓在实际使用过程中受到人员进出及库门开关因素的影响,其内部温度波动较为频繁,为评估围护结构在该类环境条件下对建筑内部的影响, Xu等^[10]提出了一种采用频域回归的遗传算法对3R2C建筑围护结构热网络模型参数的优化方法。该模型对于轻质墙体可提供非常高精度的动态传热计算,研究可用于计算前置仓围护结构的动态传热量。Tian等^[11]采用半经验公式计算库门处的渗风量,提出了一种简化的3R2C模型。得出冷库内部负荷增减与存储货物之间的函数关系,模型在输入内外环境数值和货物参数的条件下可准确预估大型冷库的实际能耗。

前置仓实际建设过程中在满足保温性能的同时,还需考虑建设及后续维护成本。Mohammad等^[12]以约旦的四个主要代表城市为对象,给出了考虑节能与投资回收期的参考指标,对比了岩棉、膨胀聚苯乙烯和聚氨酯三种绝热材料的使用对冷库的影响。

正确的运用绝热材料可以有效降低冷库外部热量的渗入,降低制冷系统的负荷。应对突发事件,可适当选择热容较大的保温材料以降低冷库温度波动的幅值。针对不同地区的气候条件,前置仓的建设应在满足围护结构性能要求的前提下,考虑初投资、回收周期、日常消耗等多个因素。

2.2 库内气流影响

冷库内部气流组织根据如送风方式、设备布置、货物堆放的不同,最终会对冷库整体的温度场速度场的分布造成相关影响。在进行前置仓设计的过程中满足货物储存温度的同时还需将温度均匀性,货物表面流速等会对货物品质造成影响的指标也应纳入研究对象。

Liu等^[13]对比了多风机、夹套式送风模式下冷库内部的温度场分布,以果蔬质量损失为评估指标,表明了夹套式送风模式具有最好的温度场分布。赵磊等^[14]验证了冷库采用孔板送风方式的优点,具有降低库内温度波动及空气流速,减少果蔬干耗从而延长保鲜周期的优点。Serap等^[15]使用CFD模拟对比了两种制冷系统的温度分布情况,结果表明相较于常规冷库系统,在天花板上拥有空气分配孔的冷库可使库内的温度和相对湿度分布更加均匀。

张铭等^[16]研究了风机间距、货物间距对冷库内

部温度场的影响, 结果表明按照冷库长度等间距布置风机不一定具有最好的温度均匀性, 货物的间距则需要同时考虑相互间隙以及与墙体的距离。Chourasia 等^[17]通过 CFD 模拟的方式, 研究了冷库内的气流组织、湿度与温度场分布, 为优化盘管及风机的布置、降低蔬果水分损失、提升库内温度均匀性提供了理论依据。

Ulrike^[18]等将未经包装的苹果以箱为单位进行存储, 通过改变冷库内部风机转速研究了货堆间距以及箱内苹果间隙的流速, 结果表明相较于货堆间距, 箱内苹果间隙空气流速随着其靠近上部冷风机及风机转速的提高呈现更大的上升趋势, 该实验为后续研究货物表面空气流速对其质量和传热方面的影响提供了参考, 可用于完善货物存储的质量维护。

上述研究从送风方式、风机布置以及风速影响方面进行了冷库送风的研究, 在建设前置仓时应考虑货物(如蔬菜水果)对于温湿度的敏感性等方面, 选取合适的送风方式、设备布置及货物摆放方式。

2.3 顾客交互下前置仓性能研究

前置仓与顾客交互集中体现在冷柜中货物的取存, 为了保证货物质量多采用封闭式冷柜, 为了解封闭式冷藏柜内部的热现象, Nattawu 等^[19]建立了用于冷藏柜的分区传热模型, 考虑内部货物、空气幕的使用、外部空气的渗入、内部外部的灯光辐射等实际使用环境下的影响因素, 结合实测数据验证了该模型, 其后续研究可为冷柜设备的优化及设计提供理论参考。

封闭式冷柜在开启及关闭过程中所造成的热质交换现象会破坏柜内的稳定温度场从而影响货物的品质。Tommie^[20]等针对德国某超市内顾客与冷柜设备的交互环节, 对冷柜的开门频率和特征进行了量化分析, 收集所得的数据包含冷柜开门的角度、时间和速度, 该类研究可用于制定冷柜设备的规范标准以及用于设计更为节能的冷柜设备。

目前小容积冷柜主要采用 R600a 制冷剂, 而容积较大的冷柜考虑到充注量的问题主要采用 R134a 和 R290 制冷剂, 对制冷温度要求较低的冷冻产品一般使用 R404a 和其他低温制冷剂^[21]。

天然制冷剂是替代市场上非环保制冷剂的方案之一, 其中 CO₂ 制冷系统由于其系统体积小, 工质易获取而受到大量关注, 相关学者^[22]采用双级压

缩的方式降低了 CO₂ 系统压力过高的问题, 表现了其替代传统氟利昂制冷剂单级压缩制冷系统的可行性。

3 前置仓设备经济性研究

前置仓由于靠近居民区, 其选址不可避免会造成较高的地租成本和人工水电成本, 影响前置仓设备的经济性主要体现在初投资和运行费用, 初投资主要集中在围护结构以及制冷设备的投资, 张秋玉^[23]等对小型装配式冷库建立了物理模型, 通过 Matlab 对制冷量及围护结构进行了分析, 研究得出, 制冷系统制冷量配置需限制在一定范围内, 对于围护结构, 从经济性角度考虑, 应根据冷库使用时间选择相应方案, 对使用时间较短的临时性冷库, 保温层厚度按推荐值; 冷库使用时间较长时, 建议在推荐值的基础上增加保温层厚度。

针对于前置仓设备, 降低能耗可从制冷系统及新型节能技术着手: 采用高效换热器、变频压缩机并对系统参数进行优化; 使用新型制冷剂在无改动或较小程度的变动下达到环保节能的目的; 蓄冷技术的运用可以降低系统运行成本^[24], 为系统提供持续稳定的冷量^[25]; 此外如地埋管^[26]、热回收^[27]等技术可根据实际冷库选址进行区域化的调整。

对于运营费用, 运营者可从规范前置仓人员操作、降低设备运营费用、减少货物销售过程中产生的浪费等方面着手。

3.1 货物进出操作

相较店仓一体类的大型前置仓, 纯仓储类的社区小型前置仓店面规模普遍较小, 更容易受到外部热量渗入及内部人员操作的影响, 其中由于产品进出仓库所造成的内外空气交换是造成前置仓库温波动的主要原因之一。

现有前置仓装配式冷库主要采用铰链门作为库门, 在实际的使用过程中快速的开关操作会造成外部热空气的渗入。Rui 等^[28]对比了铰链门和滑动门在开闭过程中由于外部空气渗入对冷库所造成的影响, 结果表明采用滑动门可以有效减少由于开关门操作所引起的室内外质量交换, 有利于降低库内温度。张川等^[29]以餐厅室内装配式冷库为对象, 分别采用电加热化霜的定频冷凝机组和热气融霜的变频冷凝机组两套系统, 研究了不同开门频率对冷库内部温度分布、货物温度分布和系统耗电量的

影响。结果表明变频机组和热气融霜有利于稳定库内温度波动及货物温度。上述两项研究为改进及建设前置仓提供了相关依据,同时使用空气幕及幕帘设备也可有效减少外部热空气的渗入。

货物的进仓操作不仅会对库内温度有一定干扰,同时也会对库内货物造成影响,冯坤旋等^[30]针对这一问题研究了在非满仓情况下进仓货物的温度及进货量对库内货物的影响,在此基础上给出了采用多批次少量进行进货的建议。同时相关研究还表明利用夜晚平均温度较低的特点进行货物的装卸工作可有效减少能源消耗,降低前置仓运行成本^[31]。

3.2 除霜作业

对于整个制冷系统而言,蒸发器的霜层会增加热阻,导致系统功耗升高、增加压缩机的负荷,导致前置仓运营成本上升,因此从节能及保证设备正确运行的方面考虑,必须及时地对蒸发器进行除霜工作,同时尽可能地减少对冷库环境的影响。

冷库常用的除霜方式^[32]有人工扫霜、乙二醇化霜、水融霜、电加热除霜、热气融霜。电加热除霜系统简单、操作方便是目前的主要除霜手段,但这一方法耗电量较大、且除霜过程中会对小型冷库内的温度造成较大影响;其中热气融霜利用压缩机排出的高温制冷剂进行除霜,除霜速度快且加热蒸发器均匀,可以有效降低除霜过程的能耗、节省部分电能,除了会增加系统初投资外,是较为经济的一种除霜手段。

通过采用优化除霜功能的设备^[33]或结合蓄冷技术^[34]可进一步减少除霜过程中的库温波动,完善除霜作业,以此保证冷藏冷冻产品的品质。

3.3 货物包装

货物包装在物流环节中起到了保护及储存的重要作用,据相关研究^[35],食品会因包装材料以及包装形式的不同对贮藏期间的品质产生较大的影响,从而使货物的可存储时间延长或减短。

目前前置仓配送主要采用塑料为主要包装材料,随着相关政策的颁布及环保意识的提高,寻找替代的包装材料也成为问题之一。为解决环保问题,新型的食品包装材料包括复合包装材料、可食性包装材料、可降解包装材料、纳米复合材料^[36]也相继出现。因此前置仓在进行存储及配送中所使用的包装在满足食品安全要求的同时综合考虑包装消耗、

回收处理、环保等多方面因素,以降低运营成本。

4 结论

疫情的爆发以及我国对于冷链物流需求的确认,使得前置仓再次成为了物流行业发展的关注点,随着冷链产业链不断完善,前置仓模式几乎是终端存储的必然选择。

从冷库和冷柜设备相关新型技术来看,各类环保节能、高效安全的技术不断涌现,如无人化等技术的应用将随着前置仓的不断升级而投入使用,但相关的具体研究仍旧缺少,设备的提升改进仍有较大的空间,在企业快速铺设前置仓站点的同时,也可尝试采用新型技术进行试点。从运营管理方面来看,服务与成本之间的矛盾问题仍待解决。相信随着行业的不断发展及相关规范的制定及改进,前置仓将会拥有良好的发展和应用前景。

参考文献:

- [1] 艾媒新零售产业研究中心.2020年中国后“疫”时代生鲜电商运行大数据及发展前景研究报告[EB/OL]. <https://report.iimedia.cn/repo10/39027.html?acPlatCode=iimedia&acFrom=1061bottom>, 2020-03-20.
- [2] 陈镜羽,黄辉.我国生鲜农产品电子商务冷链物流现状与发展研究[J].科技管理研究,2015,35(6):179-183.
- [3] 中物联冷链委.后疫情时代冷链物流怎么嬗变?[N].中国水运报,2020-04-24(007).
- [4] 檀霖可.我国冷链物流发展现状与对策研究[J].物流技术与应用,2018,23(S1):62-64.
- [5] 赵举,朱洪亮,许敬能,等.建立冷链物流前置仓团体标准的思考[J].上海节能,2019,(9):724-726.
- [6] 王艳.供应链视角下的前置仓研究[J].物流技术与应用,2019,24(10):188-190.
- [7] 徐若权,钟国辉,吴伟,等.冷藏车用双温区制冷系统运行特性及温控优化的试验研究[J].制冷与空调,2019,19(4):42-46.
- [8] 李曾婷.深挖细分领域,冷柜行业迎来“蜕变”[J].电器,2020,(2):30-31.
- [9] 钱芳,李瑛,方杰.冷库的节能技术及措施[J].能源研究与信息,2015,31(1):23-27.
- [10] Xu X H, Wang S W. Optimal simplified thermal models of building envelope based on frequency domain regression using genetic algorithm[J]. Energy &

- Buildings, 2006,39(5):525-536.
- [11] Tian S, Shao S Q, Liu B. Investigation on transient energy consumption of cold storages: Modeling and a case study[J]. Energy, 2019,180:1-9.
- [12] Mohammad A B, Abdullah A M, Saleh E R, et al. A study on optimum insulation thickness of cold storage walls in all climate zones of Jordan[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019,15:100538.
- [13] Liu Bin, Yang Zhao, Sheng J, et al. Study on Airflow Field in Mini-Cold Storage[C]. Chinese Association of Refrigeration, Beijing Association of Refrigeration. Proceedings of the 2~(nd) Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning ACRA2004, 2004: 157-161.
- [14] 赵磊, 范凯. 孔板送风——冷藏保鲜中的新型送风方式[J]. 船舶, 2015,26(3):80-86.
- [15] Serap A, Serhat O, Firat O E, et al. CFD Modelling of Two Different Cold Stores Ambient Factors[J]. Elsevier B.V., 2013,5:28-40.
- [16] 张铭, 艾宇, 张少杰, 等. 冷库不同布置方案对冷库温度均匀性的影响[J]. 江苏农业科学, 2020,48(2):210-221.
- [17] Chourasia M K, Goswami T K. Steady state CFD modeling of airflow, heat transfer and moisture loss in a commercial potato cold store[J]. International Journal of Refrigeration, 2006,30(4):672-689.
- [18] Ulrike P, Reiner J, Marc S, et al. Airflow distribution in an apple storage room[J]. Elsevier Ltd, 2020,269: 109746.
- [19] Nattawut C, Onrawee L, Denis F. A simplified heat transfer model of a closed refrigerated display cabinet[J]. Elsevier Ltd, 2020,17:100494.
- [20] Tommie M, Adones R, Magnus A, et al. Analysis of door openings of refrigerated display cabinets in an operational supermarket[J]. Journal of Building Engineering, 2019,26:100899.
- [21] 张缓缓, 姚亮. 冷柜产品技术发展前景及质量安全风险分析[J]. 中国设备工程, 2020,(2):243-244.
- [22] 刘业凤, 钟文轩, 孟德忍. CO₂ 双级压缩制冷循环冷藏柜性能实验研究[J]. 轻工机械, 2019,37(4):84-87.
- [23] 张秋玉, 臧润清. 小型果蔬装配式冷库工作时间系数与能效评价分析[J]. 制冷学报, 2018,39(1):121-126.
- [24] Li X P, Li J, Zhou G H, et al. Quantitative analysis of passive seasonal cold storage with a two-phase closed thermosyphon[J]. Applied Energy, 2020,260:114250.
- [25] Yan G, Liu Y, Qian S X, et al. Theoretical study on a vapor compression refrigeration system with cold storage for freezer applications[J]. Elsevier Ltd, 2019, 160:114091.
- [26] Wu D X, Shen J, Tian S, et al. Experimental study of temperature characteristic and energy consumption of a large-scale cold storage with buried pipe cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,140:51-61.
- [27] Georgios M, Emilio J S E, Salvador A, et al. CO₂ refrigeration system heat recovery and thermal storage modelling for space heating provision in supermarkets: An integrated approach[J]. Applied Energy, 2020,264: 114722.
- [28] Rui C, Gaspar P D, Silva P D. 3D and transient numerical modelling of door opening and closing processes and its influence on thermal performance of cold rooms[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,113: 586-600.
- [29] 张川, 司春强. 开门频率对餐厅用室内装配式冷库温度及能耗影响[J]. 冷藏技术, 2019,42(3):28-33.
- [30] 冯坤旋, 南晓红, 杨巧银, 等. 果蔬冷库进货期间货物温度稳定性的影响因素[J]. 农业工程学报, 2015,31(20): 294-300.
- [31] Emilio J S E, Víctor S F, Jose M P O. Comparison of annual cooling energy demand between conventional and inflatable dock door shelters for refrigerated and frozen food warehouses[J]. Elsevier Ltd, 2020,15: 100386.
- [32] 周会芳, 臧润清. 除霜方法的研究及其进展[J]. 低温与超导, 2019,47(12):78-84.
- [33] 许忠义, 李振铭, 陈美岭, 等. 新型热除霜型蒸发器在引发剂冷库中的应用[J]. 盐科学与化工, 2019,48(9):46-48.
- [34] 邵阳, 刘清江, 宋瑞亭, 等. 顶置蓄冷板减少融霜热对冷库温度场的试验研究[J]. 流体机械, 2020,48(3):68-72,78.
- [35] 王凯利, 马健, 王登科, 等. 不同包装材料和包装形式对食品储藏特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018,39(5):58-62.
- [36] 刘霞, 刘升, 包建强, 等. 不同预冷方法、包装方式、规格和贮藏对甜玉米品质的影响[J]. 制冷学报, 2011,32(5):67-70.