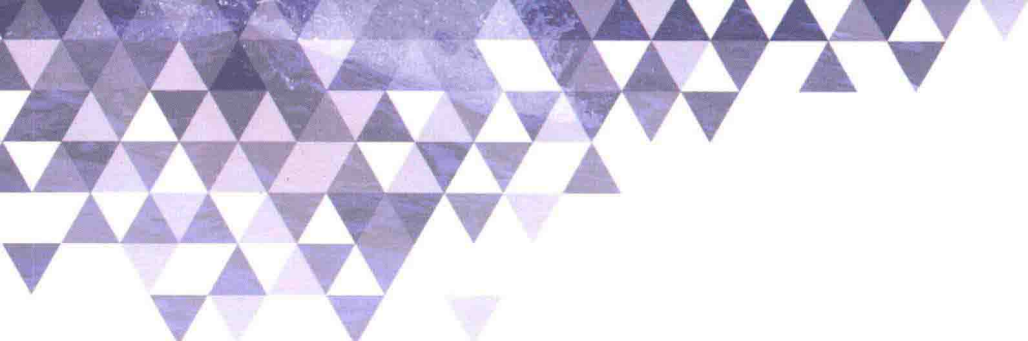




冷链库存优化与定价研究

LENGLIAN KUCUN YOUHUA
YU DINGJIA YANJIU

王淑云 姜樱梅 王宪杰 / 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press





冷链库存优化与定价研究

LEGLIAN KUCUN YOUHUA
YU DINGJIA YANJIU

王淑云 姜樱梅 王宪杰 / 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

冷链库存优化与定价研究/王淑云, 姜樱梅, 王宪杰著. —北京: 经济科学出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-5141-8389-4

I. ①冷… II. ①王… ②姜… ③王… III. ①冷冻食品-库存-研究 IV. ①F253

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 213995 号

责任编辑: 王柳松

责任校对: 王肖楠

责任印制: 邱 天

冷链库存优化与定价研究

王淑云 姜樱梅 王宪杰 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编辑部电话: 010-88191217 发行部电话: 010-88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

固安华明印业有限公司印装

710×1000 16 开 14.75 印张 240000 字

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5141-8389-4 定价: 49.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010-88191510)

(版权所有 翻印必究 举报电话: 010-88191586)

序

中国是农业生产和农产品消费大国，目前蔬菜产量约占全球总产量的60%，水果和肉类产量占30%，禽蛋和水产品产量占40%。近年来，中国生鲜农产品产量快速增加，每年约有4亿吨生鲜农产品进入流通领域，冷链物流比例逐步提高。据中国冷链产业网的数据，目前中国果蔬、肉类、水产品的冷链流通率分别达到22%、34%、41%，冷藏运输率分别为35%、57%、69%。但与欧洲、美国、加拿大、日本等发达国家相比，仍存在较大差距。在欧美等发达国家肉禽冷链流通率已经达到100%，蔬菜、水果冷链流通率也达95%以上，冷链损耗率约为5%，而中国的损耗率高达20%~30%。据第6次中国物流供给状况调查，中国的冷链物流大部分由生产商和经销商完成，第三方冷链物流仅占5%。除一些大型企业集团外，其他中小企业一般难以达到国际冷链标准要求。规模弱小，缺少组织和协调，无法保证整个供应链低温控制，断链严重。

在冷链库存的理论研究中，主要集中在生产商和零售商为主的两级库存系统，缺乏以配送中心为中枢的三级冷链库存系统。农产品冷链配送中心向上衔接生产企业或加工企业，向下沟通连锁超市、饮食店和经销商等终端客户，作为连接生产者和消费者的专业化中介，显然更利于满足大规模的农产品流通，而且易于提高流通效率和效益。

该书是基于国家自然科学基金项目的阶段性成果，凝聚了作者多年研究心血和研究成果，系统地对以 DC 为中枢的冷链库存策略与定价优化进行了研究，大部分章节的研究内容已发表在国家自然科学基金管理学部认定的 A 类刊物或国际刊物上，为冷链零售商、配送中心的采购管理以及生产企业库存的优化分配和控制及其供应链的定价研究提供了很好的理论依据。丰富与充实了适合中国经济建设特征与国情的冷链物流运作管理的理论，创新性突出，主要体现在以下四个方面：

本书在研究冷链库存策略与定价优化中：

一是引入了配送中心的概念，弥补了配送中心库存控制的研究缺陷。研究中以专业化的配送中心为枢纽，将多个生产商和零售商有机地连接在一起，系统地分析论证了基于配送中心的集中采购、集中运输配送的三级冷链库存优化策略。从常数变质率入手，再到时变变质率以及随机变质率，由浅入深。需求率亦是从事变需求到随机需求，不断贴近生产运作实践。

二是研究中以系统利润最大化为目标函数，而不是以成本最小化为目标函数。由于冷链库存具有增值性，加之专业的配送中心更加强调增值服务，因此，从利润最大化的视角进行供应链的整体优化，更有助于分析关键因素对于系统利润的影响及其影响程度。

三是引入了价格弹性的概念。冷链需求率不仅受新鲜度和变质率影响，也会受到定价影响。书中对冷链品补货定价策略的研究，进一步体现了冷链品的易腐特性。

四是在研究中，充分考虑了冷链品的生存死亡特征，特别加强了对非即刻变质商品的库存策略研究，对冷链库存的管理和控制具有重要的经济意义。

综上所述，基于冷链物流运营系统的特殊性，同时考虑影响因素的随机性，对零售商联合采购优化模型、DC 库存控制策略、冷链品的定

价策略进行的数学描述、建模与求解研究不仅贴近实际，而且可以为中国冷链相关企业提供切实可行的理论和方法指导。所有这些对于解决中国冷链农产品的生产、销售及第三方冷链物流等企业所面临的运作成本高、浪费严重、反应迟缓等迫切问题，具有重要的理论意义和实践应用价值。

中国工程院院士 温俊峰

2017年6月

前言

随着生活水平的提高和安全意识的觉醒，人们对冷链品的需求日益旺盛，带来了冷链物流的发展。2008~2014年，中国冷库储存容量复合增长率为35%，2015年，冷链市场规模达1583亿元，预计到2020年冷链将达到3479亿市场规模，复合增长率为17.1%。据预测，药品、生鲜品物流将是今后业务增长的主要方向。

冷链物流，亦称低温物流。由于冷链农产品易腐变质且保质期短，因此物流过程必须对温度加以监控。要保障产品品质，就必须从产地收购、加工、贮藏、运输、销售，直到消费的各个环节都处于适当的低温环境之中，防止变质、污染和减少损耗。从2004年开始，每年的中央“一号文件”都对农副产品物流和食品安全给予了高度关注，2017年中央“一号文件”明确提出要积极发展以鲜活农产品冷藏和低温仓储、运输为主的冷链物流系统。^①2009年，国务院提出的《物流业调整和振兴规划》，将农产品冷链物流列为重点推动发展领域之一。^②2010年，中华人民共和国国家发展和改革委员会发布了《农产品冷链物流发展规

① 中共中央 国务院关于积极发展现代农业扎实推进社会主义新农村建设的若干意见。见新华网。http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/szyw/200701/29/t20070129_10247140.shtml.

② 国务院关于印发物流业调整和振兴规划的通知。http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/200904/t20090424_498142.html.

划》。^① 2017 年,国务院办公厅《关于加快发展冷链物流保障食品安全促进消费升级的意见》中指出,到 2020 年,初步形成布局合理、覆盖广泛、衔接顺畅的冷链基础设施网络,基本建立“全程温控、标准健全、绿色安全、应用广泛”的冷链物流服务体系,培育一批具有核心竞争力、综合服务能力强的冷链物流企业,冷链物流信息化、标准化水平大幅提升,普遍实现冷链服务全程可视、可追溯,生鲜农产品和易腐食品冷链流通率、冷藏运输率显著提高,腐损率明显降低,食品质量安全得到有效保障。^②

尽管国家对农产品冷链物流高度重视,使其得到了长足发展,但其运营实践仍存在不少问题,并急需解决:一是农产品冷链库存管理主要由生产商和经销商主导,不仅成本和损耗高,而且市场反应迟缓,竞争力低。二是以配送中心(DC)为中枢的冷链库存管理及配送既能满足农产品大规模流通,又易于实现市场的快速反应。然而,有关配送中心的研究更多地集中于配送中心的选址、作业流程优化以及车辆路径选择等方面,而对配送中心库存控制的研究相对较少。极少文献以专业化的配送中心为枢纽,将多个生产商和零售商有机连接在一起,研究集中采购、运输配送下的供应链库存优化。

随着供应链整体优化由理论到实践的发展,越来越多的企业意识到整体利益最大化策略的重要性,传统三级体系中的分销商已无法满足拓展冷链利润源泉的需要,急需向流通性强的专业配送中心转变。配送中心既可以在满足供应链整体优化的同时增加其利润来源,又可以更好地满足消费者需求,促进冷链品的销售。

因此,中国冷链物流摒弃传统的运作模式,实施以 DC 为中枢的冷

① 国家发展和改革委员会关于印发农产品冷链物流发展规划的通知, http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201007/t20100730_585473.html.

② 国务院办公厅关于加快发展冷链物流保障食品安全促进消费升级的意见, http://news.xinhuanet.com/2017-04/21/c_1120853017.htm.

链库存策略势在必行。所有这些，亟待理论界和学术界加强冷链物流理论及其运作管理的研究，以期更好地实现冷链物流的低碳节能、冷链品的保质保值，并推动中国冷链行业取得又好又快的发展。

本书是基于国家自然科学基金面上项目“以DC为中枢的农产品冷链库存策略与多温共配优化研究”(No. 71372122)和国家自然科学基金面上项目“补偿机制下农产品冷链多级库存系统的协调与优化研究”(No. 71672166)的阶段研究成果，整合已发表库存研究的相关论文，并追踪最新研究前沿撰写而成的成果。

本书主要由王淑云、姜樱梅、王宪杰撰写而成。陈静参与了第2章的部分文献梳理工作和第4章的建模工作，刘朋辉参与了第九章的建模工作，黄佳伟参与了第10章和第11章的建模工作。

本书由浅入深、步步紧扣、系统性强。既包含冷链库存补货策略，又包含了冷链品的定价策略和优化，不仅体现了较高的理论性，也体现了实践指导性。

本书不仅可以为冷链物流的研究者提供理论借鉴，也可以为冷链物流的实践者提供应用指导。

由于作者的水平有限，错误在所难免，请读者批评指正。

作者

2017年6月5日

第1章 绪论 / 1

- 1.1 研究背景及研究的必要性 / 1
- 1.2 研究意义 / 7
- 1.3 篇章结构 / 7

第2章 冷链库存建模发展研究 / 14

- 2.1 单级库存策略研究 / 14
- 2.2 供应链库存策略研究 / 24
- 2.3 现有研究评析 / 27
- 2.4 冷链库存研究展望 / 30
- 2.5 本章小结 / 31

第3章 以配送中心为中枢的三级冷链运作的理论基础 / 41

- 3.1 核心能力理论及解释 / 41
- 3.2 多级库存一体化 / 44
- 3.3 变质率刻画现实贴近性 / 51
- 3.4 本章小结 / 54

第4章 一个生产商、一个分销商和多个零售商的冷链系统一体化库存模型 / 57

- 4.1 问题描述 / 58

4.2 模型符号与假设 / 58

4.3 数学模型 / 61

4.4 模型求解的步骤 / 66

4.5 算例 / 66

4.6 本章小结 / 74

第5章 变质率为常数的一个生产商、多个分销商、多个零售商的一体化库存模型 / 76

5.1 模型假设 / 78

5.2 数学模型 / 81

5.3 模型求解 / 86

5.4 算例及分析 / 86

5.5 利润分配机制 / 90

5.6 本章小结 / 92

第6章 变质率为 Weibull 分布的一个生产商、多个分销商、多个零售商的一体化库存模型 / 95

6.1 问题描述 / 97

6.2 模型假设及参数 / 98

6.3 模型构建 / 100

6.4 算例及分析 / 107

6.5 本章小结 / 112

第7章 变质率为 Weibull 分布的基于 DC 的三级冷链一体化库存模型 / 116

7.1 模型系统描述 / 119

7.2 基本模型 / 122

7.3 模型算例分析 / 130

7.4 无 DC 运作的两级冷链库存系统对比分析 / 133

7.5 本章小结 / 135

第 8 章 具有随机需求的基于 DC 的三级冷链一体化库存模型 / 138

- 8.1 问题描述 / 140
- 8.2 模型假设及参数 / 141
- 8.3 模型构建 / 143
- 8.4 算例及分析 / 155
- 8.5 本章小结 / 159

第 9 章 具有连续随机需求且受售价影响的库存补货定价模型 / 162

- 9.1 问题描述 / 163
- 9.2 数学模型及求解 / 166
- 9.3 算例及其分析 / 172
- 9.4 本章小结 / 175

第 10 章 需求率为变质率和价格函数的生鲜品订购和价格弹性 / 179

- 10.1 问题描述 / 180
- 10.2 数学模型 / 182
- 10.3 模型求解 / 185
- 10.4 算例仿真 / 188
- 10.5 本章小结 / 190

第 11 章 基于安全库存系数的一体化冷链库存价格协调 / 194

- 11.1 问题描述 / 196
- 11.2 问题假设 / 197
- 11.3 数学模型的建立与求解 / 198
- 11.4 算例分析 / 202
- 11.5 本章小结 / 208

第 12 章 总结与展望 / 211

- 12.1 研究总结 / 211
- 12.2 研究展望 / 215

后记 / 223

第 1 章

绪论

1.1 研究背景及研究的必要性

中国是农业生产和农产品消费大国，目前蔬菜产量约占全球总产量的 60%，水果和肉类产量占全球总产量的 30%，禽蛋和水产品产量占全球总产量的 40%。近年来，中国生鲜农产品产量快速增加，每年约有 4 亿吨生鲜农产品进入流通领域，冷链物流比例逐步提高，但流通率、运输率和冷库容量等仍然偏低。欧盟、美国、加拿大、日本等发达国家和地区肉禽冷链流通率已经达到 100%，蔬菜、水果冷链流通率也达到 95% 以上。中国冷链物流发展报告显示，中国冷冻产品损坏率达 20% ~ 30%，每年水果及蔬菜腐烂数量分别约为 1200 万吨及 1.3 亿吨，总值在 100 亿美元左右，而在欧美等发达国家，损坏率不足 5%。另外，中国各类冷库的结构比例不平衡，大型生产冷库较多，小型零售冷库较少，肉类冷库比蔬果冷库多。因此，冷链品的运输和仓储成为制约中国冷链物流发展的关键因素。^[1]

冷链物流泛指，冷藏冷冻类物品在生产、储存、运输、再加工以及销售的全过程中始终处于规定的低温环境下，以保证物品质量和性能的系统工程，它是以保持低温环境为核心要求的供应链系统，是随着科技进步以及制冷技术的快速发展而发展起来的，是以冷冻工艺学为基础、以制冷技术为手段的低温物流过程。^[2]水产品、蔬菜、水果、花卉、肉类、禽类、蛋类等都属于冷链物流的范畴；肉、速冻产品、水产品等即食商品、冷饮和奶类这些种类的加工产品以及日常生活中常用的医药制

品也属于冷链物流范畴。冷链物流是为了确保易腐商品、易烂商品的品质保持良好，所以，供应链系统应在低温环境下进行。同时，物流运作中，各个环节要做到有机协调，形成完整的链条，既为客户提供无缝隙服务，又有效地控制运作成本，减少能耗和污染。

冷链产品依据温度范围，以食品为例，包含了多种温度产品：热食（60℃以上）、常温品（一般环境温度）、鲜食（恒温 18℃）、冷藏品（0℃ ~ +7℃）、冰温品（-2℃ ~ +2℃）、冷冻品及冰品（-18℃以下保存）、超低温品（-30℃以下保存）等七大类，如表 1.1 所示。^[3]

表 1.1 食品温层分类

细分类	温度	相关产品	简化分类
热食品	60℃ 以上	包子、美味小吃等	热食
常温品	一般环境温度	一般食品	常温
鲜食品	恒温 18℃	便当、三明治、饭团、凉面、巧克力等	鲜食
冷藏品	0℃ ~ +7℃	保存生鲜蔬菜（叶菜类）、果汁、牛乳、饮料、日配品（豆腐、乳制品）、加工肉类（香肠）、鲜花等	冷藏
冰温品	-2℃ ~ +2℃	畜肉品（牛肉、猪肉、羊肉）、禽肉品（鸡肉、鸭肉）、水产品（鲜鱼、贝）、刨冰等	
冷冻品及冰品	-18℃ 以下	冷冻蔬果、冷冻调理食品（水饺、包子、比萨、冰淇淋等）	冷冻
超低温品	-30℃ 以下	生鱼片等	

为了简便起见，把冷链品分为两类，冷藏品和冷冻品。

一是冷藏产品。依据《中华人民共和国食品安全法》的相关规定，从 7℃ 以下至冻结点以上温度带之内的生鲜农畜水产品、乳油制品、畜肉加工品、农产加工品、水产加工品、调理点心菜肴、凝胶产品及甜点等，为确保新鲜度及质量，必须要在规定温度带内制造、储运及贩卖。^①

二是冷冻产品。冷冻产品的中心温度必须保持在 -18℃ 以下，将产品内所含水分中的 93% 以上冻结成冰，以减少产品因时间而产生腐坏、

① 食品安全法修订，见新华网，http://news.xinhuanet.com/legal/2016-01/04/c_128593406.htm。

劣化情形,因此,冷冻产品的保存期限可长达半年多,而不用添加任何防腐剂。所以,凡是经过一定的加工处理(前处理),再使用专用冷冻设备急速冷冻且保持冻结状态(-18°C)的包装产品,称之为“冷冻产品”。冷冻产品的构成需包含以下四大要件:①经过前处理;②急速冷冻;③维持在 -18°C 以下的温度;④妥善完整的包装。而根据原料的不同类别,冷冻产品还可以区分为冷冻水产类、冷冻肉类产品、冷冻蔬果类、冷冻调理产品及其他类。

我们把鲜食品和冰温品都称为冷藏品,冷冻品及冰品、超低温品都称为冷冻品,但在配送中还包括常温品,即在一般环境温度条件下就可运输、配送的产品。

虽然冷链物流具有物流的一般性,但更具有自身的特殊性。玛丽亚、卢德维克和罗伯特(Marija, Ludvik & Robert, 2005)^[4]认为,冷链管理(CCM)就是在全球范围内,为了满足顾客的需求,对易腐食品和服务信息从厂商到配送到消费者的流通中实施有效地计划、执行和控制的过程。冷链应遵循“3T”原则:即时间(time)、温度(temperature)、耐藏性的容许限度(tolerance)。时间和距离的增加会带来温度的变化,温度的变化能引起产品品质降低,进而带来不可逆性。

通常, Q10 系数被用于不同温度条件下的货架寿命(Kitinoja, 2013)。^[5]根据 PEF 白皮书,在发展中国家食品保管期与 Q10 不同间隔之间的关系,如表 1.2 所示。

表 1.2 发展中国家食品保管期与 Q10 不同间隔之间的关系

食品类别	储存潜力			
	最佳温度条件 +30℃	最佳温度条件	最佳温度条件 +10℃	最佳温度条件 +20℃
鲜鱼	0℃, 可保管 10 天	10℃, 4~5 天	20℃, 1~2 天	30℃, 几个小时
牛奶	0℃, 2 周	10℃, 7 天	20℃, 2~3 天	30℃, 几个小时
鲜绿色蔬菜	0℃, 1 个月	10℃, 2 周	20℃, 1 周	30℃, 低于 2 天
土豆	12℃, 5~10 个月	22℃, 低于 2 个月	32℃, 低于 1 个月	42℃, 低于 2 周
芒果	13℃, 2~3 周	23℃, 1 周	33℃, 4 天	43℃, 2 天
苹果	-1℃, 3~6 个月	10℃, 2 个月	20℃, 1 个月	30°, 几周

资料来源: Kitinoja L. Use of cold chains for reducing food losses in developing countries. Population, 2013, 6 (12): 5-60.

从表 1.2 中可以发现,随着温度的升高,储存潜力大大降低,这势必会导致品质下降和寿命周期缩短,并依次带来产品损失。任何一个环节没有得到很好地控制,或者供应链环节处于断链之中就会导致温度升高进而引致产品腐坏。

由于冷链农产品易腐变质且保质期短,因此,物流过程必须对温度加以监控。要保障产品品质,就必须从产地收购、加工、贮藏、运输、销售直到消费的各个环节都处于适当的低温环境之中,防止变质、污染和减少损耗。

从 2004 年开始,每年的中央“一号文件”都对农副产品物流和食品安全给予了高度关注。2005 年,建成了贯穿 31 个省、自治区、直辖市的低成本鲜活农产品运输网络——“绿色通道”;2006 年,国家发展和改革委员会、科技部、农业部联合发布的《全国食品工业“十一五”发展纲要》提出:“在现代物流技术方面,重点攻克数字化和信息化处理技术、数字化存储与智能配送技术、智能分级技术、快速预冷技术与冷链技术、综合保鲜技术等”;^①2007 年,中央“一号文件”明确要求,切实落实鲜活农产品运输“绿色通道”政策,积极发展以鲜活农产品冷藏和低温仓储、运输为主的冷链物流系统。^②2008 年 1 月,国务院办公厅颁布《国务院办公厅关于进一步加强鲜活农产品运输和销售工作的通知》,要求进一步加强鲜活农产品的运输和销售,保障春节市场供应和价格稳定。^③2009 年,国务院提出的《物流业调整和振兴规划》,将农产品冷链物流列为重点推动发展领域之一。^④2010 年,国家发展和改革委员会发布的《农产品冷链物流发展规划》中明确提出,到 2015 年,建成一批运转高效、规模化、现代化的跨区域冷链物流配送中心,

① 关于印发全国食品工业“十一五”发展纲要的通知, http://gys.ndrc.gov.cn/gylz/200610/t20061027_793809.html.

② 中共中央 国务院关于积极发展现代农业扎实推进社会主义新农村建设的若干意见. 见新华网, http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/szyw/200701/29/t20070129_10247140.shtml.

③ 国务院办公厅关于进一步加强鲜活农产品运输和销售工作的通知, http://www.gov.cn/zhengce/content/2008-03/28/content_2895.htm.

④ 国务院关于印发物流业调整和振兴规划的通知, http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/200904/t20090424_498142.html.

培育一批具有较强资源整合能力和国际竞争力的核心企业,冷链物流核心技术将得到广泛推广,并初步建成布局合理、设施装备先进、上下游衔接配套、功能完善、运行管理规范、技术标准体系健全的农产品冷链物流服务体系。^①2017年,国务院办公厅《关于加快发展冷链物流保障食品安全促进消费升级的意见》中指出,到2020年,初步形成布局合理、覆盖广泛、衔接顺畅的冷链基础设施网络,基本建立了“全程温控、标准健全、绿色安全、应用广泛”的冷链物流服务体系,培育一批具有核心竞争力、综合服务能力强的冷链物流企业,冷链物流信息化、标准化水平大幅提升,普遍实现冷链服务全程可视、可追溯,生鲜农产品和易腐食品冷链流通率、冷藏运输率显著提高,腐损率明显降低,食品质量安全得到有效保障。^②

尽管国家对农产品冷链物流高度重视,并得到了长足发展,但其运营实践仍存在不少问题,并急需解决:

第一,农产品冷链库存管理主要由生产商和经销商主导,不仅成本和损耗高,而且市场反应迟缓、竞争力低。^[6]

一是限制了规模效益和核心能力。中国冷链农产品,如蔬菜、水果出口量仅占总产量的1%~2%,且其中80%是初级产品,在国际市场上缺乏竞争力。除了出口外,大部分的农产品冷链库存管理和物流配送业务是由生产商和经销商完成的。随着欧盟、日本、美国等发达国家不断地提高进口农产品准入标准,相关质量、技术和绿色壁垒已经成为制约中国农产品出口的重要障碍,中国急需加快发展专业化农产品冷链物流,既提高出口农产品质量、突破贸易壁垒、增强国际竞争力,又避免非第三方巨额冷链投资的浪费和高昂成本。

二是缺乏完整的冷链链条,断链严重。随着城乡居民消费水平和消费能力的不断提高,居民对农产品的多样化、新鲜度、营养性和安全性等方面提出了更高要求,然而,长期以来,中国的农产品冷冻冷藏供应

① 国家发展改革委关于印发农产品冷链物流发展规划的通知. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201007/t20100730_585473.html.

② 国务院办公厅关于加快发展冷链物流保障食品安全促进消费升级的意见. http://news.xinhuanet.com/2017-04/21/c_1120853017.htm.