

荔枝全程冷链物流碳足迹测算分析及实证研究

廖晶, 谢如鹤, 塘杰, 唐海洋, 罗湖桥, 陈梓博
(广州大学, 广州 510006)

摘要: **目的** 针对系统衡量双渠道流通模式下荔枝全程冷链物流的碳排放问题, 构建一种计算碳足迹模型, 以衡量该过程中的碳排放情况, 并对其展开实证研究。**方法** 采用碳排放系数法、投入产出法, 测算批发商开设的双渠道流通模式的荔枝采后预冷、流通加工、冷藏运输、贮存、配送、销售以及终端消费者等各环节所产生的碳排放量, 并借助 Matlab 对模型进行优化求解, 在设定参数的条件下, 以及考虑碳排放的情况下, 分别以总成本最小和总碳排放量最小进行运算。**结果** 通过实证可知, 总成本均为 407.34 万元, 总碳排放量均为 223.14 t。通过对断链情况下的荔枝双渠道流通模式碳足迹进行对比分析发现, 荔枝在断链的流通模式下的总成本为 453.99 万元, 碳排放量为 225.71 t; 通过对不同包装下的腐烂率进行对比分析发现, 在考虑碳排放情况下, 腐烂率从 0 上升到 30% 时, 碳排放量上升了 4%。**结论** 该模型能有效衡量双渠道流通模式下荔枝全程冷链物流活动的碳足迹, 为荔枝运用全程冷链物流的经济效益和环境效益最大化协同的设计和和实施提供了支撑。

关键词: 双渠道流通模式; 碳足迹; 荔枝; 全程冷链物流; 碳足迹模型

中图分类号: S667.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)03-0019-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.004

Analysis and Empirical Research on the Carbon Footprint Calculation of Litchi in the Whole Cold Chain Logistics

LIAO Jing, XIE Ru-he, TANG Jie, TANG Hai-yang, LUO Hu-qiao, CHEN Zi-bo
(Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to construct a carbon footprint model to measure the carbon emissions in the process, and carry out an empirical study, regarding the problem of systematically measuring the carbon emissions of the whole cold chain logistics of litchi under the dual-channel circulation mode. Carbon emission coefficient method and input-output method were used to calculate the carbon emissions from the postharvest pre-cooling, circulation and processing, refrigerated transportation, storage, distribution, sales and end-users of litchi under the dual-channel circulation mode set up by wholesalers. With the help of Matlab, the model was optimized and solved. Under the condition of setting parameters and taking into account the carbon emissions, the least total cost and the least total carbon emissions were used for the operation. Based on the empirical evidence, the total cost was 4.0734 million yuan, and the total carbon emissions were 223.14 t. From the comparative analysis on the carbon footprint under the dual-channel circulation mode of litchi in the chain-breaking circumstance, the total cost of litchi under the chain-breaking circulation mode was 4.5399 million yuan and the carbon emission was 225.71 t. Different decay rates under different packages were compared and analyzed. Con-

收稿日期: 2018-09-05

基金项目: 国家社科基金 (17BJY102); 广东省科技计划 (2017B090907028)

作者简介: 廖晶 (1993—), 女, 广州大学硕士生, 主攻冷链物流。

通信作者: 谢如鹤 (1963—), 男, 广州大学教授, 主要研究方向为物流管理与工程。

sidering the carbon emissions, the decay rate increased from 0 to 30%, and the carbon emissions increased by 4%. The model can effectively measure the carbon footprint of the whole cold chain logistics activities of litchi under the dual-channel circulation mode, and provide support for the design and implementation of the maximum coordination of the economic and environmental benefits of the whole cold chain logistics used by litchi.

KEY WORDS: dual-channel circulation mode; carbon footprint; litchi; whole cold chain logistics; carbon footprint model

荔枝是我国南方特色水果之一,其产量占世界总产量 65%~70%^[1-3]。近年来,根据《中国统计年鉴》可知,我国荔枝产量呈波动性上升态势,2010 年为 177 万 t,2016 年已达到 229 万 t,而种植面积基本稳定在 54.99 万 hm²左右。

荔枝是一种非呼吸跃变型水果,如果采后置于常温环境下,它的呼吸速率呈线性增加,水分会损失,果实呈褐色甚至腐烂^[4-7],因此荔枝采收后需低温贮藏。当果实褐变失水后,就会失去了商品性^[8-9]。当前,中国落后的运输方式导致荔枝损失严重,运费占总成本的比例较高,因此加快荔枝冷链物流发展是适应荔枝大规模流通的客观需要。冷链物流是将制冷工业与交通运输相结合,随着基础设施的完善和技术装备数量的增加,能源消耗越来越大,伴随而来的碳排放也日益增多,国内日益重视冷链物流活动的碳排放问题。当前,全球共 39 个国家和 23 个地区实施或计划采用碳定价工具对碳排放市场进行核算。目前,国内外对荔枝冷链物流碳排放的相关研究中,Strutt^[10](2008)利用生命周期评估的方法对水产品的碳足迹进行了评价分析;刘倩晨^[11](2010)利用生命周期评价方法对冷链物流碳排放进行了计算,并以番茄为例对其各环节的碳排放进行了计算;谢如鹤^[12](2013)通过对鲜荔枝在物流和运输全过程进行了品质变化分析,结果表明荔枝在低温条件下通过采取预冷杀菌等措施,极大地减缓了荔枝的褐变进程,并指出,为了延长货架期,销售时也要处于低温环境下;姚漫、汪传旭、许长延^[13](2013)考虑到双渠道交易方式,构建了模型,并通过算例分析验证了其实用性;曹武军、李新艳^[14](2014)考虑到生鲜农产品新鲜度对产品需求的影响,研究分析了生鲜农产品双渠道供应链的协调问题;蔡依平^[15](2015)利用生命周期评估的方法对冷链物流碳足迹进行了计算分析;刘玲、陈淮莉^[16](2015)考虑到各渠道需求的影响因素及消费者行为,构建了基于双渠道联合库存下多周期的生产-销售最大收益模型;汪传旭、李辉^[17](2018)研究了在政府补贴下,碳排放限量情况下的双渠道闭环供应链决策。

上述研究主要对荔枝的发展现状、其他品类农产品碳排放、双渠道供应链交易需求方面进行了研究,未针对目前在双渠道流通模式大背景下对荔枝全程冷链物流活动的碳足迹进行分析。为此,文中在上述研究的基础上提出双渠道模式下荔枝全程冷链物流碳足迹的计算方法,并构建碳足迹模型,以 C 市荔枝

为例,验证碳足迹模型的可行性,并与荔枝断链流通模式下碳足迹进行对比分析。

1 荔枝全程冷链物流各环节碳足迹分析

1.1 荔枝双渠道流通模式

随着生鲜电商的快速发展,鲜荔枝的流通从传统的“荔枝生产商—批发商—零售商—消费者”单项多层次模式,转变为由电商介入的复杂网络结构,并设计了终端配送点的智能存储柜,具体见图 1。

荔枝供应链的双渠道流通模式主要有农产品专业合作社开设的双渠道流通模式、批发市场开设的双渠道流通模式、加工企业开设的双渠道流通模式、零售企业开设的双渠道流通模式。

这里主要研究加工企业开设双渠道的流通模式,见图 2。荔枝加工企业一方面维持自己的销售市场、线下实体零售商的原有合作,通过实体渠道销售鲜荔枝,另一方面建立属于自己公司的电商平台,通过便捷的视频、图片展示,让消费者更加直观地了解荔枝的外观、促销信息及价格,同时通过统一的预冷、分级、包装加工、运输流程,实现将荔枝直达消费者手中。

1.2 荔枝全程冷链物流环节碳足迹分析

荔枝采收后全程冷链物流的主要环节包括预冷、分级、包装、贮存、运输、配送、销售以及出口等^[4-5,18]。

1) 预冷包装。荔枝采收后采用预冷、分级和包装等技术会延缓其品质的劣变。通过预冷可以快速消除果实的田间热,减少呼吸强度,并延缓成熟腐烂的速度。目前,国内常采用的荔枝预冷方法主要有冰水预冷、冷水预冷、强制通风冷库预冷和冷库预冷^[19-20]。文中研究的预冷方式为冰水预冷,其能耗主要为制冰、包装材料生产的能耗。其中,研究的包装材料为聚苯乙烯塑料泡沫箱,该类型的包装箱有较强的承重能力。保温型泡沫箱是目前荔枝流通过程中最常用的包装箱,其箱体一般为 9, 15, 25 kg 等规格,通常结合碎冰或冰袋等蓄冷剂^[21]。

2) 冷藏运输。荔枝主要通过公路、铁路、水路和航空等运输形式进行流通。荔枝保鲜运输的方式主要有泡沫箱加冰袋、碎冰的保温运输,冷藏运输等 2 种方式。文中主要研究公路运输,其能耗主要来源于运输车辆的油消耗。

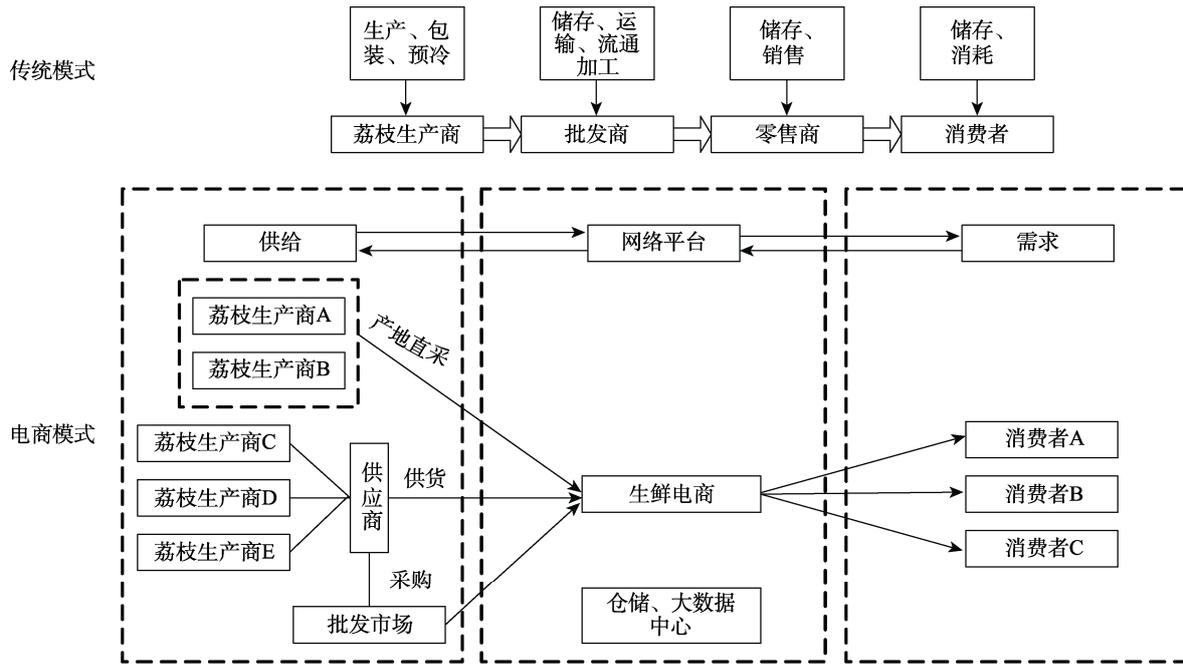


图 1 传统及电商模式下荔枝供应链流通体系对比

Fig.1 Comparison of litchi's supply-chain circulation systems under traditional and E-commerce modes

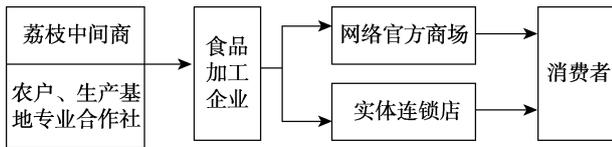


图 2 加工企业开设的双渠道流通模式

Fig.2 Dual-channel circulation mode established by processing enterprises

3) 贮存。荔枝的储存主要采用冷库等制冷设备进行贮存，可以延长荔枝的货架期，该环节中的碳排放来源于荔枝储存期间制冷设备的能耗，即耗电量，以及处理坏果所产生的碳排放。

4) 销售。荔枝的线下销售方式主要包括泡沫箱加冰、冷藏陈列柜、冰台销售以及常温销售等，线上

销售方式主要是由销售商直接配送至消费者家中或者智能存储柜中，文中将对陈列柜销售能耗和常温销售能耗进行对比分析。

5) 消费者消耗。消费者主要通过线上、线下等 2 种购买途径，其中线下购买由消费者从实体店直接带回家里放置冰箱；线上购买，直接配送至消费者家中，放置冰箱中，该环节的碳排放主要来源于冰箱储存的电耗以及处理烂果的碳排放。

1.3 碳足迹计算方法的研究

目前关于碳足迹的计算方法有很多，基本方法有实测法、物料衡算法和排放系数法等，系统方法有投入产出分析法和生命周期法等。文中主要采用投入产出法来测算荔枝全程冷链的碳排放，具体内容见表 1。

表 1 荔枝全程冷链物流环境产出的影响分析

Tab.1 Analysis of the influence of the whole cold chain logistics environment output of litchi

| 关键环节 | 活动要素 | 投入 (能源) | 产出 (对环境的影响) |
|------|-------------------|---------|--------------|
| 流通加工 | 制冰、泡沫箱包装的使用 | 电能、能源等 | 碳排放、能源消耗、烂果等 |
| 冷藏运输 | 运输及制冷设备的运行 | 能源、电能等 | 碳排放、能源消耗、烂果等 |
| 冷藏 | 冷库照明、制冷、装卸搬运设备的运用 | 能源、电能等 | 碳排放、能源消耗、烂果等 |
| 销售 | 销售陈列柜、智能存储柜 | 能源、电能等 | 碳排放、能源消耗、烂果等 |
| 荔枝消耗 | 冰箱、烂果处理 | 能源、电能等 | 碳排放、能源消耗、烂果等 |

2 碳足迹模型构建

2.1 问题描述

随着生鲜电商的发展，荔枝从传统的实体店流通

模式转变为线上、线下双流通模式，荔枝属于典型的易腐生鲜农产品，有“一日变色，二日香变，三日味变，四五日色香味尽失”的特性。近年来，“果贱伤农、果贵伤民”的现象非常多。由于荔枝全程冷链物流活动过程中不同环节的碳排放量不同，因此我国目前对

全程冷链物流活动的管理还不到位。若要对全程冷链物流活动的碳排放量进行测算,还非常困难。针对荔枝现在的双渠道流通模式,对其各个环节的碳排放量进行测算。

2.2 模型假设

假设 1:荔枝的双渠道流通模式均为全程冷链,运输车辆的行驶速度恒定,产品品质、碳排放量与行驶距离、时间有关。

假设 2:荔枝的双渠道流通模式主要为加工企业开设的双渠道流通模式,模式中,客户和消费者的需求都能得到充分的满足。

假设 3:考虑到荔枝具有较强的易腐性,销售期截止时间的荔枝剩余价值为零。荔枝产地、生产量等信息可方便获取,荔枝的市场需求数量明确。

假设 4:腐烂的荔枝采取填埋方式,荔枝冷藏运输过程中车内的温度不变,只考虑流通时间造成的货损成本。

假设 5:模型的目标是在以全程冷链物流流通总成本最小的前提下且碳排放量最小,同时考虑两者。

假设 6:电商流通模式下,最终到达消费者手里前,快递都将荔枝暂存在智能保鲜存储柜中。

2.3 决策变量确定

模型中, $I = \{1 \dots i\}$ 为荔枝生产地 i 的子集合; $J = \{1 \dots j\}$ 为荔枝批发商 j 的子集合; $K = \{1 \dots k\}$ 为荔枝零售商 k 的子集合; $L = \{1 \dots l\}$ 为线上消费群 l 的子集合,也代表智能存储柜的集合;决策变量见表 2。

2.4 模型构建

2.4.1 总成本目标

考虑到荔枝流通加工开设的双渠道流通模式的特点,文中不仅考虑了碳足迹,还考虑了其各环节所产生的成本,而总成本是由荔枝产地到荔枝销地各环节的运输费用、运输成本、流通过程中各环节运营的固定成本以及腐烂荔枝的成本构成,具体如下所述。

1)荔枝批发商在运营过程中的固定成本,用 C_w 表示,计算公式为:

$$C_w = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} C_j Z_j \quad (1)$$

式中: C_i 为荔枝批发商运营的单位成本; Q_{ij} 为荔枝产地 i 运到批发商 j 的量。

2)荔枝包装加工的成本。文中主要指荔枝的预冷包装成本,主要研究冰水预冷模式下的成本,用 C_p 表示,计算公式为:

$$C_p = \sum_{j \in J} H_j Z_j (C_i^j + C_b^j + C_c^j) \quad (2)$$

表 2 决策变量符号说明
Tab.2 Symbolic description of decision variables

| 决策变量 | 说明 |
|--------------|--|
| P_i | 荔枝产地 i 的生产量 |
| P_i^{\max} | 荔枝产地 i 的最大生产量 |
| P_i^{\min} | 荔枝产地 i 的最低生产量 |
| H_j | 荔枝批发商 j 的处理能力 |
| H_j^{\max} | 荔枝批发商 j 的最大处理量 |
| H_j^{\min} | 荔枝批发商 j 的最小处理量 |
| H_l | 智能存储柜 l 的存储量 |
| H_l^{\max} | 智能存储柜 l 的最大处理量 |
| H_l^{\min} | 智能存储柜 l 的最小处理量 |
| Z_j | 0—1 变量,荔枝批发商运营时为 1, 否则为 0 |
| Z_k | 0—1 变量,荔枝零售商运营时为 1, 否则为 0 |
| Z_l | 0—1 变量,智能存储柜运营时为 1, 否则为 0 |
| X_{ij} | 0—1 变量,荔枝生产商 i 行驶到批发商 j , 则值为 1, 否则为 0 |
| X_{jk} | 0—1 变量,荔枝批发商 j 行驶到零售商 k , 则值为 1, 否则为 0 |
| X_{jl} | 0—1 变量,荔枝批发商 j 行驶到智能存储柜 l , 则值为 1, 否则为 0 |
| m_{jk} | 从荔枝批发商 j 到荔枝零售商 k 的冷藏车数量 |
| v_{jk}^m | 冷藏车从荔枝批发商到荔枝零售商行驶的速度 |
| v_{jl}^m | 冷藏车从荔枝批发商到智能存储柜行驶的速度 |
| f | 双渠道流通模式下荔枝全程冷链的成本 |

式中: C_i^j 为批发商 j 购买冰的单位价格; C_b^j 为批发商 j 购买包装材料的单位价格; C_c^j 为批发商 j 购买冰袋的单位价格。

3)冷藏车的固定成本用 C_f 表示,计算公式为:

$$C_f = C_l m \quad (3)$$

式中: C_l 为冷藏车的固定使用费用; m 为批发商拥有的冷藏车数量。

4)荔枝生产地到荔枝批发商的运输费用,用 C_{ij} 表示,计算公式为:

$$C_{ij} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} C_{ij}^T X_{ij} \quad (4)$$

式中: C_{ij}^T 为荔枝产地 i 运输到荔枝批发商 j 的单位运输费用。

5)荔枝批发商到荔枝零售商的运输成本,用 C_{jk} 表示,计算公式为:

$$C_{jk} = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} m_{jk} C_{jk}^T L C X_{jk} \quad (5)$$

式中: m_{ij} 为荔枝批发商 j 到荔枝零售商 k 的的冷藏车数量; C_{jk}^T 荔枝批发商 j 运输到荔枝零售商 k 的单位运输费用。

6) 荔枝批发商到智能储存柜的运输成本, 用 C_{jl} 表示, 计算公式为:

$$C_{jl} = \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} m_{jl} C_{jl}^T LCX_{jl} \quad (6)$$

式中: m_{jl} 为荔枝批发商 j 到智能存储柜 l 的冷藏车数量; C_{jl}^T 荔枝批发商 j 运输到智能存储柜 l 的单位距离运输费用。

7) 荔枝零售商运营固定成本, 用 C_d 表示, 计算公式为:

$$C_d = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_k Q_{jk} Z_k \quad (7)$$

式中: C_k 为荔枝零售商 k 运营的单位成本; Q_{jk} 表示批发商 j 到零售商 k 运输量。

8) 消费者家用冰箱储存成本, 用 C_o 表示, 只与存储时间和储存量有关, 其计算公式为:

$$C_o = \sum_{l \in L} C_x t_l Q_{jl} \quad (8)$$

式中: C_x 为消费者储存单位时间内储存单位荔枝的成本; t_l 为消费者群 l 储存的平均时间; Q_{jl} 为批发商 j 到消费群 l 的量。

9) 智能保鲜存储柜储存成本, 用 C_1 表示, 计算公式为:

$$C_1 = \sum_{l \in L} C_z t_l^i Q_{jl} Z_l \quad (9)$$

式中: C_z 为智能保鲜存储柜 l 单位时间内储存单位荔枝的成本; t_l^i 为智能保鲜存储柜 l 的储存时间。

10) 荔枝腐烂变质的货损成本, 用 C_r 表示, 计算公式为:

$$C_r = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \theta_1 X_{ij} Q_{ij} P_g^{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \theta_2 X_{jk} Q_{jk} P_g^{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \theta_3 X_{jl} Q_{jl} P_g^{jl} \quad (10)$$

式中: P_g^{ij} 为批发商从生产商的采购价格, θ_1 为批发商处理的腐损率, P_g^{jk} 为零售商从批发商的采购价格, θ_2 为零售商处理的腐损率; P_g^{jl} 为消费者从批发商的采购价格; θ_3 为消费者处理的腐损率。

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} C_j Z_j + \sum_{j \in J} H_j Z_j (C_a^j + C_b^j + C_c^j) + \\ & C_l m + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} C_{ij}^T X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} m_{jk} C_{jk}^T LCX_{jk} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} m_{jl} C_{jl}^T LCX_{jl} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_k Q_{jk} Z_k + \sum_{l \in L} C_{xtl} Q_{jl} + \\ & \sum_{l \in L} C_z t_l^i Q_{jl} Z_l + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \theta_1 X_{ij} Q_{ij} P_g^{ij} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \theta_2 X_{jk} Q_{jk} P_g^{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \theta_3 X_{jl} Q_{jl} P_g^{jl} \end{aligned} \quad (11)$$

2.4.2 碳足迹目标

文中研究的荔枝冷链物流碳足迹主要包括流通加工环节、冷藏运输环节、冷藏环节、销售环节、荔枝消耗环节等。

1) 流通加工环节的碳足迹。这里研究的流通加工环节的碳足迹主要是由荔枝批发商组织的预冷、包装所产生的碳足迹, 用 C_3 表示, 具体计算公式如下:

$$C_3 = \sum_{j \in J} C_j^p H_j Z_j \quad (12)$$

式中: C_j^p 为批发商对荔枝进行预冷包装的单位碳排放。

2) 冷藏运输环节碳足迹。这里研究的冷藏运输环节主要包括荔枝生产基地到荔枝批发商环节、荔枝批发商到荔枝零售商环节、荔枝批发商到智能存储柜环节等冷藏运输时的碳排放, 用 C_4 表示, 具体计算公式如下:

$$C_4 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij}^p Q_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} M_{jk}^v m_{jk} X_{jk} D_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} M_{jl}^v m_{jl} D_{jl} X_{jl} \quad (13)$$

式中: C_{ij}^p 为从荔枝生产商 i 运输到荔枝批发商 j 的单位荔枝碳排放量; D_{jk} 为荔枝生产基地 j 到荔枝批发商 k 的距离; M_{jk}^v 为从荔枝批发商 j 到荔枝零售商单位距离使用 v 类型燃料的碳排放量; D_{jl} 为荔枝批发商 j 到智能保鲜存储柜 l 的距离; M_{jl}^v 为从荔枝批发商 j 到智能保鲜存储柜 l 单位距离使用 v 类型的碳排放量。

3) 冷藏环节碳排放碳足迹, 用 C_5 表示, 具体计算公式如下:

$$C_5 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{jn}^p t_{jn} Q_{ij} Z_j \quad (14)$$

式中: C_{jn}^p 为荔枝批发商单位时间内冷藏单位荔枝的碳排放量; t_{jn} 为荔枝批发商冷藏荔枝的时间。

4) 销售环节碳排放。这里所研究的销售环节主要包括荔枝零售商用陈列柜销售时产生的碳排放、智能存储柜暂存时产生的碳排放, 用 C_6 表示, 具体计算公式如下:

$$C_6 = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_k^p t_k Z_k Q_{jk} + \sum_{l \in L} C_l^z t_l^i Z_l H_l \quad (15)$$

式中: C_k^p 为荔枝零售商陈列柜在单位时间内的碳排放量; t_k 为陈列柜销售的时间; C_l^z 为智能存储柜单位时间内的碳排放量; t_l^i 为智能存储柜的存储时间。

5) 荔枝消耗环节碳足迹。这里所研究的消耗环节主要包括消费者家用冰箱储存所产生的碳排放、处理腐烂变质荔枝的碳排放, 用 C_7 表示, 具体计算公

式如下:

$$C_7 = \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} C_{jl}^t Q_{jl} + \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \theta_1 X_{ij} Q_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \theta_2 X_{jk} Q_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \theta_3 X_{jl} Q_{jl} \right) C_r^t \quad (16)$$

式中: C_i^t 为家用冰箱单位时间内储存单位荔枝的碳排放量; C_r^t 为处理单位腐烂变质的荔枝的碳排放量。

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{j \in J} C_j^p H_j Z_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij}^p Q_{ij} X_{ij} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} M_{jk}^v m_{jk} X_{jk} D_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} M_{jl}^v m_{jl} D_{jl} X_{jl} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{jn}^p t_{jn} Q_{ij} Z_j + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_k^p t_k Z_k Q_{jk} + \\ & \sum_{l \in L} C_l^t Z_l H_l + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} C_{jl}^t Q_{jl} + \\ & \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \theta_1 X_{ij} Q_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \theta_2 X_{jk} Q_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \theta_3 X_{jl} Q_{jl} \right) C_r^t \end{aligned} \quad (17)$$

2.5 约束条件

当荔枝处于批发商 j 运营状态时, 由荔枝产地 i 运往荔枝批发商 j 处, 有:

$$X_{ij} \leq Z_j, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (18)$$

荔枝可由不同产地运到不同的荔枝批发商, 因此, 能构建多重运输模型:

$$\sum_i X_{ij} \geq Z_j, \quad \forall j \in J \quad (19)$$

其中, 当荔枝批发商 j 处于运营状态, 荔枝零售商 k 满足市场需求时, 有:

$$X_{jk} \leq Z_j, \quad \forall j \in J, k \in K \quad (20)$$

如从不同的荔枝批发商处配送至荔枝零售商 k 时, 则有:

$$\sum_j X_{jk} \geq 1, \quad \forall k \in K \quad (21)$$

荔枝产地、荔枝批发商、荔枝零售商之间的周转量应在其能力范围之内:

$$Q_{ij}^{\min} \cdot X_{ij} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij}^{\max} \cdot X_{ij}, Q_{ij} \in N, \forall i \in I, j \in J \quad (22)$$

$$Q_{jk}^{\min} \cdot X_{jk} \leq m_{jk} \cdot LC \leq Q_{jk}^{\max} \cdot X_{jk}, \forall j \in J, k \in K \quad (23)$$

若荔枝产地 i 的产量与运量相等, 则荔枝产地库存为 0, 此时有:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, P_i \in N, \forall i \in I \quad (24)$$

$$P_i = \sum_j Q_{ij}, \quad \forall i \in I \quad (25)$$

荔枝批发商库存不大于从荔枝产地运达的量, 能满足荔枝批发市库存需求且不高于自身的库存水平:

$$H_j^{\min} \leq H_j \leq H_j^{\max}, H_j \in N, \forall j \in J \quad (26)$$

$$H_j = \sum_l Q_{jl}, \quad \forall j \in J, \forall l \in L \quad (27)$$

$$\sum_k m_{jk} \cdot LC \leq H_j \cdot Y_j, \quad \forall j \in J \quad (28)$$

荔枝智能存储柜存储量不大于从荔枝批发商运达的量, 能满足消费者需求且不高于自身的储存水平:

$$H_l^{\min} \leq H_l \leq H_l^{\max}, H_l \in N, \forall l \in L \quad (29)$$

$$H_l = \sum_j Q_{jl}, \quad \forall l \in L \quad (30)$$

$$\sum_l m_{jl} \cdot LC \leq H_l \cdot Z_l, \quad \forall l \in L \quad (31)$$

因荔枝在流通过程中存在一定腐烂损失, 为了满足市场的需求, 荔枝的供应量应远远大于市场需求量:

$$\sum_k \sum_l (m_{jk} + m_{jl}) LC \cdot (1 - \theta) \geq H_j, \quad \forall k \in K, \forall l \in L \quad (32)$$

其中, 荔枝流通过程中的腐损率 θ 为:

$$\theta = \left(\sum_j Q_{ij} \theta_1 + \sum_k Q_{jk} \theta_2 + \sum_l Q_{jl} \theta_3 \right) / \sum_j Q_{ij}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L \quad (33)$$

其他约束条件有:

$$Q_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in J;$$

$$m_{jk} \geq 0 \text{ 且 } m_{jk} \in N, \quad \forall j \in J, k \in K;$$

$$m_{jl} \geq 0 \text{ 且 } m_{jl} \in N, \quad \forall j \in J, l \in L;$$

$$\sum_{i,j} Q_{ij} (1 - \theta_1) = \sum_{j,k} Q_{jk} + \sum_{j,l} Q_{jl},$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, l \in L, k \in K;$$

$$\sum_{j,k} Q_{jk} = \sum_k Q_k / (1 - \theta_2),$$

$$\sum_{j,l} Q_{jl} = \sum_l Q_l / (1 - \theta_3), \quad \forall j \in J, l \in L, k \in K \quad (34)$$

经过以上的分析, 运用加权求和法, 将 2 个目标放于统一的衡量标准体系中进行计算, 引入参数变量碳税价格 C_{CO_2} , 其表示在碳排放制度下, 荔枝冷链物流因碳排放所需支付的社会成本, 将原有的成本和碳排放的多目标模型转化为单目标模型优化的问题。即目标优化函数如下:

$$\begin{aligned} \min f(x) = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} C_j Z_j + \sum_{j \in J} H_j Z_j (C_a^j + C_b^j + C_c^j) + \\ & C_1 m + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} C_{ij}^T X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} m_{jk} C_{jk}^T LC X_{jk} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} m_{jl} C_{jl}^T LC X_{jl} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_k Q_{jk} Z_k + \sum_{l \in L} C_x t_l Q_{jl} + \\ & \sum_{l \in L} C_z t_l^j Q_{jl} Z_l + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \theta_1 X_{ij} Q_{ij} P_g^{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \theta_2 X_{jk} Q_{jk} P_g^{jk} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \theta_3 X_{jl} Q_{jl} P_g^{jl} + \left(\sum_{j \in J} C_j^p H_j Z_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij}^p Q_{ij} X_{ij} + \right. \\ & \left. \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} M_{jk}^v m_{jk} X_{jk} D_{jk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{jn}^p t_{jn} Q_{ij} + \right. \\ & \left. \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} M_{jl}^v m_{jl} D_{jl} X_{jl} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_k^p t_k Z_k Q_{jk} + \sum_{l \in L} C_l^t Z_l H_l + \right. \end{aligned}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} C_{itl}^1 Q_{jl} + (\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \theta_1 X_{ij} Q_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \theta_2 X_{jk} Q_{jk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \theta_3 X_{jl} Q_{jl}) C_1^1 C_{CO_2}$$

$$\left. \begin{aligned} & X_{ij} \leq Z_j, \forall i \in I, j \in J; \\ & \sum_i X_{ij} \geq Z_j, \forall j \in J; \\ & X_{jk} \leq Z_j, \forall j \in J, k \in K \\ & \sum_j X_{jk} \geq 1, \forall k \in K; \\ & Q_{ij}^{\min} \cdot X_{ij} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij}^{\max} \cdot X_{ij}, Q_{ij} \in N, \forall i \in I, j \in J; \\ & Q_{jk}^{\min} \cdot X_{jk} \leq m_{jk} \cdot LC \leq Q_{jk}^{\max} \cdot X_{jk}, \forall j \in J, k \in K; \\ & P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, P_i \in N, \forall i \in I \\ & P_i = \sum_j Q_{ij}, \forall i \in I; \\ & H_j^{\min} \leq H_j \leq H_j^{\max}, H_j \in N, \forall j \in J; \\ & H_j = \sum_l Q_{jl}, \forall j \in J, \forall l \in L; \\ s.t. & \sum_j \sum_k m_{jk} \cdot LC \leq H_j \cdot Y_j, \forall k \in K, \forall j \in J; \\ & H_l^{\min} \leq H_l \leq H_l^{\max}, H_l \in N, \forall l \in L; \\ & H_l = \sum_j Q_{jl}, \forall l \in L; \\ & \sum_j \sum_l m_{jl} \cdot LC \leq H_l \cdot Z_l, \forall j \in J, \forall l \in L; \\ & Q_{ij} \geq 0, \forall i \in I, j \in J; \\ & m_{jk} \geq 0, m_{jk} \in N, m_{jl} \geq 0, m_{jl} \in N, \forall j \in J, \\ & \quad l \in L, k \in K; \\ & \sum_{i,j} Q_{ij}(1-\theta_1) = \sum_{j,k} Q_{jk} + \sum_{j,l} Q_{jl}, \forall i \in I, \forall j \in J, \\ & \quad l \in L, k \in K; \\ & \sum_{j,k} Q_{jk} = \sum_k Q_k / (1-\theta_2), \sum_{j,l} Q_{jl} = \sum_l Q_l / (1-\theta_3), \\ & \quad \forall j \in J, l \in L, k \in K \end{aligned} \right\}$$

3 实证研究

3.1 实例分析

C 城市有较为成熟的荔枝种植—运输—销售—消耗的全程冷链物流网络，能全面地反映荔枝产业的双渠道流通的冷链物流模式。通过充分实地调研，以 C 市的实际参数为例进行研究分析。其中，荔枝冷链物流的双渠道流通模式是由 4 个荔枝生产基地、3 个荔枝批发商、5 个荔枝零售商、10 个线上消费群构成的多级全程冷链物流的系统网络。根据投入产出法分析，荔枝全程冷链物流系统的碳足迹计算主要包括流通加工中心、冷藏运输环节、荔枝腐损环节以及消费者环节带来的碳排放，见表 3。

目前，荔枝产业的生产商主要包括农户、合作社和企业，其中供应成本主要受其生产能力的影 响。批发商的价格主要根据其流通加工环节的运营成本及市场行情等动态改变其批发价格。文中研究的 4 个荔枝产地、3 个荔枝流通加工中心、5 个荔枝零售商、10 个荔枝线上消费群的相关数据见表 4—7。最终市场价格还受到其他外部因素的影响，如运输距离、运费等。荔枝批发商到荔枝零售商以及到最终消费者的运输距离、运费相关数据见表 8—12。

通过对荔枝零售市场的数据进行分析，根据前文模型的要求，只需确定荔枝零售商的市场需求。根据《中国碳税制框架设计报告》可知，2020 年碳税率为 40 元/t，即 $C_{CO_2} = 0.04$ 元/kg。冷藏车的载质量为 5 t，即 $L_C = 5$ t/辆，冷藏车的速度恒定， $V_{jk}^m = V_{jl}^m = 55$ km/h，冷藏车的维护成本 $C_1 = 500$ 元/辆，而普通货车为其一半，经实地调研发现，使用冷藏车运输的回程空载达到了 70%，荔枝批发商处理的腐损率 $\theta_1 = 10\%$ ，荔枝零售商处理的腐损率 $\theta_2 = 12.5\%$ ，消费者处理的腐损率 $\theta_3 = 12.7\%$ ，其中荔枝批发商采购价格 $P_g^{ij} = 4$ 元/kg，荔枝零售商采购价格 $P_g^{jk} = 10$ 元/kg，消费者购买价格 $P_g^{jl} = 12$ 元/kg。

表 3 主要环节碳足迹
Tab.3 Carbon footprint of main link

| 活动 | 类型 | 碳足迹 | 数据来源 |
|--------|---------------------|----------------|------------|
| 预冷包装 | 冰水预冷 | 8.32 g/kg | 调研数据 |
| | 包装材料制作 | 229.63 g/kg | 文献[22] |
| 批发商 | 电能消耗 | 53.3 g/(kg·d) | 实验数据 |
| | 运输 | 柴油消耗 | 581.4 g/km |
| 销售 | 电能消耗 | 25.59 g/(kg·d) | 实验数据 |
| 智能存储柜 | 电能消耗 | 2.7 g/(kg·h) | 实验数据 |
| 冰箱 | 电能消耗 | 107.4 g/(kg·d) | 实验数据 |
| 废弃填埋处理 | CO ₂ 排放量 | 41.21 g/kg | 文献[23] |

表 4 产地的生产能力
Tab.4 Production capacity of producing areas

| 产地 | 生产能力/kg |
|----|-----------|
| P1 | 0~22 338 |
| P2 | 0~291 670 |
| P3 | 0~100 049 |
| P4 | 0~34 314 |

表 5 流通加工中心相关数据
Tab.5 Relevant data of circulation processing center

| 项目 | 处理能力/t | 固定运营成本/ (元·kg ⁻¹) | 包装加工成本/ (元·kg ⁻¹) |
|----|--------|----------------------------------|----------------------------------|
| J1 | 50~100 | 2.00 | 1.25 |
| J2 | 30~75 | 1.74 | 1.68 |
| J3 | 30~80 | 2.07 | 1.38 |

表6 市场需求状况
Tab.6 Market demand situation

| 需求方 | 市场需求量/t | |
|-----|---------|-----|
| 零售商 | K1 | 20 |
| | K2 | 25 |
| | K3 | 30 |
| | K4 | 28 |
| | K5 | 22 |
| 消费者 | L1 | 3.5 |
| | L2 | 5 |
| | L3 | 3 |
| | L4 | 4 |
| | L5 | 5 |
| | L6 | 4.5 |
| | L7 | 5 |
| | L8 | 4.5 |
| | L9 | 4 |
| | L10 | 3 |

表7 市场需求相关成本
Tab.7 Market demand related costs

| 市场需求方 | 成本/(元·kg ⁻¹) | |
|-----------------|--------------------------|-------|
| 零售商 (运营成本) | K1 | 2 |
| | K2 | 2.07 |
| | K3 | 2.1 |
| | K4 | 1.74 |
| | K5 | 1.74 |
| 消费者冰箱 (存储成本) | L1 | 0.343 |
| | L2 | 0.222 |
| | L3 | 0.222 |
| | L4 | 0.222 |
| | L5 | 0.453 |
| | L6 | 0.263 |
| | L7 | 0.6 |
| | L8 | 0.275 |
| | L9 | 0.277 |
| | L10 | 0.311 |
| 智能存储柜 (存储成本) | L1 | 0.021 |
| | L2 | 0.014 |
| | L3 | 0.014 |
| | L4 | 0.014 |
| | L5 | 0.028 |
| | L6 | 0.016 |
| | L7 | 0.019 |
| | L8 | 0.017 |
| | L9 | 0.017 |
| | L10 | 0.019 |

表8 荔枝产地*i*到荔枝批发商*j*单位运输费用
Tab.8 Unit transportation cost from litchi producing area *i* to litchi wholesaler *j* 元/kg

| 批发商 | I1 | I2 | I3 | I4 |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| J1 | 0.0102 | 0.0187 | 0.0187 | 0.0204 |
| J2 | 0.0204 | 0.0136 | 0.0136 | 0.0136 |
| J3 | 0.0204 | 0.0136 | 0.0153 | 0.0153 |

表9 荔枝批发商*j*到荔枝零售*k*的单位运输费用
Tab.9 Unit transportation cost from litchi wholesaler *j* to litchi retailer *k* 元/kg

| 需求市场 | J1 | J2 | J3 |
|------|--------|--------|--------|
| K1 | 0.1037 | 0.1088 | 0.0629 |
| K2 | 0.0782 | 0.1462 | 0.068 |
| K3 | 0.068 | 0.1292 | 0.0561 |
| K4 | 0.0731 | 0.0986 | 0.0306 |
| K5 | 0.0918 | 0.0731 | 0.051 |

表10 荔枝批发商*j*到消费者*l*的单位运输费用
Tab.10 Unit transportation cost from litchi wholesaler *j* to consumer *l* 元/kg

| 需求市场 | J1 | J2 | J3 |
|------|-----------|-----------|-----------|
| L1 | 0.218 831 | 0.502 105 | 0.635 936 |
| L2 | 0.429 162 | 0.538 577 | 0.328 246 |
| L3 | 0.291 774 | 0.328 246 | 0.218 831 |
| L4 | 0.255 303 | 0.364 718 | 0.145 887 |
| L5 | 1.433 372 | 1.287 485 | 1.570 759 |
| L6 | 1.214 541 | 1.360 428 | 1.077 154 |
| L7 | 0.575 049 | 0.684 464 | 0.429 162 |
| L8 | 1.360 428 | 1.214 541 | 1.433 372 |
| L9 | 0.858 323 | 0.720 936 | 1.077 154 |
| L10 | 1.004 21 | 0.858 323 | 1.150 098 |

表11 荔枝批发商*j*到荔枝零售商*k*的距离
Tab.11 Distance from litchi wholesaler *j* to litchi retailer *k* km

| 需求市场 | J1 | J2 | J3 |
|------|-----|-----|----|
| K1 | 140 | 150 | 83 |
| K2 | 110 | 200 | 90 |
| K3 | 90 | 170 | 70 |
| K4 | 100 | 130 | 40 |
| K5 | 120 | 100 | 60 |

3.2 结果分析

根据双渠道流通模式下荔枝全程冷链的投入产出分析,采用 Matlabr 2013 软件 YALMIP 工具箱对文中模型进行优化求解,并将具体参数放入模型中进行计算。在考虑碳足迹情况下,荔枝批发商从荔枝生产商共计采购 211 t 荔枝,在以荔枝批发商(流通加工企业)开设的双渠道流通流通模式下进行流通,分别

表 12 荔枝批发商 *j* 到消费群 *l* 距离
Tab.12 Distance from litchi wholesaler *j* to consumer *l* km

| 需求市场 | J1 | J2 | J3 |
|------|------|------|------|
| L1 | 300 | 700 | 1000 |
| L2 | 600 | 750 | 450 |
| L3 | 400 | 450 | 300 |
| L4 | 350 | 500 | 200 |
| L5 | 2000 | 1800 | 2200 |
| L6 | 1700 | 1900 | 1500 |
| L7 | 800 | 950 | 600 |
| L8 | 1900 | 1700 | 2000 |
| L9 | 1200 | 1000 | 1500 |
| L10 | 1400 | 1200 | 1600 |

以碳排放最小和以总成本最小为目标进行运算，结果发现，碳排放总量均为 223.14 t，其对应的总成本也均为 407.34 万元。从社会效应和经济效应的角度出发，优化配送路线能有效降低成本和减少碳排放。

3.2.1 断链对碳足迹的影响分析

根据调研可知，目前荔枝流通过程中出现的断链现象主要发生在销售环节和短途配送环节。通过实验发现，常温下销售 2 d 时，荔枝的腐损率已达 22%。经实验发现，荔枝在经过冷藏后常温销售的腐损会变得非常快，在第 3 天已达到 62.1%，到第 4 天已全部霉变，见图 3。以陈列柜销售的模式下，荔枝在第 3 天的腐损率为 12.5%。一般情况下，销售半径在不大于 200 km 时采用保温车配送，短途冷藏车配送不存在腐损情况，而保温车运输时荔枝的腐损率为 4%，即批发商处理的腐损率 $\theta'_3=13.6%$ ，零售商处理的腐损率 $\theta'_2=25%$ 。假设在其他数据不变的情况下，相对于陈列柜销售，常温销售会减少陈列柜制冷及其设备成本，零售商在常温下的运营成本见表 13。其中保温运输会减少运输途中的制冷碳排放，而冷藏运输过程中，制冷耗油占 30%，即保温运输的能耗是冷藏运输能耗的 70%。文中研究的全程冷链包括销售环节。通过上述数据，可计算出断链腐损率 $\theta'=30%$ ，将参数带入上述模型中，在考虑碳排放情况下，碳排放总量为 225.71 t，其对应的成本为 453.99 万元。从经济效益和环境效应角度出发，在断链情况下的成本和碳排放均比全程冷链的高，腐损褐变的速度也更快。为了延长荔枝货架期，保障其品质，销售环节也应处于低温状态下。

3.2.2 包装材料对碳足迹的影响分析

经调研发现，目前国内荔枝采用的包装方式主要为薄膜包装袋+泡沫箱。通过实验发现，在此种包装下冷库储存 4 d 的腐损率为 9%，而采用涂膜包装作

为内包装，其储存 28 d 后的腐损率为 7%，采用 PVC 薄膜包装荔枝储存在 0 °C 下贮存 40 d，质量损失率仅为 1.7%^[20]，从上述分析可知，采用不同的包装材料，荔枝的腐损率不同。目前荔枝流通的包装方式主要为薄膜包装袋+泡沫箱，由此设计了该包装方式下主要流通环节的腐损率实验。经实验发现，该包装方式下荔枝流通过程中随着时间的推移，不同环节储存的腐损率变化见图 3—4。

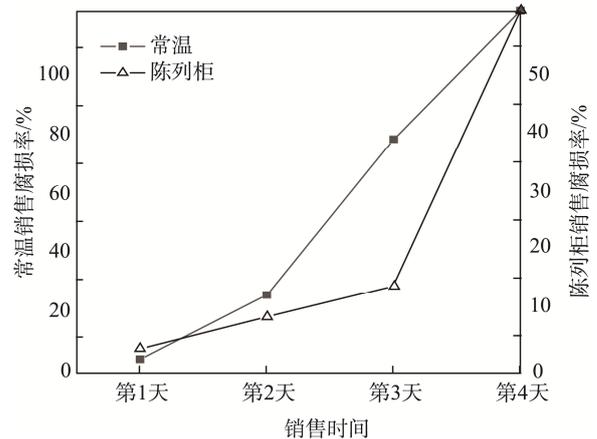


图 3 不同销售方式下腐损率 θ 的变化情况
Fig.3 Variation of decay rate θ under different sales methods

表 13 常温销售时零售商的运营成本
Tab.13 Operating costs of retailers by sales at normal temperature

| 零售商 | 运营成本/(元·kg ⁻¹) |
|-----|----------------------------|
| K1 | 1.5 |
| K2 | 1.57 |
| K3 | 1.6 |
| K4 | 1.24 |
| K5 | 1.24 |

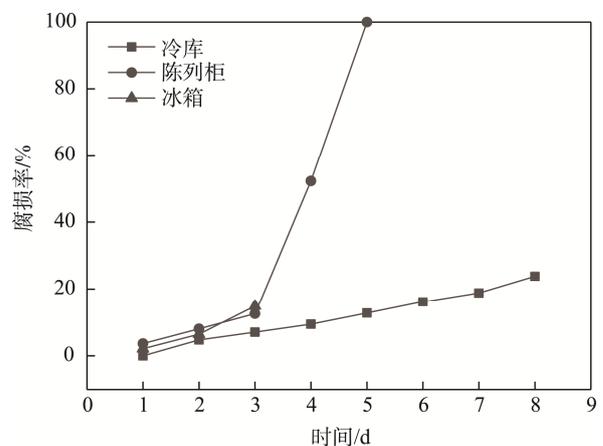


图 4 贮藏时间对荔枝腐损率的影响
Fig.4 Effect of storage time on litchi decay rate

不同包装材料下,随着荔枝腐损率的升高,双渠道流通模式下全程冷链物流的总成本和碳排放总量均呈上升趋势,且总碳排放量和总成本的变化趋势相近,其趋势幅度也相对应,见图5。从图5中可分析得出,当腐损率从0上升到30%时,总成本从287.44万元增长到460.8万元,碳排放总量则从216.92 t上升到225.84 t。从碳足迹和成本优化的角度分析,应尽可能地降低荔枝的腐损率,可通过采取优良的保鲜包装材料,保持荔枝在流通过程中处于良好的保鲜环境,这样既可更有效地延长其货架期,也可降低其内部成本、减少碳排放。

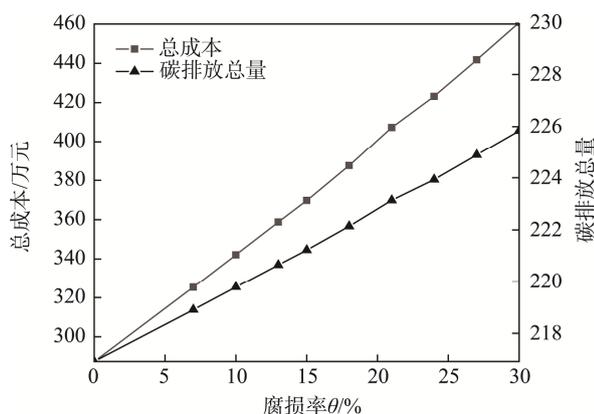


图5 包装材料对总成本和碳足迹的影响

Fig.5 Effects of packaging materials on total cost and carbon footprint

4 结语

基于荔枝全程冷链物流各个环节碳排放的来源及其影响因素,采用投入产出、碳排放系数等多种方法,构建了双渠道流通模式下的荔枝全程冷链物流碳足迹模型。文中探讨了荔枝双渠道流通模式下全程冷链物流碳足迹问题。

通过实证研究可知,文中所建碳足迹模型考虑了冷链物流各个环节的碳排放问题。从结果可知,冷藏运输环节的碳足迹是整条链上占比最大的环节;从全程冷链和断链的角度进行了对比分析,全程冷链下碳排放总量为223.14 t,总成本为407.34万元;断链下碳排放总量为225.71 t,总成本为453.99万元;不同的包装材料对荔枝的腐损率有显著影响,即当腐损率从0到30%时,总成本从287.44万元增长到460.8万元,碳排放总量则从216.92 t上升到225.84 t。由此可见,可通过采用好的保鲜包装材料来降低腐损率,对减少碳排放和降低成本具有良好的环境效应和经济效应。

目前,我国荔枝流通大多还是断链的,国内流通采取的预冷方式均为冰水预冷,且预冷温度都未达到标准。国内目前流通的荔枝预冷温度多为12℃左右,而标准的预冷温度应在7℃以下。今后可从不同的预

冷温度对荔枝流通过程中的影响程度的角度对荔枝全程冷链碳足迹进行分析。

参考文献:

- [1] 陈厚彬. 荔枝产业综合技术[M]. 广州: 广东科技出版社, 2010.
CHEN Hou-bin. Comprehensive Technology of Litchi Industry[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2010.
- [2] 赵伟, 王莉, 张平, 等. 荔枝果皮褐变机理与防褐保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2002, 2(3): 6—9.
ZHAO Wei, WANG Li, ZHANG Ping, et al. Advances in Research on the Mechanism of Peel Browning and Technology of Protection from Browning for Litchi[J]. Storage and Process, 2002, 2(3): 6—9.
- [3] 黄循精. 世界荔枝生产与贸易综述[J]. 世界热带农业信息, 2007(5): 1—4.
HUANG Xun-jing. Summary of Litchi Production and Trade in the World[J]. World Tropical Agriculture Information, 2007(5): 1—4.
- [4] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同保鲜运输方式对荔枝果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 225—232.
YANG Song-xia, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Effects of Different Fresh-keeping Transportation Modes on Quality of Litchi Fruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 225—232.
- [5] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 荔枝物流中保鲜技术的应用现状与分析[J]. 广东农业科学, 2012, 27(16): 196—199.
YANG Song-xia, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Present Situation Analysis on Litchi Cold Chain Logistics[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 27(16): 196—199.
- [6] DONG H Q, CHENG L Y, TAN J H, et al. Effects of Chitosan Coating on Quality and Shelf Life of Peeled Litchi Fruit[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(3): 355—358.
- [7] JIANG Y M, ZHU X R, LI Y B. Post-harvest Control of Litchi Fruit Rot by Bacillus Subtilis[J]. LWT-Food Science and Technology, 2001, 34(7): 430—436.
- [8] REICHEL M, CARLE R, SRUAMSIRI P, et al. Influence of Harvest Maturity on Quality and Shelf-life of Litchi Fruit(Litchi Chinensis Sonn)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 57(3): 162—175.
- [9] 陈洪国, 彭永宏. 常温泡沫箱加冰运输条件下荔枝的温度、品质、呼吸和乙烯释放变化[J]. 果树学报, 2001, 18(3): 155—159.
CHEN Hong-guo, PENG Yong-hong. Study on the Fruit Temperature, Quality, Carbon Dioxide and Ethylene Evolution of Litchi Subjected to Ambient Ice-added TransportationFoam Box[J]. Journal of Fruit

- Science, 2001, 18(3): 155—159.
- [10] STRUTT J, WILSON S, SHORNEY-DARBY H, et al. Assessing the Carbon Footprint of Water Production[J]. Journal of the American Water Works Association, 2008, 100(6): 80—89.
- [11] 刘倩晨. 考虑碳排放的冷链物流研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
LIU Qian-chen. Study on Cold Chain Logistics Considering Carbon Emissions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [12] 谢如鹤, 刘广海, 邹毅峰, 等. 不同物流条件对荔枝品质的影响[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2013, 12(1): 81—86.
XIE Ru-he, LIU Guang-hai, ZOU Yi-feng, et al. Influence on Litchi Quality in Different Logistics Conditions[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2013, 12(1): 81—86.
- [13] 姚漫, 汪传旭, 许长延. 碳排放约束下双渠道两级供应链网络优化模型[J]. 工业工程, 2013, 16(4): 7—13.
YAO Man, WANG Chuang-xu, XU Chang-yan. A Network Optimization Model for Dual-channel Two-Echelon Supply Chain with Carbon Emissions-Constrained[J]. Industrial Engineering Journal, 2013, 16(4): 7—13.
- [14] 曹武军, 李新艳. 收益共享契约对生鲜农产品双渠道供应链协调研究[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(11): 469—472.
CAO Wu-jun, LI Xin-yan. Study on the Coordination of Fresh Agricultural Products Dual Channel Supply Chain Based on Revenue Sharing Contract[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(11): 469—472.
- [15] 蔡依平, 张文娟, 张世翔, 等. 基于生命周期评估的冷链物流碳足迹计算[J]. 物流技术, 2015, 34(1): 120—123.
CAI Yi-ping, ZHANG Wen-juan, ZHANG Shi-xiang, et al. Calculation of Carbon Footprint of Cold Chain Logistics Based on Life Circle Assessment[J]. Logistics Technology, 2015, 34(1): 120—123.
- [16] 刘玲, 陈淮莉. 基于双渠道联合库存策略的生鲜品产销[J]. 工业工程, 2015, 18(4): 92—98.
LIU Ling, CHEN Huai-li. A Production and Marketing Study of Fresh Products Based on the Joint Inventory Strategy of Dual Channel[J]. Industrial Engineering Journal, 2015, 18(4): 92—98.
- [17] 汪传旭, 李辉. 政府补贴下考虑碳排放限量的双渠道闭环供应链决策[J]. 复旦学报(自然科学版), 2018, 57(2): 131—142.
WANG Chuang-xu, LI Hui. Decision of Dual Channel Closed Loop Supply Chain Considering Carbon Emission Limits under Government Subsidy[J]. Journal of Fudan University(Natural Science), 2018, 57(2): 131—142.
- [18] 林河通, 陈绍军, 席均芳. 荔枝果实采后商品化处理 and 贮藏技术[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 126—134.
LIN He-tong, CHEN Shao-jun, XI Yu-fang. Commercial Post-harvest handling and Storage Technology of Litchi Fruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(5): 126—134.
- [19] 吕盛坪, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同预冷方式对荔枝贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(3): 157—162.
LYU Sheng-ping, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Effects of Different Precooling Methods on the Storage Quality of Litchi[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 157—162.
- [20] 阮文璇, 刘宝林, 宋晓燕. 荔枝的冷却方式选择[J]. 食品工业科技, 2012, 33(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, 33(11): 352—354.
- [21] 蒋依辉, 刘伟, 袁沛元, 等. 荔枝保鲜包装技术研究进展[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 95—101.
JIANG Nong-hui, LIU Wei, YUAN Pei-yuan, et al. Research Progress of Lychee Fresh-keeping Packaging Technology of Litchi[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 95—101.
- [22] 王文明, 臧建鸣, 向红. 以蜂窝包装为例——我国包装产业绿色低碳材料研究[J]. 绿色包装, 2016(3): 32—40.
WANG Wen-ming, ZANG Jian-ming, XIANG Hong. A Cellular Packaging-China's Packaging Industry Research of Green Carbon Material[J]. Green Package, 2016(3): 32—40.
- [23] ILIC A, STAAKE T, FLEISCH E. Using Sensor Information to Reduce the Carbon Footprint of Perishable Goods[J]. IEEE Pervasive Computing, 2008, 8(1): 22—29.