

文章编号:0253-4339(2021)02-0158-09
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.02.158

基于冷链模式的某果蔬碳足迹计算

李 斌 刘 斌 陈爱强 赵松松 宁静红

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘 要 食品在冷链过程中的碳足迹计算是我国食品未来走向国际市场的一个必要门槛。本文利用生命周期评估方法计算了某果蔬冷链各环节的碳足迹,并基于能量平衡方程,研究不同运输时间下的冷藏运输方式和碳足迹。研究结果表明:1)1 kg 蔬菜各冷链环节碳足迹为 0.098 kg,运输环节占总排放的 82%,预冷、存储(销售)和消费(废弃)环节分别占总排放的 7%、6%和 5%;2)运输时间在 5 h 内,预冷后的蔬菜可采用保温运输,供冷碳足迹为 0;3)蓄冷运输时间 60 h,蓄冷剂相变潜热 $L=270\text{ kJ/kg}$ 时,每立方米需要 70 kg 的蓄冷剂;4)10 t 冷藏车的运输时间在 98 h 内采用蓄冷运输比机械制冷运输的供冷碳足迹更小。因此,为减小冷链过程中的碳足迹,应根据运输时间选择不同的冷藏运输方式,优先使用体系系数 H 小的冷藏车、相变潜热大的蓄冷剂、COP 高的制冷机组,适当增加冷藏车保温层厚度。

关键词 果蔬冷链;碳足迹;运输方式;计算方法

中图分类号:TS255.3;F326.6;X322

文献标识码:A

Calculation of Carbon Footprint of Fruits and Vegetables Based on Cold Chain Model

Li Bin Liu Bin Chen Aiqiang Zhao Songsong Ning Jinghong

(Tianjin Key Lab of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract The carbon footprint calculation of our country's food in the cold chain process is a prerequisite for its entry to the international market in the future. In this study, the life cycle assessment method was used to calculate the carbon footprint of various parts in the cold chain of certain fruit and vegetable. Based on the energy balance equation, the refrigerated transportation mode and carbon footprint under different duration of transportation were studied. The results showed that the carbon footprint of a 1 kg vegetable in the cold chain is 0.098 kg; the transportation part accounts for 82% of the total emissions, while the precooling, storage (sales), and consumption (disposal) parts account for 7%, 6%, and 5%, respectively. When the duration of transportation is within 5 h, the precooled vegetables can be transported with heat preservation, and the carbon footprint is zero. When the duration of cold storage transportation is 60 h and the latent heat L of phase-change material is 270 kJ/kg , 70 kg of cold storage agent is needed per cubic meter. The 10 t refrigerated truck with a transportation duration less than 98 h has a smaller carbon footprint for cold storage transportation than that for the mechanical refrigeration transportation. Therefore, to reduce the carbon footprint in the cold chain process, different refrigerated transportation methods should be selected according to the duration of transportation. Refrigerated trucks with a small shape coefficient H , cold storage agents with a large phase-change latent heat, and refrigeration units with a high COP should be the prior considerations while the thickness of the insulation layer of refrigerated trucks should be appropriately increased.

Keywords fruit and vegetable cold chain; carbon footprint; transportation mode; calculation method

随着人们生活质量的提高,消费者对生鲜产品的需求量更大、品质要求更高,推动了冷链物流的快速发展,预计至 2020 年,冷链市场的复合增长率将达到 17.1%^[1]。但随着冷链市场规模的扩大和技术装备

数量的增加,能源消耗所产生的碳足迹也日益增多。我国政府在哥本哈根会议上承诺,至 2020 年,单位 GDP 碳足迹将比 2005 年降低 40%~45%,如何协调冷链的发展与低碳经济的关系变得尤为重要。

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51906178)和国家重点研发计划项目(2018YFD0401304-4)资助。(The project was supported by National Natural Science Foundation of China Youth Project (No. 51906178) & National Key Research and Invention Program (No. 2018YFD0401304-4).)

收稿日期:2020-08-07;修回日期:2020-11-28

国内外学者对冷链物流领域的能耗和碳足迹进行了相关研究,在冷链物流碳足迹计算方面,许茹楠等^[2]研究了果蔬冷链各环节的碳足迹,发现冷藏运输环节的碳足迹最多。刘倩晨^[3]应用生命周期评估方法对冷链物流各环节的碳足迹进行了计算,分析了冷链企业考虑碳足迹前后影响利润的关键因素。李斌等^[4]研究了某果蔬从生产商到消费者环节的碳足迹,对运输环节不同供冷方式下的碳足迹进行计算,建议在满足运输需求的情况下优先选择碳足迹小的冷藏运输方式。蔡依平等^[5]计算了番茄生命周期各阶段的碳足迹,并对比了海运和公路运输方式的碳足迹。刘广海等^[6]提出了冷链物流系统碳足迹模型,研究了碳税和腐损率对总成本和碳足迹的影响。陈静等^[7]研究了生鲜肉类食品供应链的碳足迹问题,提出了选择合适的运输方式,提高生产加工环节效率和冷藏设备空间利用率的减排建议。廖晶等^[8]研究了荔枝双渠道流通模式下冷链物流碳足迹,对比分析了荔枝在全程冷链和断链时的成本和碳足迹情况。S. Benjaafar 等^[9]构建了供应链中碳足迹的测算模型,计算了牛奶供应链的碳足迹并提出减排措施。A. Carlsson-Kanyama^[10]研究了不同食品的碳足迹问题,分析了不同环节的碳足迹。在冷链物流路径优化方面,王智忆等^[11]在考虑车速、距离、载重量等影响因素的基础上,构建了碳足迹量最低和总路程最小的目标函数模型。钱光宇^[12]以生鲜农产品冷链配送总成本最小为目标函数,建立了考虑碳足迹的路径优化模型,结果表明,在碳税价格较高时能减少规划的路线产生的碳足迹。Yang J. 等^[13]在考虑碳税的情况下建立了货物配送路径优化模型,并以城市果蔬配送为例进行模型验证。任腾等^[14]构建了在客户服务时间范围内以碳足迹量最小为优化目标的车辆路径优化模型。有些学者提出生鲜产品在不同运输距离下选择合适的供冷方式可以节约运输能耗,刘斌等^[15]基于冷藏车运输过程中的能量平衡分析,计算出 2 h 内可选择保温冷藏车,长距离运输应选择机械冷藏车。高恩元等^[16]通过对 3 种冷链运输方式下番茄的品质指标进行测定,提出根据不同运输时长选择保温、蓄冷或机械供冷的运输方式。李慧慧^[17]研究了机械式多温共配和蓄冷式多温共配两种配送方式下的经济成本和碳足迹,结果表明,蓄冷式多温共配减少了经济成本,同时也降低了碳足迹。

上述研究集中在计算某产品在生命周期的碳足迹或构建考虑碳足迹的冷链物流路径优化模型,也有学者提出根据运输时间选择合适的冷藏运输方式以

减少能耗,但没有量化运输环节不同供冷方式的碳足迹。因此,本文在上述研究的基础上利用生命周期评估方法计算了某果蔬冷链各环节的碳足迹,并基于能量平衡方程,研究不同运输时间下的冷藏运输方式和碳足迹。目的是为企业和其他利益相关者选择更环保的冷链流通方式提供参考,以减少果蔬生命周期的碳足迹。

1 碳足迹计算方法

碳足迹起源于生态足迹的概念,近年来学术界对碳足迹的定义是某一活动或产品在生命周期内直接及间接排放的温室气体量。常用的碳足迹的计算方法有生命周期评估法、投入产出分析法等。投入产出分析法是一种自上而下的计算方法,适用于计算宏观系统的碳足迹。生命周期评价是一种自下而上的计算方法,适合计算微观系统的碳足迹,可以分析一项产品从生产到废弃整个生命周期造成的环境影响。本文采用生命周期评估法,计算依据为 PAS 2050:2008《商品和服务生命周期温室气体排放评估规范》,该方法包括目标和范围定义、清单分析、影响评价和结果解释 4 个部分^[18]。

碳足迹有面积和质量两种度量单位,为了和早期的研究统一,国际上一般以温室气体(GHG)的质量来衡量碳足迹量。碳足迹除了二氧化碳外还应包括其他温室气体,为此政府间气候变化专门委员会 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)定义了不同温室气体的全球变暖潜值 GWP(global warming potential),GWP 表示单位温室气体对全球变暖的贡献大小,规定 CO₂ 的 GWP=1,其余温室气体用 CO₂ 当量表示^[19],我国采用京都议定书规定 6 类主要的温室气体作为碳足迹的核算范围。

2 果蔬冷链物流碳足迹测算框架

2.1 目标分析与范围界定

我国果蔬产量大,流通过程中损耗率高,本文以某果蔬为研究对象计算果蔬在生产、预冷、运输、冷藏、销售和消耗整个生命周期的碳足迹。

功能单位定义了产品碳足迹的计量基准,使计算数据标准化,本研究以 1 kg 果蔬为计算的功能单位,系统边界由果蔬冷链流程图确定,如图 1 所示。

2.2 数据收集

计算果蔬生命周期各环节碳足迹之前,需要收集系统边界内投入的资源、能量等活动水平数据和对应的碳足迹因子,数据如表 1 所示。

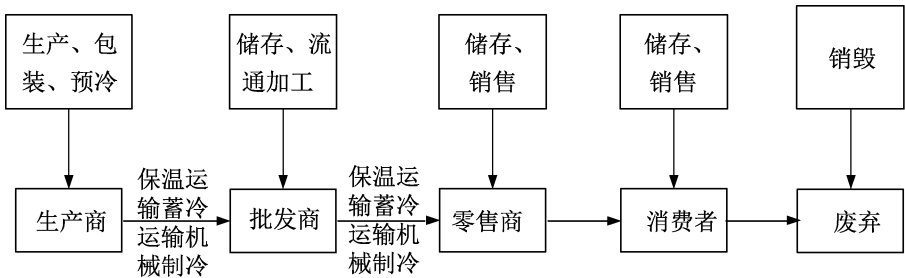


图 1 系统边界
Fig.1 System boundary

表 1 清单分析中的活动及数据
Tab.1 Activities and data in the inventory analysis

项目	活动	数据	数据类型	数据来源
生产	蔬菜生产	260 g/kg	CO ₂ 排放	Lin Jianyi 等(2015) ^[20]
运输	小型货车(1~1.5 t)	0.166 7 L/km	行驶油耗	PWMI(1993) ^[21]
	重型货车(10 t)	0.285 7 L/km	行驶油耗	
存储	批发商和零售商冷藏	0.3 kW·h/(t·d)	耗电量	邱嘉昌等(2004) ^[22]
销售	陈列柜冷藏销售	4.055 kW·h/m ²	耗电量	S. A. Tassou 等 ^[23]
废弃	填埋处理	41.21 g/kg	CO ₂ 排放	A. Ilic (2009) ^[24]
碳足迹因子	柴油	3 060 g/kg	CO ₂ 排放	PWMI(1993) ^[21]
		2 630 g/L	CO ₂ 排放	
	电耗	785 g/(kW·h)	CO ₂ 排放	杨建新(2002) ^[25]

3 碳足迹计算与分析

3.1 生产过程碳足迹

以某蔬菜为例,生产环节的碳足迹量主要来自于生产过程中投入的化肥、农药、塑料膜、灌溉用电、柴油以及土地释放的 N₂O。生产环节的碳足迹受生产方式和气候条件等影响较大,数据一般通过实验测算,测算过程具有难度大、周期长的特点。本文参照 Lin Jianyi 等^[20]的研究,每生产 1 kg 蔬菜的碳足迹为 0.26 kg CO₂。

3.2 预冷过程碳足迹

预冷可以快速去除蔬菜的田间热,有效抑制呼吸作用和微生物生长,减少损耗,提高品质,还可以减少运输和贮藏环节的冷负荷,降低运输能耗。目前最常用的预冷方式有强制通风预冷、真空预冷、压差预冷、冷水预冷、冰预冷等,应根据不同蔬菜的工艺要求选择合适的预冷方式。本研究采用强制通风预冷,能耗主要来自制冷机消耗的电能,耗电量根据式(1)计算:

$$W = \frac{Q}{COP}$$

(1)

式中:W 为耗电量,kW·h;Q 为降低蔬菜温度所需制冷量,kJ;COP 为预冷设备能效比。预冷时蔬菜温度从 25 ℃ 降至 4 ℃,某蔬菜比热容为 3.9 kJ/(kg·℃),计算得预冷 1 kg 所需冷量 Q 为 81.9 kJ,COP 取 2.5,需要预冷电耗为 9.1×10⁻³ kW·h。根据表 1 中的数据,1 kW·h 电能的 CO₂排放为 785 g,计算出 1 kg 某蔬菜预冷所产生的碳足迹约为 7.144×10⁻³ kg CO₂。

3.3 冷藏车运输过程碳足迹

冷藏汽车运输具有组织时间短、机动灵活和直达性等特点,适合蔬菜冷藏运输的市场需求,本研究使用公路冷藏汽车运输蔬菜。冷藏汽车按照供冷方式可分为隔热保温运输、蓄冷运输和机械制冷运输 3 种类型,应根据蔬菜的运输时间来选择合适的运输方式。运输阶段的碳足迹源于车辆行驶过程的燃油消耗、制冷设备的能源消耗和制冷剂泄漏。

1) 行驶碳足迹

假设长距离运输使用 10 t 重型冷藏车,短距离运输使用 1.5 t 小型冷藏车,使用的燃料为柴油。根据表 1 中的数据,计算重型、小型冷藏车的行驶碳足迹

分别如式(2)、式(3)所示:

$$\frac{0.2857\text{ L/km}\times2.63\text{ kg/L}}{10\,000\text{ kg}}=7.510\times10^{-5}\text{ kg CO}_2/(\text{kg}\cdot\text{km})\tag{2}$$

$$\frac{0.1667\text{ L/km}\times2.63\text{ kg/L}}{1\,500\text{ kg}}=2.920\times10^{-4}\text{ kg CO}_2/(\text{kg}\cdot\text{km})\tag{3}$$

2) 制冷碳足迹

冷藏车的热负荷决定了所需的制冷量,为了维持蔬菜冷藏运输过程中的低温环境,对冷藏车的得热量进行分析。蔬菜的冷藏运输温度范围为 0~8℃,计算温度取 4℃。为使计算具有广泛性,式(4)定义了冷藏车的体型系数 H :

$$H=\frac{S}{V}\tag{4}$$

式中: S 为冷藏车的表面积, m^2 ; V 为冷藏车的体积, m^3 ; H 可以表征冷藏车单位体积的得热量, m^{-1} 。体型系数值 H 与冷藏车的体型大小相关,1.5 t 小型冷藏车(例如,福田奥铃 M4 的箱体尺寸为 4 085 mm×2 100 mm×2 100 mm)的 $H=2.39$,10 t 重型冷藏车(例如,东风双桥冷藏车的箱体尺寸为 9 400 mm×2 220 mm×2 050 mm)的 $H=2.09$ 。蔬菜运输过程中,冷藏车单位体积内的能量平衡可由式(5)表示^[15]:

$$m_v c_p dT + Q = [H(T_0 - T) \frac{\lambda}{\delta} + m_v q_0] d\tau\tag{5}$$

式中: T_0 为环境温度,℃; T 为蔬菜温度,℃; m_v 为单位体积内的某蔬菜质量(堆码密度), kg/m^3 ; c_p 为蔬菜比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{℃})$; λ 为保温材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{℃})$; dT 为某蔬菜的温度变化,℃; δ 为冷藏车保温层厚度, m ; Q 为单位体积内的制冷量, J/m^3 ; q_0 为单位质量的蔬菜呼吸热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{s})$; $d\tau$ 为运输时间, s 。对于不同的供冷运输模式,式(5)可以变为不同的形式。假设运输车的保温层 $\lambda=0.08\text{ J}/(\text{m}\cdot\text{℃})$, $\delta=0.06\text{ m}$, $T_0=30\text{ ℃}$, $c_p=3.9\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{℃})$, 蔬菜温升 $dT=2\text{ ℃}$, $m_v=250\text{ kg/m}^3$, $q_0=0.09\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ 。

3.3.1 隔热保温运输碳足迹

保温运输的供冷量 Q 为 0,冷藏车的能量平衡方程由式(5)变为式(6):

$$m_v c_p dT = [H(T_0 - T) \frac{\lambda}{\delta} + m_v q_0] d\tau\tag{6}$$

保温运输过程中,蔬菜依靠自身的蓄冷来维持运输过程的低温,不需要额外的冷量,制冷碳足迹为 0。保温材料选定后导热系数不再变化,一般通过改变保温层厚度来改变总传热系数,蔬菜在不同保温层厚度

下运输时间随温升的变化如图 2 所示。

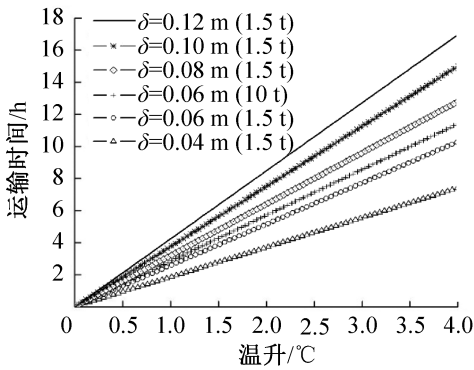


图 2 不同 δ 时蔬菜运输时间随温升的变化
Fig.2 Variation in the transportation time of fruits and vegetables with temperature rise at different δ

由图 2 可知,蔬菜温度升高 2℃ ($\delta=0.06\text{ m}$) 时,1.5 t 小型冷藏车的运输时间为 5.14 h,10 t 重型冷藏车的运输时间为 5.70 h)。随着保温层厚度的增加, $\delta=0.12\text{ m}$ 时 1.5 t 的小型冷藏车运输时间为 8.48 h,运输时间显著增长。在保温层厚度相同时,小型冷藏车 H 较大,单位体积得热量多,保冷运输时间短。冷藏车的体形系数 H 对保冷运输时间的影响较小,保温层厚度是影响运输时间的主要因素。

3.3.2 蓄冷运输碳足迹

1) 蓄冷剂供冷

蓄冷剂的相变温度低于蔬菜温度,因此假设蓄冷运输过程蔬菜温度不变($dT=0\text{ ℃}$),供冷量 Q 为蓄冷剂释放的冷量,蓄冷剂的相变潜热 $L=270\text{ kJ/kg}$,显热可以不计,能量平衡方程由式(5)变为式(7):

$$m_{\text{pcm}} L = [H(T_0 - T) \frac{\lambda}{\delta} + (m_v - m_{\text{pcm}}) q_0] d\tau\tag{7}$$

式中: m_{pcm} 为蓄冷剂质量, kg 。

根据式(7)可得不同运输时间下冷藏车单位体积所需要的蓄冷剂质量,如图 3 所示。

由图 3 可知,在运输时间相同时,蓄冷剂的相变潜热 L 越大,所需蓄冷剂质量越小,相比于 10 t 重型冷藏车,1.5 t 小型冷藏车单位体积需要的蓄冷剂更多。运输时间 60 h ($L=270\text{ kJ/kg}$),每立方米需要约 70 kg 的蓄冷剂提供冷量。

假设蓄冷剂的冷量由制冷设备提供,结合式(1)可计算出制冷设备的耗电量,根据表 1 可知电能的碳足迹为 785 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,计算运输过程中单位质量某蔬菜的供冷碳足迹如图 4 所示。

由图 4 可知,保温层厚度 δ 对供冷碳足迹的影

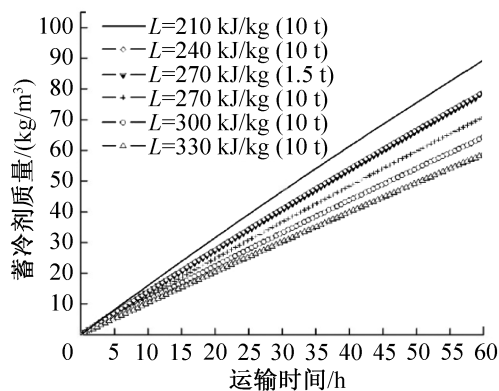


图 3 不同 L 时单位体积的蓄冷剂质量随时间的变化
Fig.3 The mass variation of the cold storage agent per unit volume with the time at different L

响较大,蓄冷剂潜热 L 对供冷碳足迹的影响较小,因为保温层厚度直接影响冷藏车热负荷。碳足迹曲线随着运输时间的增加斜率变大是因为蓄冷剂占用了冷藏车的载重量和空间,减少了运送蔬菜的质量,平均到单位质量蔬菜的碳足迹增速变大(在运输蔬菜质量不变时,供冷碳足迹与运输时间成正比)。

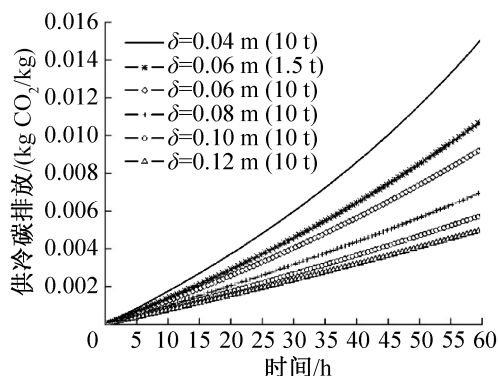


图 4 不同 δ 时单位质量蔬菜的供冷碳足迹随时间的变化
Fig.4 Variation in cooling carbon emissions per unit mass of fruits and vegetables with time for different δ

2) 车辆行驶

假设 1.5 t 小型冷藏车的行驶速度 $v_1 = 60$ km/h, 10 t 重型冷藏车行驶速度 $v_2 = 80$ km/h。根据式(2)的计算结果联立式(6),得到 10 t 重型冷藏车行驶碳足迹 y_1 和运输时间的关系,如式(8)所示:

$$y_1 = 7.510 \times 10^{-5} v_2 \tau \frac{m_v}{\left(\frac{15.65}{\delta} + 81 \right) \tau} \quad (8)$$

$$m_v - \frac{L + 0.324 \tau}{L + 0.324 \tau}$$

根据式(3)结果联立式(6),得到 1.5 t 重型冷藏车行驶碳足迹 y_2 和运输时间的关系,如式(9)所示:

$$y_2 = 2.92 \times 10^{-4} v_1 \tau \frac{m_v}{\left(\frac{17.896}{\delta} + 81 \right) \tau} \quad (9)$$

$$m_v - \frac{L + 0.324 \tau}{L + 0.324 \tau}$$

单位质量蔬菜在车辆行驶过程中的碳足迹如图 5 所示。由图 5 可知,相比于 10 t 重型冷藏车,1.5 t 小型冷藏车运输单位质量蔬菜的碳足迹更多,因为 10 t 重型冷藏车的载重量大,平均到单位质量蔬菜上的碳足迹较小,增加保温层厚度可以减少单位质量蔬菜的行驶碳足迹。

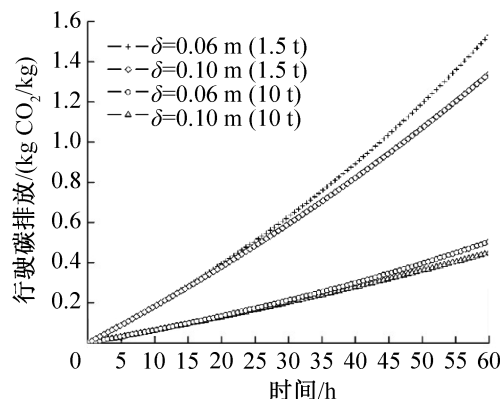


图 5 单位质量蔬菜的行驶碳足迹随运输时间的变化
Fig.5 Variation in driving carbon emissions per unit mass of fruits and vegetables with transportation time

3.3.3 机械制冷运输碳足迹

1) 制冷机供冷

机械冷藏车自身带有制冷机组,独立式制冷机组依靠自带的柴油机驱动制冷,非独立式制冷机组依靠汽车底盘的发动机带动,停车时汽车处于怠速状态供冷。冷藏车制冷机组的运行工况比固定式制冷机组恶劣,因此冷藏车制冷机组的能效低于固定机组,冷藏车制冷系统的 COP 在 0.50~1.75 之间^[23]。冷藏车制冷机的碳足迹来自燃油消耗,制冷量取决于柴油发动机的热效率 η 和制冷系统 COP,可由式(10)计算:

$$Q = m q \eta \text{COP} \quad (10)$$

式中: Q 为制冷量,kJ; m 为燃料质量,kg; q 为燃料热值,kJ/kg; η 为发动机热效率。驱动冷藏车制冷机组的柴油发动机热效率一般为 40%,柴油的单位热值为 43.2 MJ/kg^[23]。

假设制冷运输过程蔬菜温度不变,将式(10)带入式(5),得到制冷运输能量平衡方程,如式(11)所示:

$$m q \eta \text{COP} = [H(T_0 - T) \frac{\lambda}{\delta} + m_c q_0] d\tau \quad (11)$$

根据式(11)计算出不同 COP 下机械冷藏车单位

体积所需要的制冷油耗随时间的变化,由表 1 可知柴油的碳足迹为 3.060 kg CO₂/kg,制冷碳足迹随运输时间的变化如图 6 所示。

由图 6 可知,在相同运输时间下制冷机组 COP 越高,制冷碳足迹越小,制冷机组的 COP 对碳足迹影响较大,选用能效高的机组更环保。

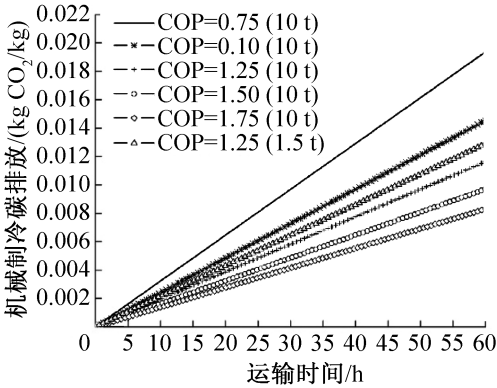


图 6 不同 COP 时制冷碳足迹随时间的变化
Fig.6 Variation in cooling carbon emissions with time at different COP

2) 车辆行驶

不考虑机械冷藏车制冷系统对载荷的影响,车辆行驶碳足迹与式(2)、式(3)相同,10 t 重型冷藏车的行驶碳足迹为 7.510×10^{-5} kg CO₂/(kg·km),1.5 t 小型冷藏车的行驶碳足迹为 2.921×10^{-4} kg CO₂/(kg·km)。

3) 制冷剂泄漏碳足迹

制冷设备对全球变暖的影响约有 20% 来自制冷剂泄漏,不同的使用环境、不同的系统之间泄漏量差别很大。例如,家用冰箱的泄漏量仅为 2%,冷藏车的制冷剂年泄漏量为充注量的 10%~37%^[26]。冷藏车主要使用 R404A 和 R410A 作为制冷剂,R410A 的 GWP=2 060,R404A 的 GWP=3 860。

假设 1.5 t 小型冷藏车的制冷剂(R410A)充注量为 2 kg,10 t 重型冷藏车的制冷剂(R410A)充注量为 5 kg。冷藏车每天行驶 400 km,一年行驶 250 d,每年总行程为 10 万 km,制冷剂泄漏率为 25%,计算得 1.5 t 小型冷藏车的制冷剂泄漏碳足迹为 6.870×10^{-6} kg CO₂/km,10 t 重型冷藏车的制冷剂泄漏碳足迹为 2.575×10^{-6} kg CO₂/km。

3.3.4 运输过程 3 种供冷方式碳足迹分析

保温运输不需要外界提供冷量,运输过程的碳足迹最小,运输时间小于 5 h 应首先考虑保温运输。蓄冷、机械制冷运输的供冷碳足迹随运输时间的变化如图 7 所示。

在一定时间范围内,机械制冷的碳足迹大于蓄冷

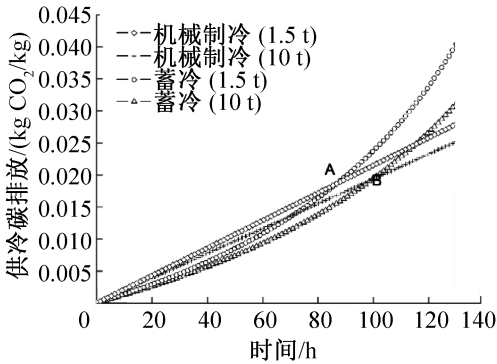


图 7 蓄冷、机械制冷运输的供冷碳足迹随时间的变化
Fig.7 Variation in carbon emissions from cold storage and mechanical refrigeration transportation over time

供冷,这是由于蓄冷的冷量来自地面固定制冷设备,COP 高于运输制冷设备。随着运输时间的增加,曲线相交于 A(横坐标 87 h)、B(横坐标 98 h)点,此时碳足迹量相等,A、B 点之后,蓄冷供冷碳足迹大于机械制冷。

3.4 存储和销售环节碳足迹

储存环节的碳足迹源于制冷设备电耗和制冷剂泄漏,由表 1 可知,批发商和零售商的冷库存储电耗为 0.3 kW·h/(t·d),电排放系数为 785 g/(kW·h),计算得蔬菜冷库存储碳足迹为 2.355×10^{-4} kg CO₂/(kg·d)。

假设冷库容量为 10 t,全年可流通存储 100 t 蔬菜,使用的制冷剂为 R410A,充注量为 10 kg,制冷剂年泄漏量为 10%,计算得冷库存储环节制冷剂泄漏碳足迹为 5.644×10^{-5} kg CO₂/(kg·d)。

由表 1 可知,陈列柜销售阶段每天的能耗为 4.055 kW·h/m²,假设陈列区高度为 0.5 m,蔬菜堆码密度 250 kg/m³,空间利用率 0.4,计算出陈列柜中蔬菜质量为 50 kg/m²,平均到 1 kg 蔬菜碳足迹为 6.366×10^{-4} kg CO₂/d。

根据许茹楠等^[2]的研究可知,消费者储存阶段 1 kg 蔬菜碳足迹为 3.175×10^{-4} kg CO₂/d,冰箱的制冷剂泄漏量很小,忽略不计。

假设蔬菜生命周期内的损耗按 10% 计算,由表 1 可知,每千克蔬菜废弃碳足迹为 4.12×10^{-3} kg。

3.5 某蔬菜冷链各环节碳足迹计算

为了更加直观的分析蔬菜冷链各环节的碳足迹,计算出一条典型的蔬菜冷链碳足迹,如表 2 所示。表 2 说明了冷链各环节在不同时间、活动条件下的碳足迹,作为计算依据。图 8 所示为某蔬菜冷链各环节碳足迹累积及所占比例。

由图 8 可知,1 kg 某蔬菜冷链各环节碳足迹为

0.098 kg,运输环节占总排放的 82%,因为运输过程既包括批发商运输,还包括零售商运输,运输时间长导致行驶碳足迹较大,并且还要维持运输过程的低温环境,制冷系统会产生供冷碳足迹。预冷和存储销售环节的碳足迹量分别占总量的 7%和 6%,碳足迹的来源主要是消耗的电能,消费、废弃阶段的碳足迹占 5%。

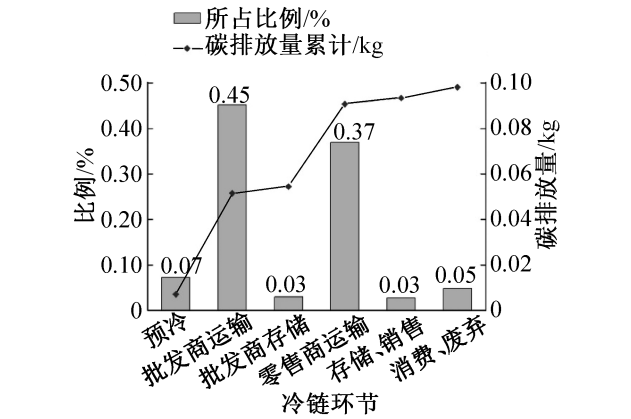


图 8 某蔬菜冷链各环节碳足迹累积及所占比例
Fig.8 Accumulation and percentage of carbon emissions from various links in a fruit and vegetable cold chain

3 结论

本文利用生命周期评估方法计算了某蔬菜冷链各环节的碳足迹,并基于能量平衡方程,研究了不同运输时间下的冷藏运输方式和碳足迹。在此基础上研究了影响运输环节碳足迹的因素,得出如下结论:

- 1) 1 kg 蔬菜的冷链碳足迹为 0.098 kg,其中运输环节的碳足迹最多,占总排放的 82%,选择合适的冷藏运输方式是减少碳足迹的有效途径。
- 2) 对于预冷后的蔬菜,若运输时间在 5 h 内,可以采用隔热车保温运输,增加保温层厚度可以有效延长保冷运输时间,此时的供冷碳足迹为 0。
- 3) 对于蓄冷运输,蓄冷剂的相变潜热 L 越大,所需蓄冷剂质量越小。运输时间 60 h 可以满足国内长途运输需要,相变潜热 $L = 270 \text{ kJ/kg}$ 时,每立方米需要约 70 kg 的蓄冷剂来提供冷量。蓄冷剂会占用冷藏车的载荷,减少蔬菜载重量,增加单位质量蔬菜的行驶碳足迹,保温层厚度 δ 对供冷碳足迹的影响较大。

表 2 蔬菜冷链各环节碳足迹			
Tab.2 Carbon footprint of each link in the fruit and vegetable cold chain			
冷链环节		碳足迹活动数据	时间/h 碳足迹总量/kg
生产商	生产商预冷	30 ℃ 降至 4 ℃	7.144×10^{-3}
批发商	生产商到批发商运输:蓄冷运输 (10 t)	供冷:式(7) 计算 汽车行驶:式(8) 计算	8.280×10^{-4} 4.359×10^{-2}
	批发商存储	$2.355 \times 10^{-4} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{d})$	2.355×10^{-3}
	制冷剂泄漏 (批发商存储)	$5.644 \times 10^{-5} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{d})$	5.644×10^{-4}
零售商	批发商到零售商运输:机械制冷运输 (1.5 t)	供冷:式(11) 计算 汽车行驶: $2.92 \times 10^{-4} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{km})$ 制冷剂泄漏: $6.87 \times 10^{-6} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{km})$	4.300×10^{-4} 3.504×10^{-2} 8.244×10^{-4}
	零售商存储	$2.355 \times 10^{-4} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{d})$	1.649×10^{-3}
	制冷剂泄漏 (零售商存储)	$5.644 \times 10^{-5} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{d})$	3.951×10^{-4}
	陈列柜冷藏销售	$6.366 \times 10^{-4} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{d})$	6.366×10^{-4}
消费者	消费者存储	$3.175 \times 10^{-4} \text{ kg CO}_2 / (\text{kg} \cdot \text{d})$	6.350×10^{-4}
废弃	废弃 (损耗率:10%)	$41.21 \times 10^{-3} \text{ kg CO}_2 / \text{kg}$	4.120×10^{-3}

- 4) 对于机械制冷运输,使用 COP 高的制冷机组更环保,能够大幅减小供冷碳足迹。
- 5) 长途运输时间在 98 h 以内,10 t 冷藏车采用蓄冷供冷的碳足迹小于机械制冷。1.5 t 冷藏车主要用于短途配送,采用蓄冷供冷的碳足迹始终小于机械

- 制冷。但蓄冷的行驶碳足迹始终大于机械制冷,且行驶碳足迹占主要因素。
- 6) 1.5 t 小型冷藏车的行驶碳足迹是 10 t 重型冷藏车的 3 倍多,供冷碳足迹稍高于重型冷藏车,因为两种冷藏车的体形系数 H 相差较小,对供冷碳足迹

的影响较小。

参考文献

- [1] 姜樱梅, 王淑云, 马雪丽. 基于碳优化的农产品冷链物流体系研究[J]. 科技管理研究, 2017, 37(18): 221–227. (JIANG Yingmei, WANG Shuyun, MA Xueli. Research on the cold chain logistics system of agricultural products based on carbon optimization[J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(18): 221–227.)
- [2] 许茹楠, 刘斌, 陈爱强, 等. 我国果蔬冷链碳足迹分析[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 16–21, 28. (XU Runan, LIU Bin, CHEN Aiqiang, et al. Carbon footprint analysis of the cold chain of fruits and vegetables in my country[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 16–21, 28.)
- [3] 刘倩晨. 考虑碳排放的冷链物流研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (LIU Qianchen. Research on cold chain logistics considering carbon emissions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.)
- [4] 李斌, 刘斌, 陈爱强, 等. 基于冷链模式的农产品冷链碳足迹计算[J]. 冷藏技术, 2019, 42(3): 1–5. (LI Bin, LIU Bin, CHEN Aiqiang, et al. Calculation of carbon footprint of agricultural products based on the model of cold chain[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2019, 42(3): 1–5.)
- [5] 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(1): 120–123. (CAI Yiping, ZHANG Wenjuan, ZHANG Shixiang, et al. Carbon footprint calculation of cold chain logistics based on life cycle assessment[J]. Logistics Technology, 2015(1): 120–123.)
- [6] 刘广海, 吴俊章, 游力, 等. 冷链物流系统碳足迹模型构建与实证分析[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 19–25. (LIU Guanghai, WU Junzhang, YOU Li, et al. Construction and empirical analysis of carbon footprint model of cold chain logistics system[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 19–25.)
- [7] 陈静, 王姗, 欧灿英, 等. 生鲜肉类食品供应链碳排放测算及动态优化研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(6): 165–182. (CHEN Jing, WANG Shan, OU Canying, et al. Carbon emission calculation and dynamic optimization of fresh meat food supply chain[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(6): 165–182.)
- [8] 廖晶, 谢如鹤, 塘杰, 等. 荔枝全程冷链物流碳足迹测算分析及实证研究[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 19–29. (LIAO Jing, XIE Ruhe, TANG Jie, et al. The carbon footprint calculation analysis and empirical study of litchi cold chain logistics[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 19–29.)
- [9] BENJAAFAR S, LI Y, DASKIN M. Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99–116.
- [10] CARLSSON-KANYAMA A. Climate change and dietary choices—how can emissions of greenhouse gases from food consumption be reduced[J]. Food Policy, 1998, 23(3/4): 277–293.
- [11] 王智忆, 陆敬筠. 考虑低碳的冷链物流车辆配送路径优化[J]. 科技管理研究, 2017, 37(17): 228–232. (WANG Zhiyi, LU Jingyun. Low-carbon cold chain logistics vehicle distribution route optimization[J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(17): 228–232.)
- [12] 钱光宇. 考虑碳排放的生鲜农产品冷链配送路径优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. (QIAN Guangyu. Research on optimizing the cold chain distribution path of fresh agricultural products considering carbon emissions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.)
- [13] YANG J, GUO J, MA S. Low-carbon city logistics distribution network design with resource deployment[J]. Journal of Cleaner Production, 2016(119): 223–228.
- [14] 任腾, 陈玥, 向迎春, 等. 考虑客户满意度的低碳冷链车辆路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 242–251. (REN Teng, CHEN Yue, XIANG Yingchun, et al. Low-carbon cold chain vehicle path optimization considering customer satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(4): 242–251.)
- [15] 刘斌, 苏芸, 殷辉. 基于供冷能力条件下的农超对接冷链模式探讨[C]//2011 中国制冷学会学术年会论文集. 南京: 中国制冷学会, 2011. (LIU Bin, SU Yun, YIN Hui. Discussion on the cold chain model of agricultural super docking based on cooling capacity conditions[C]//Proceedings of 2011 Annual Conference of Chinese Association of Refrigeration. Nanjing: Chinese Association of Refrigeration, 2011.)
- [16] 高恩元, 荆华乾. 番茄冷链运输保鲜技术研究[J]. 制冷技术, 2014(5): 49–53. (GAO Enyuan, JING Huaqian. Research on the preservation technology of tomato cold chain transportation[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014(5): 49–53.)
- [17] 李慧慧. 考虑碳排放的冷链物流多温共配优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017. (LI Huihui. Research on multi-temperature co-allocation optimization of cold chain logistics considering carbon emissions[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.)
- [18] Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services: PAS 2050:2008[S].

- London: British Standards Institution, 2008.
- [19] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [A]//Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [20] LIN Jianyi, HU Yuanchao, CUI Shenghui, et al. Carbon footprints of food production in China (1979—2009) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 90:97–103.
- [21] Plastic Waste Management Institute. Report on the assessment of the effect of increased use of plastics on the global environment (in Japanese) [R]. Tokyo: Plastic Waste Management Institute, 1993.
- [22] 邱嘉昌, 刘龙昌. 食品冷藏链的节能[C]//第 2 届中国食品冷藏链新设备、新技术论坛文集. 上海:上海冷冻空调行业协会, 2004. (QIU Jiachang, LIU Longchang. Energy conservation in food cold chain [C]//The 2nd China Food Cold Chain New Equipment and New Technology Forum Proceedings. Shanghai: Shanghai Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 2004.)
- [23] TASSOU S A, DE-LILLE G, GE Y T. Food transport refrigeration—approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(8/9):1467–1477.
- [24] ILIC A, STAAKE T, FLEISCH E. Using sensor information to reduce the carbon footprint of perishable goods [J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2009, 8(1): 22–29.
- [25] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京:气象出版社, 2002. (YANG Jianxin. Product life cycle assessment method and application [M]. Beijing: Meteorological Press, 2002.)
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change. Safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

通信作者简介

刘斌,男,教授,天津商业大学机械工程学院,18920197448, E-mail: lbtjcu@tjcu.edu.cn。研究方向:冷链物流技术。

About the corresponding author

Liu Bin, male, professor, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, + 86 18920197448, E-mail: lbtjcu@tjcu.edu.cn. Research fields: cold chain logistics technology.