

文章编号:0253-4339(2023)04-0068-08

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2023.04.068

中国冷链碳排放及低碳技术减排分析

田长青^{1,2} 孔繁臣^{1,2} 张海南¹ 潘洪民^{3,4} 郭风军^{3,4}

(1 中国科学院理化技术研究所 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100049; 3 山东商业职业技术学院 山东省农产品贮运保鲜技术重点实验室 济南 250103; 4 国家农产品现代物流工程技术研究中心 济南 250103)

摘要 人们对生鲜食品品质的追求推动了冷链产业的快速发展,但在冷链扩张过程中,势必会引入大量的冷链设备设施,从而增加能源消耗和制冷剂泄漏,对环境造成负面影响,因此在当前“双碳”目标下,冷链行业的发展面临很大减排压力。本文针对冷链碳足迹中全环节,从制冷剂泄漏、能源消耗和食物损失浪费三个方面计算了碳排放,并对比分析了采用环保制冷剂、能效提升以及低碳能源利用在冷链发展过程中的减排效果。计算结果表明:当前与冷链相关的 CO₂ 排放达 4.02 亿 t,若按照现有技术发展,至 2030 年,冷链碳排放将增至 4.36 亿 t;若采用环保制冷剂、节能技术与低碳能源利用,则我国 2030 年冷链碳排放预计可降至 2.72 亿 t。

关键词 冷链;碳排放;双碳目标;低碳技术

中图分类号:TB61⁺1;TK411⁺.5;U492.3⁺36.4

文献标识码:A

Carbon Emission and Emission Reduction with Low-carbon Technologies in Chinese Cold Chain Industry

Tian Changqing^{1,2} Kong Fanchen^{1,2} Zhang Hainan¹ Pan Hongmin^{3,4} Guo Fengjun^{3,4}

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Shandong Key Laboratory of Storage and Transportation Technology of Agricultural Products, Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan, 250103, China; 4. National Engineering Research Center for Agricultural Products Logistics, Jinan, 250103, China)

Abstract The pursuit of fresh food quality has promoted the rapid development of the cold chain industry. The increase in cold chain equipment and facilities causes excessive energy consumption and refrigerant leakage, which has a negative impact on the environment. The development of the cold chain industry is therefore under pressure to reduce emissions under the current "two-carbon" goal. Considering the carbon footprint of the entire cold chain, this study calculates carbon emissions from three aspects, including refrigerant leakage, energy consumption, and food loss and waste. Emission reduction using environmental-friendly refrigerants, high-efficiency technologies, and low-carbon energy is also analyzed. The calculation results show that the current carbon emissions related to the cold chain are up to 402 million tons and will increase to 436 million tons in 2030 if the cold chain industry is developed with existing technology. However, emissions can decrease to 272 million tons, if environmental-friendly refrigerants, high-efficiency technologies, and low-carbon energy are applied.

Keywords cold chain; carbon emission; dual carbon targets; low-carbon technologies

冷链是指以冷冻及冷藏工艺为基础、制冷技术为手段,使冷链物品从生产、流通、销售到消费者的各个环节中始终处于适宜的低温环境下的特殊供应链。冷链具有保证食品安全品质和减少食品损失的潜力。

中国冷链整体覆盖率仅为 19%,而欧美平均为 95%以上。在中国,供应链中不到 25% 的肉制品和

5% 的水果和蔬菜采用冷藏方式储存,每年造成约 1 200 万 t 水果、1.3 亿 t 蔬菜和 690 万 t 肉类腐败变质^[1]。我国人民对生鲜食品的需求量巨大且不断增长,推动了冷链系统的快速发展。但冷链的快速扩张必然会产生大量的温室气体排放。

刘广海等^[2]提出了一种计算冷链物流碳足迹的系统方法并构建了冷链物流系统碳足迹模型,并

对香蕉全程冷链物流碳足迹问题进行了实证分析。李斌等^[3]利用生命周期评估方法计算了某果蔬不同运输时间下的冷藏运输方式和碳足迹, 研究结果表明, 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。陈静等^[4]计算了生鲜肉类食品供应链的碳排放, 生产、运输、仓储和销售环节中碳排放分别占总供应链的 28.68%、52.37%、8.90% 和 10.04%, 运输环节对全供应链的碳排放贡献率最高。刘倩晨^[5]对冷链各环节的碳排放系数进行了计算, 并在易腐品基本库存模型的基础上引入了碳排放的变量, 建立了包含碳排放的冷链库存模型, 得到低碳目标下的最优库存策略。国际制冷学会模拟分析表明, 将全球所有国家的冷链提升至发达国家的水平, 将使与当前冷链相关的碳足迹减少 47% 以上, 同时避免 55% 的食品损失^[6]。Hu Guangwen 等^[7]借助微生物代谢引起的食品损失与冷链的关联, 选取中国和美国的肉类、牛奶和水产品作为案例研究, 构建系统动态框架来揭示冷链系统内食物损失和能源消耗之间的关系, 结果表明冷链发展有助于减少总碳排放量。Dong Yabin 等^[8]调查了中国冷链配送的蔬菜、水果、肉类和水产品生命周期温室气体排放, 使用基于 1 kg 食用产品的生命周期评估 (life cycle assessment, LCA) 框架, 应用蒙特卡罗模拟来表征模拟的可变性, 并对 22 个参数进行敏感性分析, 结果表明冷库、冷藏运输和零售阶段占农业后冷链排放量的 50% 以上。上述文献已较为全面的概述了各类食品在冷链环节中的碳足迹计算方法, 但仍缺少对当前中国冷链行业的碳排放的宏观分析评估以及中国冷链快速发展和低碳技术带来的碳排放影响。

因此, 本文根据我国冷链发展的实际情况, 针对冷链碳足迹中全过程, 估算了我国冷链行业当前的碳排放, 并分析了采用相关低碳技术对冷链碳减排的作用。

1 计算方法

与食品冷链相关的温室气体排放来自制冷剂泄漏和能源消耗^[9]。目前在冷链设备与设施中广泛采用的氢氯氟烃 (HCFCs) 和氢氟烃 (HFCs) 制冷剂, 其中 HCFCs 破坏臭氧层且为温室气体, 而 HFCs 制冷剂作为温室气体其泄漏会造成很大的碳排放。其次, 冷链设备制冷系统的能耗也会间接导致大量的温室气体排放, 在冷冻冷藏设备与设施中, 能源消耗主要来

自电力消耗, 目前我国冷链物流行业总耗电量保守估计超过 2 000 亿 kW·h^[10]; 在冷藏车中, 目前能源消耗主要来自燃料消耗, 车辆发动机驱动制冷系统。除了制冷剂泄漏和能源消耗外, 食品冷链的温室气体排放还与食品损失和浪费相关^[11]。

因此, 我们将从制冷剂泄漏、能源消耗和食物损失浪费三个方面来计算食品冷链的碳排放。

1.1 食品产量发展

通过对全国水果产量、蔬菜产量数据的分析, 我们发现其增长呈线性趋势, 因此对 2012—2021 年的年产量进行线性拟合, 得出拟合计算公式, 如图 1 所示。其中 R^2 代表拟合程度, 其趋近于 1, 表明拟合度较好。根据拟合公式测算出 2022—2030 年水果和蔬菜产量。

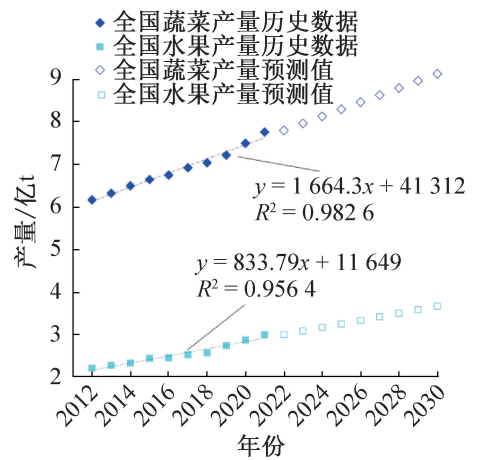


图 1 全国果蔬历年产量及预测值
Fig.1 Yearly fruit and vegetable production and forecast in China

我国目前果蔬预冷率约为 20%, 其中绝大部分是通过冷库进行的, 冷库尚未配置专业化的预冷设施^[12]; 若考虑 2030 年果蔬预冷情况得到改善, 预冷率达到 40%, 则会有近 4.4 亿 t 的果蔬预冷需求。根据国家统计局 2021 年数据和近年的券商研报预测, 2030 年, 我国冷却肉产量为 1 800 万 t, 冷冻肉产量为 1 250 万 t, 低温奶产量为 1 200 万 t, 冷冻饮品为 240 万 t, 速冻米面制品为 1 000 万 t, 冷冻水产品为 750 万 t。

1.2 制冷剂泄漏碳排放及替代制冷剂

考虑食品在全程冷链体系内的碳排放, 冷链环节包括冷加工、贮藏、运输、销售、冷藏消费等多个环节。制冷设备包括预冷设备、动物性食品冷却设备、冷冻设备 (包括速冻设备)、冷库、商业冰柜、家用冰柜冰箱等^[13]。表 1 所示为冷链各环节设备设施目前使用的主要制冷剂及未来的环保制冷剂。

表 1 冷链各环节当前主要制冷剂及未来环保制冷剂

Tab.1 Current main refrigerants and future environmentally friendly refrigerants in the cold chain

冷链环节	冷加工	贮藏	运输	销售	消费
现用主流 制冷剂	R22	R22		R134a	R290
	R404A	R404A		R600a	R134a
	R507A	R507A	R134a	R290	R600a
	NH ₃	NH ₃	R404A	R404A	
		NH ₃ /CO ₂			
替代 制冷剂	NH ₃	NH ₃	HFOs	HFOs	
	CO ₂	CO ₂	HFOs	R600a	R290
	HFOs	HFOs	CO ₂	R290	R600a
			CO ₂		

在全程冷链过程中,冷链装备与设施内部保持满足要求的低温需要制冷系统,其制冷剂充注量主要与冷负荷、制冷剂、系统架构密切相关。例如采用冷风机的 CO₂ 复合制冷系统 1 kW 制冷量需要约 4~8 kg CO₂;采用冷风机的 R404A 直接膨胀系统 1 kW 制冷量需要约 5~8 kg,若采用排管的泵供液系统 1 kW 制冷量需要约 20~30 kg。考虑根据制冷系统不同技术,冷链不同环节现用制冷剂及替代制冷剂的单位制冷量充注量如表 2 所示。

表 2 冷链不同环节现用制冷剂及替代制冷剂的单位制冷量充注量

Tab.2 Charges per unit of refrigeration capacity of currently used refrigerants and alternative refrigerants in different cold chain equipment

环节	制冷剂	单位制冷量充注量
冷加工	R404A	8 kg/kW
	NH ₃ /CO ₂ 复合	4 kg/kW
贮藏	R507A	25 kg/kW
	NH ₃ /CO ₂ 复合	25 kg/kW
运输	R404A	5 kg/辆
	CO ₂	5 kg/辆
销售	R134a/R404A	300 g/台
	R290	180 g/台
消费	R134a	150 g/台
	R600a	75 g/台

采用环保制冷剂后,制冷剂泄漏的减排计算过程:

1) 分析各环节的冷冻冷藏食品质量/制冷设备

数量;

2) 计算各环节所需的制冷量;

3) 根据单位制冷功率的制冷剂充注量/每台设备的充注量计算总充注量;

4) 根据泄漏率计算泄漏量;

5) 用泄漏量×GWP 计算 CO₂e (CO₂ 当量) 排放量;

6) 对比替代前后的排放量,得到环保制冷剂替代的碳减排潜力。

计算过程中,均采用上文提到的 2030 年估算数据。冷库中单位充注量 CO₂ 取 25 kg/kW, R404A 取 25 kg/kW, 冷库单位库容所需制冷量取 60 W/t; 运输环节的数据来源于文献[14];商用柜的制冷剂采用 R404A、R134a 和 R290,目前 R290 使用越来越多,约 60%以上,其次是 R404A 约 20%,最后是 R134a,单台商业冷柜的制冷剂充注量 R134a 取 300 g, R290 取 180 g;制冷剂泄漏率按 10%计算。

1.3 冷链环节能耗碳排放

1.3.1 冷加工环节

冷加工环节中的制冷设备与设施主要有果蔬预冷设备、动物性食品冷却设备与设施、食品冷冻设备与设施,涉及的主要产品有果蔬、冷冻肉、冷却肉、冷冻水产、速冻米面食品、低温奶和冷冻饮品。

张敏等^[15]测定了 35 种常见果蔬的比热容,计算其平均值为 3.275 kJ/(kg·°C),由于果蔬预冷的温度约为从室温(25 °C)降至 5 °C,因此取果蔬冷加工所需提供的冷量为 65.5 kJ/kg。E. G. Murakami 等^[16]测量食品的热物性,并提出了经验公式,结合冷加工过程的食品温度通常是从室温降为 0~4 °C 或 -18 °C,取处理过程中冷却肉所需提供的冷量为 50 kJ/kg,冷冻肉考虑到凝固热,其所需冷量取 260 kJ/kg,低温奶、冷冻饮品、速冻米面、冷冻水产所需冷量分别为 150、400、200、320 kJ/kg。根据上述食品的冻藏所需冷量,再考虑 20%的漏冷等,反推冷加工所消耗的电力等数据。优化冷加工设备系统,选用高效能换热器,预期 2030 年能效提升 10%。

1.3.2 贮藏环节

冷冻冷藏环节设备主要涉及冷库中的制冷机组。中物联冷链委数据显示,2021 年全国冷库容量为 8 205 万 t,冷库平均电耗 0.5 kW·h/(t·d)。

1.3.3 运输环节

中物联冷链委数据显示,2021 年全国冷藏车市场保有量增长至 341 400 辆。S. A. Tassou 等^[17]测算了冷藏车制冷过程中所产生的 CO₂ 排放量,对燃油 R404A 冷藏车和电动冷藏车进行了对比,结合文

中的算法和现有冷藏车及电力碳排放数据得单台电动冷藏车每年将减排 10 t CO₂。表 3 所示为冷藏车每年的碳排放量计算参数^[14,17]。

表 3 冷藏车每年碳排放量计算参数

Tab.3 Calculation parameters of annual carbon emissions of refrigerated vehicles

运输	制冷量/W	EER	折合油/电耗/ [L/(kW·h)]	CO ₂ e 排放/t
燃油车	4 000	1.8	6 000	16
电动车	4 000	2.16	15 000	6

中国物流与采购联合会冷链物流专业委员会数据显示,2019 年我国人均冷藏车保有量为 0.13 台/千人,日本为 1.95 台/千人,美国为 1.76 台/千人。保持现有的年增长速率,2030 年我国冷藏车数量有望达到 100 万辆。

1.3.4 销售环节

冷藏销售环节设备主要包括冷藏陈列柜、生鲜配送柜、冷藏售卖机等。根据产业在线数据,测算我国 2030 年商用冷柜市场保有量将超 1 亿台。根据文献[18]中数据,取平均能耗为 5 kW·h/24 h,最终平均电耗为 1 825 kW·h/(台·a),采用新型节能技术,商业冰柜能耗可降低 10% 以上^[19],2021 年全国电力平均排放因子为 0.583 9 t CO₂/(MW·h)。按照我国能源结构调整目标及发达国家情况,2030 年我国电力平均排放因子可达到 0.4 t CO₂/(MW·h)。

1.3.5 消费环节

冷藏消费环节设备主要有家用冰箱和冰柜。2021 年统计局数据显示我国冰箱保有量超 4.5 亿台,家用冷柜数量超 1 亿台。由于市场的高保有量,因此 2030 年增长率取 10%。

上述环节中提到的设备能耗情况如表 4 所示。

1.4 食品腐损碳排放

根据中物联冷链委相关数据显示,2018 年我国水果、蔬菜、肉类、水产流通腐损率分别达到 11%、15%、12%、11%。对标发达国家的食品流通腐损情况,当采用先进的保鲜技术和完备的冷链体系后,2030 年可将果蔬、肉类、水产腐损率分别降为 8%、5%、6%。

蔬菜、水果、肉类和水产品等农业活动的排放因子来自现有研究。J. Poore 等^[20]研究了食物生产过程中对环境的影响,H. Ritchie 等^[21]据此在牛津大学开发的数据网站平台(Our World in Data)上提供了

表 4 冷链各环节的电耗数据

Tab.4 Power consumption of each link of the cold chain

环节	活动	数据	数据类型
贮藏	冷库	0.5 kW·h/(t·d)	耗电量
运输	燃油货车 (5 t)	6 000 L/台	制冷年油耗
	电动货车 (5 t)	15 000 kW·h/台	制冷年电耗
销售	陈列柜	5 kW·h/(台·d)	耗电量
消费	家用冰箱/冰柜	0.87/1.37 kW·h/(台·d)	耗电量
碳排放 因子	柴油	3 060 g/kg	CO ₂ 排放
		2 630 g/L	CO ₂ 排放
	电耗	583.9 g/(kW·h)	CO ₂ 排放

食物供应链中各食物的温室气体排放量。康有才^[22]总结了废弃果蔬腐烂碳排放经验数值。

表 5 所示为各类食品的生产、填埋、腐烂的碳排放数值^[20-22]。

表 5 各类食品生产、填埋、腐烂的碳排放

Tab.5 Carbon emissions from various types of food production, landfill, and decay

项目	活动	数据
生产	蔬菜生产	260 g/kg
	水果生产	893.1 g/kg
	牛肉生产	45 kg/kg
	羊肉生产	24 kg/kg
	猪肉生产	5.5 kg/kg
	禽类生产	3.5 kg/kg
	水产生产(养殖)	4.5 kg/kg
垃圾处理	填埋处理	41.21 g/kg
	果蔬腐烂	111.2 g/kg

注:数据类型均为当量 CO₂ 排放。

2 计算结果

2.1 制冷剂泄漏碳排放

采用上述计算方法,计算了我国冷链各环节现用制冷剂泄漏的碳排放量、按照现有技术继续发展的冷链制冷剂泄漏碳排放量和采用环保制冷剂替代后的冷链制冷剂泄漏碳排放,结果如表 6 所示。

表 6 冷链不同环节现用制冷剂及环保制冷剂的碳排放量

Tab.6 Carbon emissions of existing and environmentally friendly refrigerants in the cold chain

环节	阶段	制冷剂	制冷剂泄漏量/t	CO ₂ e/万 t
冷加工	当前	R404A	586.25	229.93
	2030 年(无替代)	R404A	1 223.74	479.95
	2030 年(替代)	NH ₃ /CO ₂ 复合	611.87	0.06
贮藏	当前	50% R404A+50% NH ₃ /CO ₂ 复合	6 153.75	2 413.5
	2030 年(无替代)	50% R404A+50% NH ₃ /CO ₂ 复合	11 250	4 412.25
	2030 年(替代)	NH ₃ /CO ₂ 复合	11 250	1.125
运输	当前	R404A	170.7	66.95
	2030 年(无替代)	R404A	500	196.1
	2030 年(替代)	CO ₂	500	0.05
销售	当前	60% R290+20% R134a+20% R404A	720	192.67
	2030 年(无替代)	60% R290+20% R134a+20% R404A	1 200	321.12
	2030 年(替代)	R290	1 800	3.6
消费	当前	20% R134a+80% R600a	1 500	214.5
	2030 年(无替代)	20% R134a+80% R600a	1 650	235.95
	2030 年(替代)	R600a	825	0.25

注:泄漏率按每年 10%计算。

2.2 冷链能耗碳排放

计算了我国冷链各环节现用制冷设备设施能耗的碳排放量、按照现有技术继续发展(无升级)的

2030 年冷链制冷设备设施能耗碳排放量和依照低碳能源发展(升级)的 2030 年冷链制冷设备设施能耗碳排放,如表 7 所示。

表 7 冷链各环节的能耗碳排放数据

Tab.7 Energy consumption and carbon emissions in each link of the cold chain

环节	阶段	电耗/(亿 kW·h)	单位碳排放/ [t CO ₂ /(MW·h)]	CO ₂ e/万 t
冷加工	当前	43.67	0.583 9	254.98
	2030 年(无升级)	88.06	0.583 9	514.16
	2030 年(升级)	66.74	0.4	266.96
贮藏	当前	150.15	0.583 9	876.73
	2030 年(无升级)	274.5	0.583 9	1 602.81
	2030 年(升级)	219.6	0.4	878.4
运输	当前	6 000 L/(台·a)油耗	2 630 g/L	538.73
	2030 年(无升级)	6 000 L/(台·a)油耗	2 630 g/L	1 578
	2030 年(升级)	15 000 kW·h/(台·a)电耗	0.4	600
销售	当前	1 095	0.583 9	6 393.70
	2030 年(无升级)	1 825	0.583 9	10 656.18
	2030 年(升级)	1 642.5	0.4	6 570
消费	当前	1 940	0.583 9	11 327.66
	2030 年(无升级)	2 134	0.583 9	12 460.43
	2030 年(升级)	1 920.6	0.4	682.4

2.3 食品腐损碳排放

通过国家统计局 2021 年的数据以及牛津大学提供的食物碳排放相关数据,可计算得到当前食品腐烂造成的碳排放,结果如表 8 所示。

表 8 当前食品腐烂损失造成的碳排放
Tab.8 Carbon emissions from current food spoilage losses

种类	产量/ 万 t	单位碳 排量/(t/t)	腐损量/ 万 t	CO ₂ e 排 量/万 t
水果	28 629.40	1.002	3 156.16	3 162.48
蔬菜	74 912.90	0.372	14 982.58	5 573.52
牛肉	672.45	45.041	53.79	2 423.02
羊肉	492.31	24.041	39.38	946.85
猪肉	4 113.33	5.541	329.06	1 823.35
禽蛋	3 467.76	3.541	277.42	982.34
水产 ^a	5 226.10	4.541	522.61	2 373.17
水产 ^b	1 322.89	3.041	132.29	402.29
合计				17 687.02

注:a 为养殖,b 为捕捞。

随着冷链发展,势必将降低食品的腐烂损失,按照果蔬、肉类、水产腐损率分别为 8%、5%、6%,表 9 中计算了 2030 年冷链过程相关食品腐烂造成的碳排放。

表 9 未来食品腐烂损失造成的碳排放
Tab.9 Carbon emissions from future food spoilage losses

种类	产量/ 万 t	单位碳 排量/(t/t)	腐损量/ 万 t	CO ₂ e 排 量/万 t
水果	36 662.7	1.002	2 933.016	2 938.88
蔬菜	91 241	0.372	7 299.280	2 715.33
牛肉	672.45	45.041	33.623	1 514.39
羊肉	492.31	24.041	24.616	591.78
猪肉	4 113.33	5.541	205.667	1 139.59
禽蛋	3 467.76	3.541	173.388	613.96
水产 ^a	5 226.10	4.541	313.566	1 423.90
水产 ^b	1 322.89	3.041	79.373	241.37
合计				11 179.23

注:a 为养殖,b 为捕捞。

2.4 碳排放汇总与对比

将上述计算结果进行汇总,如表 10 所示。由表

10 可知,当前与冷链相关的碳排放达到了 4.02 亿 t,若按照现有技术发展我国冷链,虽然能够显著降低食品的腐损,减少生产等过程的碳排放,但与此同时增加了大量的冷链设备设施,使得最终碳排放上升为 4.36 亿 t,不利于我国的双碳目标。如果考虑环保制冷剂替代、能效提升以及低碳能源利用等技术,则 2030 年我国预计冷链有关的碳排放可降至 2.72 亿 t,相较当前碳排放,可减少 1.3 亿 t,相较现有技术发展至 2030 年,可减少 1.64 亿 t。

表 10 各阶段与各方面的冷链碳排放
Tab.10 Cold chain carbon emissions in various stages and aspects

项目	当前	2030 年	
		现有技术	低碳技术
食物腐损	17 687.04	11 179.23	11 179.23
能耗	19 391.81	26 811.56	15 997.76
制冷剂泄漏	3 117.55	5 645.37	6.21
总量	40 196.40	43 636.17	27 183.20

3 结论

冷链系统从制冷剂泄漏、能源消耗和食物损失浪费三个方面造成碳排放,我国冷链物流快速发展,提高易腐食品冷链流通率可减少易腐食品由于腐损造成的浪费以及由其引起的碳排放,但同时为了在全程冷链流通实现低温环境而增加的冷链设备与设施又会需消耗更多的能源,并且会造成更多的制冷剂泄漏。本文计算结果表明,目前我国冷链每年造成的 CO₂ 排放为 4.02 亿 t,按照现有技术发展到 2030 年会增至 4.36 亿 t,而采用低碳技术发展先进冷链物流体系 CO₂ 排放会降至 2.72 亿 t,因此发展完善低碳冷链物流体系可有效降低冷链物流的碳排放,是我国制冷空调行业实现双碳目标的关键因素之一。

因此应推广应用环保制冷剂,减少使用端负荷,提升制冷系统能效,积极利用可再生能源,发展冷热综合利用和自然冷能应用,为我国打造世界领先的先进低碳冷链物流体系,为我国双碳目标做出应有贡献。

本文为周远院士工作站专项经费资助项目(SZ20211166)资助。(The project was supported by the Special Funding Project for Academician Zhou Yuan Workstation (No. SZ20211166).)

参考文献

[1] ZHAO Hongxia, LIU Sheng, TIAN Changqing, et al. An

- overview of current status of cold chain in China[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88: 483-495.
- [2] 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. Carbon footprint of cold chain system and a case analysis [J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 19-25.)
- [3] 李斌, 刘斌, 陈爱强, 等. 基于冷链模式的某果蔬碳足迹计算[J]. *制冷学报*, 2021, 42(2): 158-166. (LI Bin, LIU Bin, CHEN Aiqiang, et al. Calculation of carbon footprint of fruits and vegetables based on cold chain model[J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(2): 158-166.)
- [4] 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. Study on carbon emission measurement and dynamic optimization of fresh meat supply chain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(6): 165-182.)
- [5] 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 considering carbon emission[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.)
- [6] SARR J, DUPONT J L, GUILPART J. The carbon footprint of the cold chain, 7 th Informatory Note on Refrigeration and Food[R]. Paris: International Institute of Refrigeration, 2021.
- [7] HU Guangwen, MU Xianzhong, XU Ming, et al. Potentials of GHG emission reductions from cold chain systems; case studies of China and the United States[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118053.
- [8] DONG Yabin, MILLER S A. Assessing the lifecycle greenhouse gas (GHG) emissions of perishable food products delivered by the cold chain in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 303: 126982.
- [9] BENJAAFAR S, LI Yanzhi, 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] 田长青. 中国战略性新兴产业研究与发展-冷链物流, 冷链物流[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020. (TIAN Changqing. R&D of China's strategic new industries · cold chain logistics [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.)
- [11] KITINOJA L. Use of cold chains for reducing food losses in developing countries[C]//PEF White Paper. The Postharvest Education Foundation(PEF), 2013; No. 13-03.
- [12] 杨天阳, 田长青, 刘树森. 生鲜农产品冷链储运技术装备发展研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(4): 37-44. (YANG Tianyang, TIAN Changqing, LIU Shusen. Technology and equipment for cold-chain storage and transportation of fresh agricultural products[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(4): 37-44.)
- [13] 田长青, 邵双全, 徐洪波, 等. 冷链装备与设施[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021. (TIAN Changqing. Cold chain equipment and facilities[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.)
- [14] WANG Junren, KARAKOC D B, KONAR M. The carbon footprint of cold chain food flows in the United States[J]. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2022, 2(2): 021002.
- [15] 张敏, 钟志友, 杨乐, 等. 果蔬比热容的影响因素[J]. *食品科学*, 2011, 32(11): 9-13. (ZHANG Min, ZHONG Zhiyou, YANG Le, et al. Affecting factors of heat capacity of fruits and vegetables[J]. *Food Science*, 2011, 32(11): 9-13.)
- [16] MURAKAMI E G, OKOS M R. Measurement and prediction of thermal properties of foods [M]//Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems. Dordrecht: Springer Netherlands, 1989: 3-48.
- [17] 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.
- [18] EVANS J A, SCARCELLI S, SWAIN M V L. Temperature and energy performance of refrigerated retail display and commercial catering cabinets under test conditions[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30(3): 398-408.
- [19] 肖杨, 刘小朋. 商用冷柜能效标准及节能技术分析与研究[J]. *冷藏技术*, 2015, 38(4): 8-12. (XIAO Yang, LIU Xiaopeng. The analysis and research of energy efficiency standards and energy-saving technology for commercial refrigerator[J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2015, 38(4): 8-12.)
- [20] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers [J]. *Science*, 2018, 360(6392): 987-992.
- [21] RITCHIE H, ROSER M. Environmental impacts of food production[EB/OL]. (2020-01-01)[2022-08-08]. <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food>.

- [16] RASMUSSEN B P, ALLEYNE A G. Control-oriented modeling of transcritical vapor compression systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126(1): 54-64.
- [17] AMALFI R L, VAKILI-FARAHANI F, THOME J R. Flow boiling and frictional pressure gradients in plate heat exchangers. part 2: comparison of literature methods to database and new prediction methods[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 61:185-203.
- [18] YAN Y Y, LIO H C, LIN T F. Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(6):993-1006.
- [19] COOPER M G. Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling—a wide-ranging examination using reduced properties [J]. Advances in Heat Transfer, 1984, 16: 157-239.
- [20] HUANG Dan, WU Zan, SUNDEN B. Pressure drop and convective heat transfer of Al₂O₃/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89: 620-626.
- [21] GNIELINSKI V. New equations for heat and mass transfer

in turbulent pipe and channel flow [J]. International Chemical Engineering, 1976, 16(2):359-368.

- [22] AMEUR K, AIDOUN Z, OUZZANE M. Modeling and numerical approach for the design and operation of two-phase ejectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 809-818.
- [23] CHEN Guangming, XU Xiaoxiao, LIU Shuang, et al. An experimental and theoretical study of a CO₂ ejector[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(5): 915-921.

通信作者简介

邓建强,男,教授,西安交通大学化学工程与技术学院,029-82668566,E-mail:dengjq@xjtu.edu.cn。研究方向:制冷与热泵技术,高效过程装备设计理论,压缩空气储能技术等。

About the corresponding author

Deng Jianqiang, male, professor, School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82668566, E-mail:dengjq@xjtu.edu.cn. Research fields: refrigeration and heat pump technology, high-efficiency process equipment design theory, compressed air energy storage technology, etc.

(上接第 74 页)

- [22] 康友才. 仓储系统低碳性的综合评价体系研究[D]. 成都:西南交通大学,2012。(KANG Youcai. Research on low-carbon comprehensive evaluation setup of storage system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.)

通信作者简介

田长青,男,研究员,博士生导师,中国科学院理化技术研究所,010-82543696,E-mail: chqtian@mail.ipc.ac.cn。研究方

向:冷链技术与装备、汽车热系统、热泵技术。

About the corresponding author

Tian Changqing, male, research professor, doctoral supervisor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, +86 10-82543696, E-mail: chqtian@mail.ipc.ac.cn. Research fields: cold chain technology and equipment, automobile thermal system, heat pump.