

文章编号:0253 – 4339(2018) 04 – 0013 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2018. 04. 013

我国果蔬冷链碳足迹分析

许茹楠 刘 斌 陈爱强 杨文哲

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘 要 近年来我国冷链物流发展迅速,为顺应节能减排的趋势,量化果蔬冷链对环境的影响,本文采用生命周期评价法分析果蔬冷链生命周期中预冷、贮藏、冷藏运输、销售以及消费等环节的碳足迹,计算每个环节的碳足迹,并以一条典型某蔬菜冷链为例,量化整个生命周期的碳足迹。结果表明:每千克某蔬菜的冷链碳足迹为 0.0413 kg CO_{2eq},冷藏运输阶段贡献最大,占总量的 69%,其次是预冷阶段,占总量的 21%。
关键词 果蔬冷链;温室气体;碳足迹
中图分类号:TS255. 3;X502 **文献标识码**:A

Analysis of Cold Chain Carbon Footprint of Fruits and Vegetables in China

Xu Runan Liu Bin Chen Aiqiang Yang Wenzhe

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

Abstract In recent years, China's cold chain logistics has developed rapidly. To meet the trend of energy saving and emission reduction, and quantify the influence of cold chain on the environment, a life cycle assessment method is used to analyze the carbon footprint of pre-cooling, storage, transportation, sales, and consumption in the cold chain life cycle of fruits and vegetables, and the carbon emission factor for each link is calculated in this paper. A typical vegetable cold chain is taken as an example to quantify the carbon footprint of the entire life cycle. The results show that the cold chain carbon footprint of a vegetable is 0.0413 kg per kilogram of carbon dioxide equivalents. The refrigerated transport stage contributes the most (69%), and it is followed by the precooling stage (21%).
Keywords fruit and vegetable cold chain; greenhouse gases; carbon footprint

随着人们生活水平的不断提高,消费者对食品的品质和安全有了更高的要求,食品冷链技术也在逐步发展。虽然冷链可以提高食品的安全性和新鲜度,但会导致更多能源的消耗和温室气体的排放^[1-2]。2009 年底在哥本哈根会议中,中国政府承诺 2020 年我国单位 GDP CO₂ 排放比 2005 年下降 40% ~ 45%,显然冷链的发展与低碳化经济之间存在一定的矛盾。所以将碳减排引入冷链中,不仅可以减少碳排放,也可以降低企业的成本^[3-4]。生命周期评价法可以评估冷链过程的碳排放,分析食品系统各个阶段的碳足迹,为冷链碳减排提供依据。目前我国尚未出台碳足迹计算的相关标准,开展的有关组织碳足迹、产品碳足迹工作均以国际标准、PAS2050《商品和服务生命周期温室气体排放评价规范》等为依据^[5]。
PAS2050 是目前唯一确定的、具有公开具体的计算方法、以及人们咨询最多的评估产品碳足迹的标

准^[6]。它是建立在生命周期评估(LCA)方法之上的评估商品和服务生命周期内温室气体排放的规范。PAS2050 规定了两种评估方法:企业到企业(B2B)和企业到消费者(B2C)。计算一个 B2C 产品的碳足迹时需要包含产品的整个生命周期,包括原材料的获取、制造、分销和零售、消费者使用、最终废弃或回收等环节^[7]。
果蔬冷链使用制冷技术和设备,通过果蔬采摘后的预冷、冷藏、运输、以及冷藏陈列柜销售等阶段,以保证果蔬品质,降低腐损。但同时产生大量温室气体,对环境和人类的健康造成重大危害。中国是果蔬生产大国,每年消费者对果蔬冷链的需求都在增长,伴随产生的温室气体也逐年增加^[8-9]。为了顺应低碳经济的发展,量化果蔬冷链过程的环境影响,本文采用生命周期评价法来分析果蔬冷链各环节温室气体排放数据。

1 研究方法

冷链系统碳足迹是指食品在原材料获得、低温加工、包装、低温贮藏、运输、配送及冷藏销售等过程中温室气体排放量,用 CO₂ 当量(CO_{2eq})表示。产品生命周期评估是对产品整个生命周期的所有环境影响进行科学、全面的评估,客观地评价和改善产品的环境性能。它是对产品生命全过程实施环境管理的有力工具,也是推行清洁生产的理论基础。一个完整的 LCA 一般包括 4 个步骤,即目标界定、清单分析、影响分析和完善化分析^[10-11]。图 1 所示为产品生命周期评价框架。本文根据 PAS2050 计算果蔬冷链在整个生命周期内(从原材料的获取,到预冷贮存、运输、销售和消费)温室气体排放量^[12]。

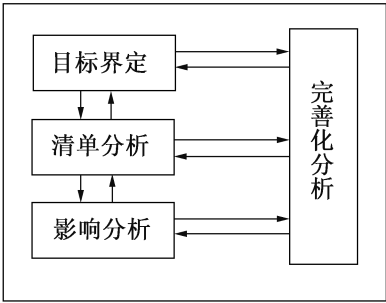


图 1 生命周期评价框架
Fig. 1 Life cycle assessment framework

2 食品冷链碳足迹

2.1 产品选择

本文以我国果蔬为研究对象,进行产品碳足迹核算。由文献[13]全国冷链物流企业分布图 2017 年数据显示:冷库总容量为 36 095 589 吨,冷藏车保有

量为 74 587 辆,其中自有冷藏车为 31 643 辆,企业整合社会冷藏车 42 994 辆^[13]。中国每年果蔬产量巨大,据统计 2014 年总产量达到约 10 亿吨,但由于物流保鲜技术和设备落后,每年冷链流通的果蔬量仅 1.46 亿吨^[14]。据统计,全国每年由铁路调运的易腐货物中能保证用冷藏列车运输的货物占 25%;公路冷运易腐食品占运输总量的 20%;水路冷运易腐货物冷运量占全年水运总量的 1%^[15]。

2.2 评价目标

本文评价目标是量化我国果蔬在冷链全生命周期的温室气体排放,核算食品冷链系统中温室气体排放量最大的生命周期阶段或生产流程,识别果蔬从生产到消费全过程对环境的影响,为企业节能减排降低成本提供数据支持。评价涉及果蔬产品的主要生命周期过程包括:原材料获得、预冷、低温贮藏、运输、配送及冷藏销售。

2.3 功能单位

功能单位是对产品系统输出功能的度量^[4],为研究提供一个可以参考的单位。本文找出果蔬冷链温室气体排放热点,不进行产品间的比较,因此对果蔬农产品生命周期分析时,取每千克果蔬为功能单位。

2.4 系统边界

本文取 B2C 评价模式进行系统边界的划分,如图 2 所示。系统界定的关键原则是:要包括生产、使用及最终处理该产品过程中直接和间接产生的碳足迹。以下情况可排除在边界之外:碳足迹小于该产品总碳足迹 1% 的项目、人类活动导致的碳足迹、消费者购买产品的交通碳足迹、动物作为交通工具时产生的碳足迹(如发展中国家农业生产中使用的牲畜)^[2]。系统内温室气体排放源包括但不限于:能源

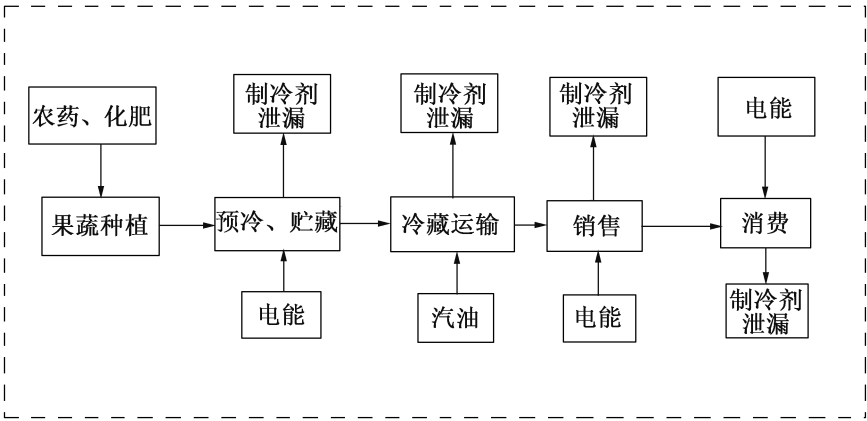


图 2 系统边界
Fig. 2 Research boundary

利用、燃烧过程、化学反应、制冷剂的损失和其他气体的逃逸、运行、土地利用改变、牲畜和其它农业过程、废物^[16]。

2.5 清单分析

清单分析是针对产品生命周期的各个阶段列出其资源、能源消耗及各种废料排放的清单数据^[10]。产品生命周期的碳足迹模型被定义为^[17]：

$$G = G_m + G_{pr} + G_t + G_s + G_c \quad (1)$$

式中： G 为产品生命周期碳足迹； G_m 为原材料获得阶段的碳足迹； G_{pr} 为预冷阶段的碳足迹； G_t 为运输过程的碳足迹； G_s 为使用贮藏和销售阶段的碳足迹； G_c 为消费阶段的碳足迹。

2.5.1 原材料获取阶段

果蔬生产的碳源包括来自农业生产投入的 CO_2 (如化肥、农药等)、来自田地的 CH_4 、化肥应用的 N_2O 包括合成肥料和粪肥以及作物残余物和直接能源(电力、柴油、汽油、煤)产生的 CO_2 。为了使不同的排放源具有可比性,采用全球变暖潜能值(global warming potential, GWP), GWP 计作排放到大气中的 1 kg 温室气体在一段时间(如 100 年)内的辐射效力与 1 kg CO_2 的辐射效力的比值,利用 IPCC2006 的 100 年全球增温潜势系数转换成 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 排放^[18]。GWP 经常用来度量不同温室气体对气候变化的影响。Lin Jianyi 等^[9]研究得到每生产 1 kg 蔬菜的碳足迹为 0.26 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$, 每生产 1 kg 水果的碳足迹为 0.8 931 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$, 间接农业投入的碳足迹占产品生产碳足迹总量的 28% ~ 35%。

2.5.2 产地预冷和贮藏

1) 预冷

预冷是利用低温处理方法将采后果蔬产品的温度(20 ~ 30 °C)迅速降到工艺要求温度(0 ~ 15 °C)的操作过程。预冷通过去除果蔬产品的田间热,降低呼吸强度不仅可以提高果蔬的品质,还可以降低预冷后冷藏车、冷藏船、冷藏库等的冷负荷,实现冷藏储运装置的节能运行^[19-20]。预冷阶段的能耗主要为电能,其碳足迹用电力碳排放因子表示。采用强风(差压)预冷方式,在 2 h 内将果蔬从 30 °C 迅速降到 5 °C,耗电量根据式(2)计算：

$$W = \frac{Qt}{\text{COP}} \quad (2)$$

式中： W 为预冷装置耗电量, kW·h; Q 为果蔬降温所需制冷量, kW; t 为预冷时间, h; COP 为预冷装置能效比。

一般的果蔬比热容以水为计算标准, 为 4.186 kJ/(kg·K), 计算得 1 kg 果蔬从 30 °C 降到 5 °C 被带

走的热量约为 104.65 kJ。COP 取 2.5, 则计算得出 1 kg 果蔬预冷所消耗的电能约为 1.163×10^{-2} kW·h。D. Coley 等^[21]得出 2010 年中国电力碳排放因子为 0.766 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /kW·h, 则 1 kg 果蔬预冷所产生的碳足迹约为 8.9×10^{-3} kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 。

2) 贮藏

S. J. James 等^[22]得出每年单位体积冷库的耗电量为 57.9 kW·h, 换算出冷库每天单位体积的耗电量为 0.158 6 kW·h, 根据冷库设计规范可知：

$$G = \frac{\rho V \eta}{1\,000} \quad (3)$$

式中： G 为冷库贮藏吨位, t; V 为冷库公称容积, m^3 ; ρ 为食品计算密度, kg/m^3 ; η 为冷库容积利用系数; 1 000 为一吨换算成千克的数值, kg/t。

果蔬计算密度取 250 kg/m^3 , 1 000 m^3 以下冷库容积利用系数取 0.4, 计算得出冷库内每千克果蔬的能耗为 6.608×10^{-5} kW·h, 碳足迹为 5.128×10^{-5} kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 。

制冷装置对全球变暖的影响约有 20% 来自制冷剂的泄漏^[22], 制冷剂的泄漏是除电力使用外的第二大碳足迹贡献因素, D. Coulomb^[23]指出每年制冷剂在商业制冷设备上的泄漏量高达 15%。本文采用的制冷剂 R22, 是当前使用较广泛的中低温制冷剂, 常在冷库、食品冷冻、商业制冷、超市陈列展示柜等制冷设备中使用。制冷剂排放的直接影响仅为使用 R22 制冷剂的年总量的 3% ~ 5%^[24]。根据文献可知, 制冷剂每小时泄漏涉及的直接碳足迹为 $(2.055 \sim 3.425) \times 10^{-9}$ kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 。

2.5.3 运输阶段

冷链运输的能耗通过运输工具的油耗来表征, 制冷系统能耗在运输工具总能耗中约占 1/3^[20,25]。制冷系统中消耗的能源为车厢制冷提供能量并承担制冷装置的重量, 因此产生的 CO_2 排放量占总阶段 CO_2 排放量的比例较大。制冷剂在食品运输制冷系统中占有重要地位, 生活水平提高使食品冷藏运输的需求增加, 进而制冷剂的使用增多消耗更多的能源, 导致更多的 CO_2 被排放到大气中。国内货车大多数使用柴油, D. Coley 等^[21]指出柴油的碳排放因子为 0.249 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /(kW·h), 而燃料的能含量为 10.7 (kW·h)/L。该阶段制冷剂泄漏引起的环境影响较小可忽略。

假设冷藏运输车为东风小霸王冷藏车, 车厢尺寸为 4 000 mm × 1 850 mm × 1 800 mm, 总质量 6 495 kg, 额定载质量 2 865 kg (驾驶室准乘人数 2 人), 最高车速 90 km/h。

$$L = \frac{P_0 \cdot \varepsilon \rho}{1\,000} \tag{4}$$

式中^[26]: L 为燃油消耗量, L/h; P_0 为发动机标定功率, kW; ε 为燃油消耗率, g/(kW·h); ρ 为柴油的密度, 取 0.85 g/mL。

已知发动机额定功率为 70 kW, 全负荷最低燃油消耗率为 210 g/kW·h (参考普通发动机参数), 计算可知该冷藏车满负荷时燃油消耗量为 17.29 L/h。满载质量取 2 505 kg (60 kg/人), 计算得单位质量产品的燃油量为 0.002 662 L/h, 对应的碳足迹为 $7.092 \times 10^{-3} \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$ 。

2.5.4 销售和消费

现代超市占商业领域中制冷能源消耗的比例较大, 期间消耗大量的能源产生间接排放, 同时制冷剂泄漏产生直接排放, 对环境有重大影响。

S. A. Tassou 等^[27]研究了 640 家销售面积低于 280 m² 的商店能耗强度 (图 3), 得到每年平均能耗强度为 1 480 kW·h/m², 每年的标准偏差 352 (kW·h)/m²。平均每天的能耗为 4.055 (kW·h)/m², 取陈列区高度为 1.5 m, 根据式 (3) 计算得出销售区能耗为 $1.69 \times 10^{-3} \text{ kW} \cdot \text{h}$, 对应的碳足迹为 $1.295 \times 10^{-3} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ 。

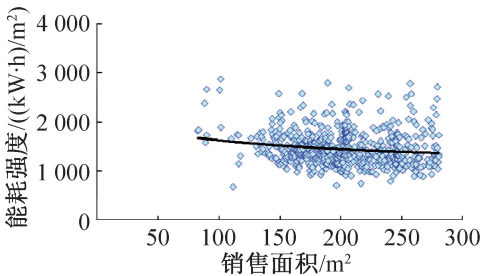


图 3 80 ~ 280 m² 便利店销售区域能耗强度^[27]

Fig.3 Electrical energy intensity of convenience stores of sales area between 80 m² and 280 m²^[27]

图 4 所示为冷冻青豆的总温室气体排放百分比, 其中制冷剂泄漏率为 15%^[27], 且制冷剂泄漏引起的直接碳排放占总能耗的 34%, 计算可得相应的碳足迹为 $4.401 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ 。

表 1 所示为 8 家家用冰箱 24 h 的耗电量, 平均容积为 554.9 L, 即 0.554 9 m³, 平均耗电量为 0.057 5 kW·h, 取冷藏室能耗占总能耗的 1/3, 冷藏容积占总容积的 2/3, 容积系数取 0.5, 根据式 (3) 计算每千克能耗为 $4.145 \times 10^{-4} \text{ kW} \cdot \text{h}$, 对应的碳足迹为 $3.175 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ 。

2.5.5 以一条典型的某蔬菜产品冷链为例计算整个生命周期碳足迹

表 2 所示为 1 kg 某果蔬经过预冷、贮藏、运输、

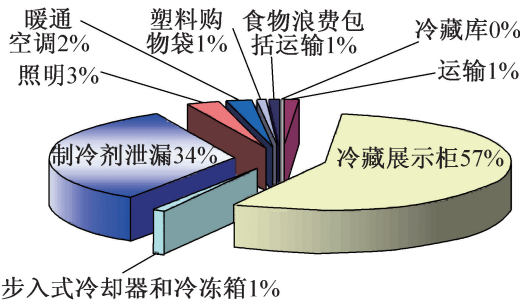


图 4 冷冻青豆的总温室气体排放百分比^[27]

Fig.4 Percentage contributions to total GHG emissions for frozen peas^[27]

表 1 家用冰箱 24 h 的耗电量

Tab.1 The power consumption of domestic refrigerator for 24 h

品牌	容积/L	耗电功率/(kW·h)
伊来克斯 BCD-535 W	535	1.52
博世 KAN56V10TI	570	1.50
三星 RS21HSLPM	554	1.29
西门子 KA62NS60TI	621	1.52
LG GR-B2071GAQ	549	1.48
松下 NR-W56S1	561	1.12
海尔 BCD-551WSY	510	0.98
海尔 BCD-539WT	539	1.66

贮藏、分销以及消费等阶段所产生的碳足迹。其中预冷阶段产生量约为 $8.9 \times 10^{-3} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$, 冷库贮存 (2, 4, 6, 7) 碳足迹约为 $3.725 \times 10^{-3} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$, 运输阶段 (3, 5, 8) 碳足迹约为 $2.836 \times 10^{-2} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$, 消费阶段碳足迹约为 $3.18 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$ 。根据式 (1) 计算整个冷链的碳足迹为 0.041 3 kgCO_{2eq}。

2.5.6 影响分析

本文根据 IPCC、PAS2050 以及查找相关文献得出各阶段碳排放因子, 计算出每千克果蔬产品在其生命周期各阶段的碳足迹。为了更加直观的分析果蔬冷链各环节对环境的影响, 计算出一条典型的某蔬菜产品冷链的碳足迹, 除原材料获取阶段外冷链各阶段碳足迹比例如图 5 所示, 运输阶段的碳足迹占整个冷链的 69%, 其次贡献较大的阶段是预冷, 占总量的 21%, 因为运输消耗的柴油不仅用来承受产品和制冷设备的重量还用来保持车厢内较低的温度。冷库部分碳足迹占总量的 9%。消费阶段的碳足迹仅占总量的 1%。

表 2 一条典型的某 1 kg 蔬菜产品冷链的碳足迹
Tab.2 A typical cold chain carbon footprint of an 1 kg vegetable product

序号	阶段	温度/ ℃	时间/ h	消耗电能 × 10 ⁻⁴ /(kW·h)	制冷剂泄漏的碳 足迹 × 10 ⁻⁸ /kgCO _{2eq}	碳足迹总量 × 10 ⁻³ /kgCO _{2eq}
1	采摘后产地预冷	30 ~ 5	2	116. 300	0. 411 ~ 0. 685	8. 900
2	贮存	4	24	15. 860	4. 932 ~ 8. 220	1. 215
3	运输至分拨中心	5	2	569. 600	—	14. 180
4	贮存	10	16	10. 570	3. 288 ~ 5. 480	0. 810
5	运输至零售商店	5	2	569. 600	—	14. 180
6	贮存	10	8	5. 286	1. 644 ~ 2. 740	0. 405
7	货架销售	7 ~ 12	48	16. 900	57 460	1. 295
8	运输至消费者家中	20	2	—	—	—
9	消费	7 ~ 10	48	4. 145	9. 864 ~ 16. 440	0. 318

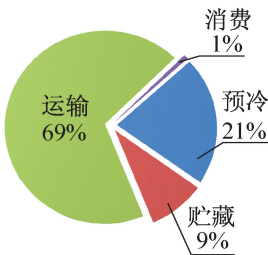


图 5 一条典型的某蔬菜产品冷链的总碳足迹比例
Fig.5 Percentage contributions to total carbon footprint
for a typical vegetable product cold chain

3 结论

本研究根据生命周期评价法,进行目标界定、清单分析以及影响分析这 3 个步骤,分析计算出功能单位果蔬产品各阶段碳足迹,并以一典型某蔬菜冷链为例,详细分析出其生命周期各阶段碳足迹。结果表明:该冷链的碳足迹为0. 041 3 kgCO_{2eq},其中冷藏运输阶段的贡献达 69%,预冷阶段碳足迹达 21%。从评价结果可知,通过开发清洁型燃料和提高预冷设备效率可以有效减少冷链碳足迹,另外利用环境友好型的制冷剂取代氟利昂,可以减少冷链的碳足迹。

本文受天津市教委项目(170018)、天津商业大学人才启动项目(R160117)和武清区科技发展项目(WQKJ201633)资助。(The project was supported by the Foundation of Tianjin Educational Committee(No. 170018), the Research Foundation for Talents of TUC(No. R160117) and the Science and Technology Program of Wuqing District, Tianjin(No. WQKJ201633).)

参考文献

[1] 蒋婷. 碳足迹评价标准概述[J]. 信息技术与标准化, 2010 (11): 15 - 18. (JIANG Ting. Overview of carbon footprint assessment standards[J]. Information Technology & Standardization,2010 (11): 15 - 18.)
[2] 王微,林剑艺,崔胜辉,等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术,2010,33 (7): 71 - 78. (WANG Wei, LIN Jianyi, CUI Shenghui, et al. An overview of carbon footprint analysis[J]. Environmental Science & Technology,2010,33 (7): 71 - 78.)
[3] 王秋,施阳. 认识“碳足迹”倡导低碳生活[J]. 化学教育, 2009,30(3): 5 - 7. (WANG Qiu, SHI Yang. Knowing carbon footprint and advocating low-carbon life[J]. Chinese Journal of Chemical Education, 2009, 30 (3): 5 - 7.)
[4] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30 (6): 155 - 160. (ZHENG Xiujun, HU Bin. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30(6): 155 - 160.)
[5] 陈展展. 各国碳足迹评估工作概览及其启示[C]//经济发展方式转变与自主创新;第十二届中国科学技术协会年会(第一卷). 北京:中国标准化协会,2010. (CHEN Zhanzhan. Overview of international carbon footprint assessments and its enlightenment[C]//Economic development mode transformation and independent innovation;the 12th annual meeting of the China association of science and technology(the first volume). Beijing:China Association for

- Standardization, 2010.)
- [6] PAS2050: 2008 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范 [J]. 山东纺织经济, 2012 (10): 89. (PAS2050: 2008 specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services [J]. Shangdong Textile Economy, 2012 (10): 89.)
- [7] 罗运阔, 周亮梅, 朱美英. 碳足迹解析 [J]. 农林经济管理学报, 2010, 9(2): 123 – 127. (LUO Yunkuo, ZHOU Liangmei, ZHU Meiyong. On carbon footprint [J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2010, 9(2): 123 – 127.)
- [8] PATTARA C, RUSSO C, ANTRODICCHIA V, et al. Carbon footprint as an instrument for enhancing food quality: overview of the wine, olive oil and cereals sectors [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(2): 396 – 410.
- [9] 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.
- [10] 席德立, 彭小燕. LCA 中清单分析数据的获得 [J]. 环境科学, 1997, 18(5): 84 – 87. (XI Deli, PENG Xiaoyan. The list analysis data in LCA [J]. Environmental Science, 1997, 18(5): 84 – 87.)
- [11] 于曼, 彭万贵, 葛大兵. “碳足迹”计算方法初探 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (19): 11708 – 11710. (YU Man, PENG Wangui, GE Dabing. Preliminary study on the calculation method of "carbon footprint" [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39 (19): 11708 – 11710.)
- [12] 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.)
- [13] 中冷联盟. 全国冷链物流企业分布图 [EB/OL]. (2017 – 05 – 05) [2017 – 08 – 12]. <http://www.lenglianwuliu.org.cn;8099/news/details.html?newsId=991>. (China cold alliance. National cold chain logistics enterprise distribution map [EB/OL]. (2017 – 05 – 05) [2017 – 08 – 12]. <http://www.lenglianwuliu.org.cn;8099/news/details.html?newsId=991>.)
- [14] 金玮玲, 程薇, 史德芳, 等. 果蔬冷链物流保鲜市场现状及发展趋势 [J]. 湖北农业科学, 2016, 55 (5): 1235 – 1238. (JIN Weiling, CHENG Wei, SHI Defang, et al. Current situation and development tendency of fresh fruit and vegetable cold chain logistics market [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(5): 1235 – 1238.)
- [15] 常丽娜, 韩星. 我国果蔬冷链物流建设现状及发展建议 [J]. 中国果菜, 2015, 35(2): 5 – 10. (CHANG Lina, HAN Xing. Present situation and suggestions of cold chain logistics of fruits and vegetables in China [J]. China Fruit & Vegetable, 2015, 35(2): 5 – 10.)
- [16] SPECIFICATION P A. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services: PAS 2050: 2011 [S]. London: BSI British Standards, 2011: 580.
- [17] HE Bin, WANG Jun, DENG Zhongqiang. Cost-constrained low-carbon product design [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9/10/11/12): 1821 – 1828.
- [18] AMSTEL A V. IPCC 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. Arlington: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [19] 张仁堂, 董海洲, 乔旭光, 等. 现代果蔬物流中冷链技术集成创新研究 [J]. 世界农业, 2007 (9): 47 – 49. (ZHANG Rentang, DONG Haizhou, QIAO Xuguang, et al. Integrative innovation of cold storage chain technologies in modern logistics of fruit and vegetable [J]. World Agriculture, 2007(9): 47 – 49.)
- [20] 申江, 杨萌. 食品冷链的技术发展 [J]. 包装工程, 2015, 36(15): 1 – 8. (SHEN Jiang, YANG Meng. Technological development of food cold chain [J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 1 – 8.)
- [21] COLEY D, HOWARD M, WINTER M. Local food, food miles and carbon emissions: a comparison of farm shop and mass distribution approaches [J]. Food Policy, 2009, 34 (2): 150 – 155.
- [22] JAMES S J, JAMES C. The food cold-chain and climate change [J]. Food Research International, 2010, 43 (7): 1944 – 1956.
- [23] COULOMB D. Refrigeration and the cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improving health and environment [J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(8), 413 – 417.
- [24] CALM J M. Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(3): 293 – 305.
- [25] 山田悦久, 西嶋春幸, 松井秀也, 等. 小型货车用喷射式冷冻机 [J]. 制冷技术, 2010, 30(2): 35 – 39. (ETSU-HISA Y, HARUYUKI N, HIDEYA M, et al. Ejector system for small truck refrigerators [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2010, 30(2): 35 – 39.)

(下转第 25 页)

[12] 施晓清, 李笑诺, 杨建新. 低碳交通电动汽车碳减排潜力及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 385–394. (SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, YANG Jianxin. Research on carbon reduction potential of electric vehicles for low-carbon transportation and its influencing factors[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 385–394.)

[13] 刘广海, 谢如鹤. 冷藏车热性能及能耗分析模型的建立与实验研究[J]. 制冷学报, 2008, 29(3): 47–53. (LIU Guanghai, XIE Ruhe. Heat condition and energy consumption model and experimentation on refrigerator car [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(3): 47–53.)

[14] BEKTAS T, LAPORTE G. The pollution-routing problem [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(8): 1232–1250.

[15] HAYASHI K. Life cycle assessment for sustainable agricul-

ture: recent trends and applications[J]. Physical Review Letters, 2012, 62(8): 897–900.

[16] 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.

通信作者简介

屈睿瑰,女,副教授,广州城市职业学院,(020) 39366822, E-mail: 64855316@qq.com。研究方向:冷藏运输装备优化与设计,食品冷链物流安全品质与监控。

About the corresponding author

Qu Ruigui, female, associate professor, Guangzhou City Polytechnic, + 86 20-39366822, E-mail: 64855316@qq.com. Research fields: optimization and design of refrigerated transport equipment, safety quality and monitoring of food cold chain.

(上接第 18 页)

[26] 陈宝坤, 缪士中. 关于汽车运行燃料消耗量计算的探讨[J]. 交通运输研究, 1991(4): 5–7. (CHEN Baokun, LIAO Shizhong. Discussion on calculation of fuel consumption in running[J]. Transportation Research, 1991(4): 5–7.)

[27] TASSOU S A, GE Y, HADAWAY A, et al. Energy consumption and conservation in food retailing[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(2): 147–156.

通信作者简介

刘斌,男,教授,天津商业大学,天津市制冷技术重点实验室, 15822518582, E-mail: lbtjcu@tjcu.edu.cn。研究方向:食品冷链技术。

About the corresponding author

Liu Bin, male, professor, Tianjin Key Lab of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, + 86 15822518582, E-mail: lbtju@tjcu.edu.cn. Research fields: food cold-chain technology.