

蒋璐,汪瑞,刘蓓蓓.食品消费模式的碳足迹差异研究[J].中国环境科学,2023,43(12):6755~6762.

Jiang L, Wang R, Liu B B. Differences in carbon footprint of food consumption patterns [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6755~6762.

食品消费模式的碳足迹差异研究

蒋璐¹,汪瑞¹,刘蓓蓓^{1,2*} (1.南京大学环境学院,污染控制与资源化研究国家重点实验室,江苏 南京 210023; 2.南京大学—约翰斯·霍普金斯大学中美文化研究中心,江苏 南京 210093)

摘要: 为研究食品消费模式的碳足迹差异,基于生命周期评价方法,以水饺为例,评估了家庭手工、速冻零售、连锁经营和个体经营四类消费模式在运输、加工、包装、存储与烹饪环节的碳足迹差异.结果表明,水饺不同消费模式整体碳足迹由低到高分别为:家庭手工(1.85 kg CO₂e/kg,下同)、市内连锁(1.86)、省内连锁(1.89)、速冻零售(1.96)、个体经营(1.96)和邻省连锁(1.97).其中运输环节碳足迹差异显著(2.13%~7.80%),速冻零售模式最高,连锁经营模式在中央厨房设置合理时展现出减排优势.此外,讨论了不同消费模式的食物损失与浪费环节碳足迹差异.研究指出,分片区设置中央厨房与配送中心、优化运输路径,减少全过程的食物损失与浪费等,将是居民食品消费系统碳减排的有效发力点.

关键词: 碳足迹; 食物系统; 生命周期评价; 食物损失与浪费

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)12-6755-08

Differences in carbon footprint of food consumption patterns. JIANG Lu¹, WANG Rui¹, LIU Bei-bei^{1,2*} (1.State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2.The Johns Hopkins University-Nanjing University Center for Chinese and American Studies, Nanjing 210093, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6755~6762

Abstract: To analyze the carbon footprints of different food consumption patterns, taking dumplings as study objects, a life cycle assessment (LCA) from “cradle to table” was used to evaluate the carbon footprint of four consumption patterns, namely, home-made, frozen retail, chain-store operation and individual operation. The carbon footprints of transportation, storage, processing, packaging, distribution sectors were estimated. Results showed that, the carbon footprints of different dumplings’ consumption patterns increase in sequence from homemade (1.85, kg CO₂e/kg, the same below), chain-store operation (intra-city) (1.86), chain-store operation (cross-city) (1.89), frozen retail (1.96), individual operation (1.96), to chain-store operation (cross-province) (1.97). The carbon footprint of transportation sector varied widely (2.13%~7.80%), with the frozen retail pattern reaching the highest, while the chain-store operation pattern being the lowest when central kitchens for centralized distribution were reasonably well established. The study also explored the discrepancy in the carbon footprints of food waste and loss across different consumption patterns. It is suggested that establishing regional central kitchens and distribution centres, optimizing transportation routes, and reducing food loss and waste throughout the entire process will be key points to reduce carbon emissions in the residential food consumption system.

Key words: carbon footprint; food systems; life cycle assessment (LCA); food loss and waste

全球食物系统造成约三分之一的温室气体排放^[1],仅食物系统的排放就可能阻碍《巴黎协定》将全球升温限制在比工业化前水平高 1.5°或 2℃以内的目标的实现^[2],是温室气体减排战略的关键点.中国是全球食物系统碳排放量最大国家之一,2015 年食物系统温室气体排放量达 2.4Gt CO₂e^[1],碳减排潜力巨大.如何在保障粮食安全的前提下推动食物系统减排与可持续性转型,是当前食物系统面临的主要挑战^[3].

鉴于居民消费能力的快速增长,食品消费成为碳排放增长的主要驱动因素,从消费端减少食品碳排放对于实现碳中和目标至关重要^[4].现有食物系

统消费端的减排策略主要强调饮食结构转型的贡献^[5],然而食品消费模式改善也为食物系统消费端减排提供了潜在机遇.研究发现,消费选择行为改变如选择当地新鲜食物^[6]、购买高效生产的食物以提高消费效率^[7]具有较好的减排效果.通过比较餐包和杂货店食品的碳足迹,发现尽管餐包的包装增加了温室气体排放,但由于其流水线生产、直接面向消费者的供应链模式和减少的食物浪费,单位温室气

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72174085);江苏自然科学基金资助项目(BK20221448)

* 责任作者,教授, Lbeibei@nju.edu.cn

体排放量比杂货店食品减少了 33%^[8]。此外,减少供应链上的食物浪费是食物系统减排的重要战略^[2]。研究发现超过 55% 的预期气候变暖可以通过消费模式改变以及消费者和零售层面减少食物浪费等行动来避免^[9]。尽管已有研究讨论了消费模式关键环节改变的碳减排效益,但在针对食品在不同消费模式的整体碳足迹定量研究方面尚不充分,尚无同类食品不同消费模式的横向并列比较研究,难以为消费层面碳减排策略制定提供系统性科学支撑。本研究将探究不同食品消费模式在运输、加工、包装、存储与烹饪环节的碳足迹差异及其减排潜力。水饺作为历史悠久、广受欢迎的中国传统美食,包含主食、蔬菜与肉类,营养结构丰富,且可作为一份整体餐食,基本覆盖常见的食品消费模式,因此具有较好代表性。目前水饺的消费模式主要有家庭手工、速冻零售、连锁经营和个体经营四类。本研究将以“从摇篮到餐桌”的系统边界进行生命周期评价,探究水饺不同消费模式的碳足迹差异,旨在从餐饮行业与消费者的层面提出可能的减排方案。

1 数据与方法

1.1 研究边界

以“从摇篮到餐桌”为系统边界,核算家庭手工、速冻零售、连锁经营以及个体经营四类消费模式的水饺在系统边界内的碳足迹,包括原料生产、运输、存储、加工、包装及烹饪环节,不考虑消费者的食物浪费、厨余垃圾与排泄(图 1)。家庭手工模式中,原料从区域配送中心或批发市场运输至超市/菜市场存储、零售,消费者采购后运输、存储和烹饪。速冻零售模式中,原料从供应市场运输至水饺加工厂进行生产加工与包装,并运输至超市零售,消费者采购后运输、存储及烹饪。连锁经营模式中,原料从供应市场运输至中央厨房进行集中生产,而后运输至连锁门店进行存储、烹饪和零售,最后消费者前往门店用餐。该环节的确定参考了行业典型龙头企业的运作模式——经中央厨房加工后将成品与半成品配送至门店。个体经营模式中,原料从区域配送中心或批发市场运输至超市或菜市场零售,个体经营者进行运输、存储、烹饪和零售,最后消费者前往用餐。

功能单位为 1kg 消费者所获得的白菜猪肉水饺。根据调研结果,设置水饺中面粉、白菜与猪肉的

比例为 4:3:3。由于调料相关数据的缺失,且考虑到调料在水饺中成分占比相对较少,本研究选择忽略水饺中调料的碳足迹。白菜猪肉水饺广受欢迎且营养结构丰富,因此具有较好代表性。假设不同消费模式水饺的原料在农业投入环节相同。

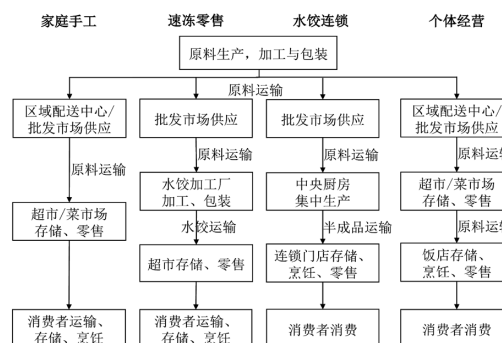


图 1 不同水饺消费模式的研究框架

Fig.1 Framework of different dumpling consumption patterns

1.2 数据来源与处理

不同消费模式系统边界内各环节碳排放因子数据(表 1)以及食物损失与浪费数据(表 2)均从文献中获得。鉴于中国在原料和餐饮烹饪方面的食物损失率数据的缺失,本文采用了部分国际数据。考虑到全球范围内包括超市、批发市场和零售商在内的零售阶段食物损失率的区域异质性很小^[10],本文使用了美国的原料零售损失率。此外,通过对中国消费损失率、英国餐饮烹饪损失率以及消费损失率的比例换算,获得了中国餐饮烹饪损失率,但这种方法引入了一定误差。运输距离、机器功率、存储时间等数据通过调研获取,具体见 1.3 节。

特别需要说明的是连锁经营模式运输距离数据采用基于 Python 爬虫的网络信息爬取获得,该模式主要采用中央厨房的配送模式,具有独立的场所用于集中制作成品或半成品,并利用其成熟的物流系统将其配送至各门店,具有较高生产效率和资源利用效率,可有效节约劳动力和生产空间^[11],近年来在全世界成为食品行业的新趋势^[12]。研究选取如意馄饨作为连锁经营案例。如意馄饨作为中式快餐连锁的龙头企业,中央厨房模式发展成熟,具有良好代表性。连锁门店相关数据来源于高德地图。通过网络信息爬取采集全国如意馄饨门店信息,数据节点截至 2022 年 6 月,并对不符合要求的数据进行筛选,筛选后共计获得 1521 条数据。门店分布情况如图 2 所示。

表 1 生命周期内各环节碳排放因子数据

Table 1 Carbon emission factors of each link in the life cycle

碳排放因子	数值	文献来源
猪肉生产碳排放因子 (kg CO ₂ eq / kg)	2.15	[13]
白菜生产碳排放因子 (kg CO ₂ eq / kg)	0.0480	
面粉生产碳排放因子 (kg CO ₂ eq / kg)	0.576	
常温车辆运输碳排放因子 [g CO ₂ eq / (kg·km)]	0.0372	[14]
冷藏车辆运输碳排放因子 [g CO ₂ eq / (kg·km)]	0.0818	
1.5t 小型冷藏车制冷剂泄漏碳排放因子 (10 ⁻⁶ kg CO ₂ eq / km)	6.87	[15]
10t 重型冷藏车制冷剂泄漏碳排放因子 (10 ⁻⁶ kg CO ₂ eq / km)	2.58	
汽车排放因子(g CO ₂ eq / km)	178.6	[16]
电瓶车排放因子(g CO ₂ eq / km)	69.6	
加工单位质量肉类碳排放因子 (kg CO ₂ eq / kg)	1.11	[17]
加工单位质量蔬菜碳排放因子 (kg CO ₂ eq / kg)	0.0558	
加工单位质量粮食碳排放因子 (kg CO ₂ eq / kg)	0.893	
全国电网排放因子 [kg CO ₂ eq / (kWh)]	0.581	[18]
陈列柜碳排放系数 [10 ⁻⁴ kg CO ₂ eq / (d·kg)]	6.37	
消费者储存阶段碳排放因子 [10 ⁻⁴ kg CO ₂ eq / (d·kg)]	3.18	[15]
塑料包装碳排放系数 (kg CO ₂ eq / kg)	1.69	

表 2 生命周期内各环节食物损失与浪费数据

Table 2 Food loss and waste rate of each link in the life cycle

名称	数值(%)	文献来源
猪肉农业生产损失率	1.22	[20]
猪肉收获后处理损失率	1.01	
猪肉存储损失率	0.89	
猪肉分销损失率	1.70	
白菜农业生产损失率	13.61	[21]
白菜收获后加工损失率	26.18	
白菜分销损失率	3.19	
猪肉零售损失率	4.38	[22]
白菜零售损失率	13.97	
面粉零售损失率	12.00	
面粉运输损失率	1.20	[23]
面粉加工损失率	3.10	
白菜运输损失率	5.29	[24]
消费者猪肉浪费率	10.25	[25]
消费者蔬菜浪费率	16.79	
消费者面食浪费率	10.21	
餐饮烹饪食物浪费率	21.00	[26]
消费阶段食物浪费率	34.00	

为探究连锁经营模式中中央厨房设置与运输距离差异的碳足迹影响,选取门店分布清晰、范围广的武汉中央厨房为研究对象,共包含 378 家门店.将门店划分成三个片区:武汉市内门店 166 家、湖北省内(除武汉市)门店 69 家以及邻省(陕西、四川、重庆、湖南、江西与河南)门店 143 家,分别为市内片区、省内片区与邻省片区,门店分布情况如图 3 所示.假设配送时配送车辆单次配送 1 家门店,考虑车辆回程.在 ArcGIS 中计算武汉中央厨房到各片区的平均距离.武汉中央厨房到市内片区的平均距离为 26.16km,到省内片区的平均距离为 158.88km,到邻省片区的平均距离为 517.75km.

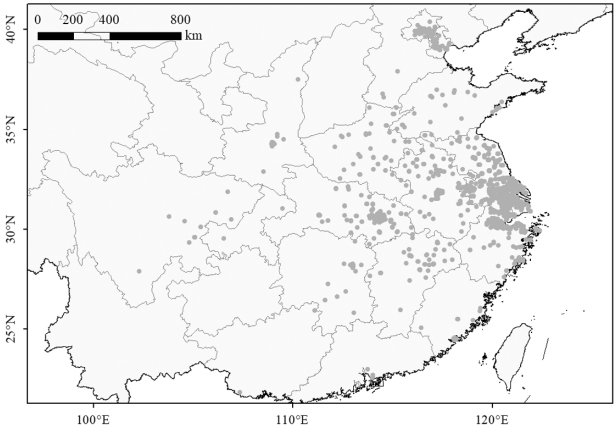


图 2 如意馄饨门店分布情况

Fig.2 Distribution of Ruiyi wonton stores

底图审图号 GS(2019)1822 号,下同

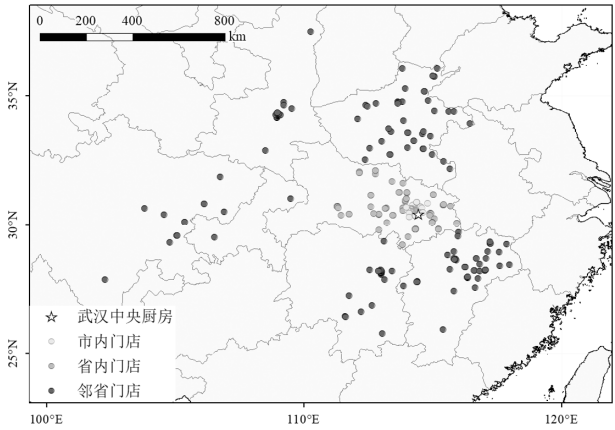


图 3 武汉中央厨房配送门店分布情况

Fig.3 Distribution of stores delivered by Wuhan central kitchen

1.3 碳足迹核算方法

食品不同消费模式碳足迹核算涉及生产、运

输、加工、包装、存储与烹饪阶段.生产阶段碳足迹主要来源于制造排放、场地排放、机械排放、电力运输、肠道发酵以及粪便管理.运输环节碳足迹主要包括生产商、供应商、零售商与消费者之间的配送过程中产生的碳排放量,考虑运输所消耗的能源(汽油、柴油与电力)以及冷链运输中的制冷剂泄漏.加工环节碳足迹来源于负责原料加工(切菜、绞肉、和面、包制)的专业设备所消耗的电力.包装环节碳足迹考虑食品所用包装材料的潜在碳排放.存储环节碳足迹考虑制冷设备所消耗的能源以及制冷剂泄漏.烹饪环节碳足迹考虑烹饪所消耗的能源与现场排放.

在系统边界内,食物损失与浪费涵盖运输损失、零售损失与加工损失.其中,运输损失包括原料在运输过程中的腐败与溢出;零售损失涵盖了未销售部分和因超市/菜市场存储不当导致的原料腐败,以及连锁经营与个体经营模式中由于需求预估过高导致的原料浪费;加工损失指在对原料进行加工时因切割、去皮、去骨等处理而产生的废弃物.

各阶段具体碳足迹核算方式如下:

(1)原料生产阶段碳排放

原料生产阶段的碳排放的计算公式如下:

$$C_p = E_p \cdot m_p \quad (1)$$

式中: E_p 为单位原料生产阶段碳排放因子,kg CO₂eq/kg; m_p 为生产阶段原料重量,kg.

(2)运输阶段碳排放

原料运输阶段的碳排放计算公式如下:

$$C_t = E_t \cdot m_t \cdot d_t + E_r \cdot d_t \quad (2)$$

式中: E_t 为运输车辆碳排放因子,kg CO₂eq/(kg·km); m_t 为运输阶段原料重量,kg; d_t 为运输距离,根据潘佳玲^[27]的研究,供应商到加工配送中心的平均距离为103.33km,加工配送中心到零售商的平均距离为80km; E_r 为制冷剂泄露碳排放因子,kg CO₂eq/km.猪肉、白菜、速冻水饺、中央厨房水饺使用冷藏车运输,面粉使用常温车运输.

消费者、经营者出行碳排放计算公式如下:

$$C_v = E_j \cdot d_v \cdot \theta_j + E_k \cdot d_v \cdot \theta_k \quad (3)$$

式中: E_j 为汽车排放因子,kg CO₂eq/km; E_k 为电瓶车排放因子,kg CO₂eq/km; d_v 为出行距离,原料采购平均距离为1.36km^[28],消费者消费出行距离为

0.45km^[29]; θ_j 为汽车出行概率; θ_k 为电瓶车出行概率.消费者原料采购出行电瓶车占比为10%,汽车占比为20%,其余为步行或自行车,不产生碳排放;经营者原料采购出行电瓶车占比为10%,汽车占比为60%^[30].

(3)加工阶段碳排放

连锁经营中央厨房的加工阶段的碳排放计算公式如下:

$$C_q = E_e \cdot \left(\frac{m_1}{V_1} \cdot W_1 + \frac{m_2}{V_2} \cdot W_2 + \frac{m_3}{V_3} \cdot W_3 \right) \quad (4)$$

式中: m_1 为切菜机加工的白菜重量,kg; m_2 为绞肉机加工的猪肉重量,kg; m_3 为和面机加工的面粉重量,kg; V_1 为切菜机生产能力,为200kg/h; V_2 为绞肉机生产能力,为350kg/h; V_3 为和面机生产能力,为112.5kg/h; W_1 为切菜机功率,为0.75kW; W_2 为绞肉机功率,为2.2kW; W_3 为和面机功率,为2.2kW; E_e 为全国电网排放因子,kg CO₂eq/(kW·h).以上数据均通过调研相关机器说明书获得.

水饺加工厂的加工阶段碳排放计算公式如下:

$$C_f = C_q + E_e \cdot \frac{m_4}{V_4} \cdot W_4 \quad (5)$$

式中: m_4 为水饺机加工的水饺重量,kg; V_4 为水饺机生产能力,为400kg/h; W_4 为水饺机功率,为1.75kW.以上数据均通过调研相关机器说明书获得.

基于功率和时间的基础假设是计算耗电量的常见方法,然而在实际情况中存在一定偏差.不充分考虑设备功率变化和待机时间可能导致对耗电量的高估,例如设备在启动阶段需要较高功率,而在正常运行期间功率可能降低.另一方面,忽略辅助设备和周边设备功率贡献则会低估耗电量.

(4)包装阶段碳排放

速冻水饺的塑料包装的碳排放计算公式如下:

$$C_a = E_a \cdot m_a \quad (6)$$

式中: E_a 为塑料包装碳排放系数,kg CO₂eq/kg; m_a 为塑料包装重量,根据实验测量,1kg 速冻水饺的塑料包装重量为0.06kg.

(5)存储阶段碳排放

超市/菜市场存储白菜和猪肉阶段的碳排放计算公式如下,面粉常温保存:

$$C_m = E_s \cdot m_m \cdot t_m \quad (7)$$

式中: E_s 为陈列柜碳排放系数,kg CO₂eq/(d·kg); m_m :超

市/菜市场存储原料重量(白菜与猪肉),kg; t_m 为超市/菜市场平均存储时间,为 0.76d^[8]。

速冻零售、个体经营、家庭手工储存阶段的碳排放计算公式如下:

$$C_s = E_s \cdot m_s \cdot t_s \quad (8)$$

式中: m_s 为水饺重量,kg; t_s 为速冻水饺平均存储时间,d.假设水饺店存储原料平均时间为 1d;超市存储速冻水饺平均时间为 10d;消费者存储原料平均时间为 1d,存储速冻水饺平均时间为 10d.由于存储环节碳排放在全生命周期内占比很小,数据假设对结果的影响可忽略不计。

(6) 烹饪阶段碳排放

烹饪阶段的碳排放计算公式如下:

$$C_o = E_5 \cdot m_5 + E_6 \cdot m_6 + E_7 \cdot m_7 \quad (9)$$

式中: E_5 为加工单位质量白菜碳排放因子,kg CO₂eq/kg; m_5 为白菜重量,kg; E_6 为加工单位质量猪肉碳排放因子,kg CO₂eq/kg; m_6 为猪肉重量,kg; E_7 为加工单位质量面粉碳排放因子,kg CO₂eq/kg; m_7 为面粉重量,kg。

2 结果与分析

2.1 不同消费模式总体碳足迹差异

消费者获得 1kg 白菜猪肉水饺的碳足迹从低到高分别为:家庭手工、市内连锁、省内连锁、速冻零售、个体经营和邻省连锁(图 4)。市内连锁碳足迹很低,表明中央厨房模式在运输距离适当的情况下具有良好的减排潜力.此外,速冻零售相比其他消费模式运输距离较长、所使用的塑料包装材料较多,因此即使速冻零售产生的食物损失与浪费最少,总体碳足迹仍然较大。

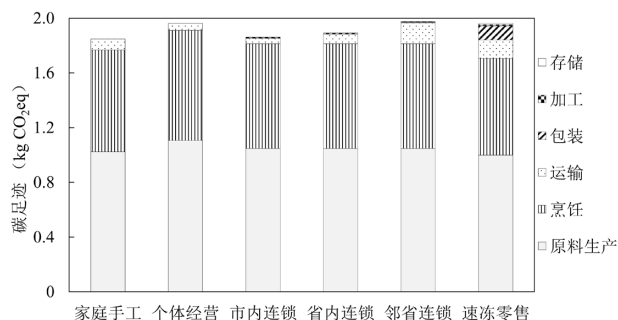


图4 不同消费模式的碳足迹差异

Fig.4 Differences in the carbon footprint of different consumption patterns

不同消费模式的水饺各环节碳足迹占比具有明显差异(图 5),尽管绝大部分的碳排放是从原料生产与烹饪阶段产生.家庭手工运输(4.33%)与存储(0.05%)环节产生的二氧化碳占比很小.类似的,个体经营模式的原料生产(56.34%)与烹饪(41.02%)环节产生了系统边界内绝大部分的碳排放.市内连锁、省内连锁和邻省连锁运输环节碳足迹差异较大,分别为 2.13%、3.73%和 7.80%.与其他模式相比,速冻零售原料生产(50.86%)与烹饪(36.07%)环节的碳足迹占比较低,运输(6.89%)与包装(5.17%)的环境影响不容忽视.此外,由于速冻零售的冷链环节更长、存储时间更久,存储环节碳足迹显著高于其他几类消费模式。

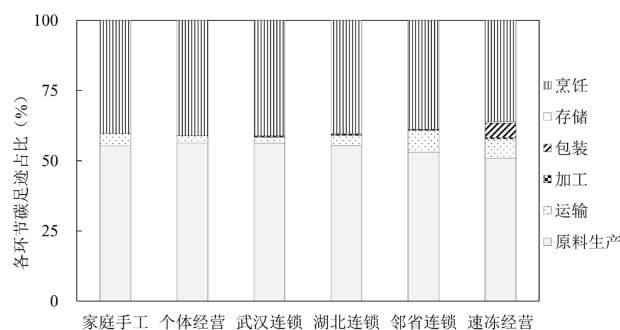


图5 不同消费模式的各环节碳足迹占比

Fig.5 Share of carbon footprint by segment for different consumption patterns

2.2 不同消费模式运输环节碳足迹差异分析

为清晰直观地了解水饺的不同运输方式对环境造成的影响差异,假设系统边界内不发生食物损失与浪费,分别计算 4 种类型水饺的碳足迹.结果表明,不同类型水饺在运输环节碳足迹的差异显著,从低到高分别为市内连锁、个体经营、省内连锁、家庭手工、速冻零售以及邻省连锁(图 6)。

市内连锁经营运输碳足迹最小,这意味着当中央厨房设置合理时,连锁门店集中配送的模式具有一定优越性.一般来说,连锁门店的配送车辆载货量高,且根据门店坐标进行配送路径优化,因此可提升配送效率并产生较少运输碳足迹.但配送路程的增加会减少这种优势。

速冻零售的运输路程最长,因此其运输碳足迹最大.此外,配送距离越长,对存储冷冻条件要求就更高,所需投入的资源提高也将带来更多的碳排放。

此外,家庭手工水饺的运输距离最短,但碳排放并不低,这是由于相比水饺店的集中大规模采购,消费者个体出行行为具有较高碳足迹。

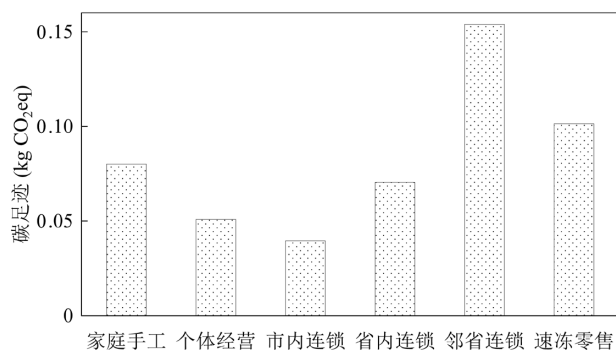


图6 水饺不同运输方式的碳足迹差异

Fig.6 The difference of the carbon footprint of dumplings with different transportation patterns

2.3 不同消费模式食物损失与浪费环节碳足迹差异分析

不同消费模式的水饺在食物损失与浪费环节的碳足迹具有显著差异,在总量的占比从低到高分别为速冻零售(6.07%)、家庭手工(9.69%)、连锁经营(12.04%~13.61%)与个体经营(16.55%)。

速冻零售模式在食物损失与浪费方面表现最佳,因其直接与供应商签订采购协议避免了零售环节的损失,同时全覆盖的冷链系统也进一步减少了损失。

个体经营模式的食物损失与浪费最为严重,其中除了运输和加工损失外,超市/菜市场的零售损失和备货冗余导致的零售损失也是主要原因。由于商品过期、存储条件不佳、库存过多、质量问题以及不适当的库存周转等因素^[31],超市/菜市场的零售阶段不可避免地产生食物损失。此外,预测需求并据此进行备货可以有效减少零售损失,但许多餐馆经营者由于负担能力问题和商业资源的缺乏而难以利用相关技术进行创新^[32]。

运输环节的食物损失对碳排的影响相对复杂,冷链可以通过延长食品保质期来减少食物损失带来的碳排放,但是冷链自身的能源消耗与制冷剂泄漏也会产生碳排放^[33],因此在使用冷链以减少食物损失的同时,需对其产生的碳排放进行系统权衡。研究表明,在当前的食品需求水平下,减少食物损失所产生的碳排放超过了冷链扩张过程中能源消耗增

加所产生的碳排放。如果中国的肉类、牛奶和水产品冷链实现全覆盖,可使其碳足迹分别减少约51.93%、3.16%和84.17%^[33]。因此,大力推广绿色、节能、低碳的冷链物流可以通过减少运输环节的食物损失来达到减少碳排放的效果。

2.4 减排建议

2.4.1 减少食物损失与浪费 《中华人民共和国反食品浪费法》于2021年4月29日起正式实施,表明减少食物浪费、保障粮食安全的重要地位。食品消费在生命周期各阶段均伴随着严重的食物损失和浪费,因此需在每个阶段采取措施以减少这种损失和浪费,从而降低食品消费碳足迹。以世界资源研究所发表的《减少粮食损失和浪费:制定全球行动议程》报告为基础^[34],结合水饺全生命周期的食物损失与浪费特征,可能的减排路径如下:

(1)原料存储条件改善,减少收获后损失。提供清洁、凉爽、干燥的存储条件;采用低成本的储存和处理技术,防止变质并延长货架寿命^[34]。

(2)运输路径优化,冷链引入,减少运输损失。利用技术创新改善信息流动优化食品运输;引入节能、清洁、低碳的冷链。

(3)超市、菜市场库存管理优化。完善温度管理、产品处理和库存周转;优化库存管理系统,并增加供应商合同的灵活性。

(4)餐饮经营者合理预测消费需求。根据历史趋势进行库存管理;减少生产过剩,并重新利用多余食物^[34]。

目前解决食物损失与浪费问题还存在一些障碍。许多政府机构的职能与食物损失或浪费密切相关,但部门间协调仍需加强^[23]。

2.4.2 分片区设置中央厨房与配送中心、优化运输路径 不同运输方式的碳足迹差异显著,减排潜力较大。原料运输与连锁门店配送可以通过运输路径优化与配送中心选址优化减少运输成本与碳排放。在条件允许的情况下,分片区设置中央厨房或配送中心、建立多层次的配送网络^[35],可以显著减少配送路程与碳排放,实现经济效益和环境效益的统一。

然而在物流配送路径优化设计中,考虑碳足迹的路径的总成本往往要高于不考虑碳足迹的情况^[35-36],考虑碳排放需要付出一定的经济成本,因此需要政策进行调控。政府应加强企业监管,提高企业

的绿色物流意识;考虑出台一系列补贴政策,鼓励企业主动将碳排放因素考虑在配送路径选择中。

2.4.3 选择环保的烹饪方法、燃料和炊具 液体或气体燃料在大多数情况下比固体燃料更环保。此外,改进炊具的性能、改进预处理工艺和回收利用也可以增加烹饪环节的环境效益^[37]。

2.4.4 包装的减量化、绿色化与循环利用 在保证食物质量在运输和存储的过程中不下降的情况下,建议减少包装的使用量;使用绿色、环保、易降解的包装材料;建立包装盒回收机制等。

2.4.5 消费者低碳生活 作为保护环境的主体,消费者应提高环境保护意识,将低碳出行和节约粮食贯彻到日常生活中。此外,社会媒体应加强反对食物浪费的宣传力度,促进社会规范改变,使节约粮食成为一种社会公德。

3 结论

3.1 水饺不同消费模式碳足迹从低到高分别为:家庭手工(1.85,kg CO₂eq/kg,下同)、市内连锁(1.86)、省内连锁(1.89)、速冻零售(1.96)、个体经营(1.96)和邻省连锁(1.97)。原料生产与烹饪环节产生大部分的碳排放,其次是运输环节。食物损失与运输方式是造成碳足迹差异的两个重要因素。

3.2 运输环节碳足迹具有显著差异,从低到高分别为市内连锁(0.04)、个体经营(0.05)、省内连锁(0.07)、家庭手工(0.08)、速冻零售(0.10)以及邻省连锁(0.15)。结果表明,当中央厨房设置合理时,连锁门店集中配送的模式具有一定优越性。

3.3 因食物损失与浪费而产生的碳足迹占比从低到高分别为速冻零售(6.07%)、家庭手工(9.69%)、水饺连锁(12.04%~13.61%)、个体经营(16.55%)。各环节食物损失与浪费减排潜力较大。

3.4 运输路径优化、配送中心选址优化、分片区设置中央厨房或配送中心、建立多层次的配送网络可有效减少运输环节碳足迹。政府应推广绿色、节能、低碳的冷链物流,考虑出台补贴政策,鼓励企业主动将碳排放因素考虑在配送路径选择中。减少食物损失与浪费具有较好减排潜力:改善原料存储条件,减少原料损失;优化运输路径,引入冷链,减少运输损失;优化超市、菜市场库存管理;餐饮经营时合理预测订单需求;进行有效的食物回收。此外,需推动包装减量

化、绿色化与循环使用,推广环保烹饪方法、燃料和炊具,以及鼓励消费者低碳生活。

参考文献:

- [1] Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions [J]. *Nature Food*, 2021,2(3):198–209.
- [2] Clark M A, Domingo N G G, Colgan K, et al. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5degrees and 2degrees C climate change targets [J]. *Science*, 2020,370(6517):705–708.
- [3] Putman B, Thoma G, Burek J, et al. A retrospective analysis of the United States poultry industry: 1965 compared with 2010 [J]. *Agricultural Systems*, 2017,157:107–117.
- [4] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(2):141–155.
- [5] Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers [J]. *Science*, 2018,360(6392):987–992.
- [6] Li X, Ouyang Z, Zhang Q, et al. Evaluating food supply chain emissions from Japanese household consumption [J]. *Applied Energy*, 2022,306:118080.
- [7] Schanes K, Giljum S, Hertwich E. Low carbon lifestyles: A framework to structure consumption strategies and options to reduce carbon footprints [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,139:1033–1043.
- [8] Heard B R, Bandekar M, Vassa B, et al. Comparison of life cycle environmental impacts from meal kits and grocery store meals [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019,147:189–200.
- [9] Ivanovich C C, Sun T, Gordon D R, et al. Future warming from global food consumption [J]. *Nature Climate Change*, 2023,13(3):297–302.
- [10] FAO. Global Food Losses and Waste: Extent, Causes and Prevention [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- [11] Luan C, Zhang M, Fan K, et al. Effective pretreatment technologies for fresh foods aimed for use in central kitchen processing [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021,101(2):347–363.
- [12] 蔡永峰.中央厨房与餐食工业化 [J]. *食品与发酵工业*, 2016,42(12): 249–251.
Cai Y F. Central kitchen and industrialized meals [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016,42(12):249–251.
- [13] Xu X, Lan Y. A comparative study on carbon footprints between plant- and animal-based foods in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,112:2581–2592.
- [14] 缪小红,周新年,倪 川,等.基于生命周期法的生鲜农产品供应链碳足迹分析 [J]. *兰州文理学院学报(自然科学版)*, 2021,35(1):24–29.
Miao X H, Zhou X N, Ni C, et al. Comparative analysis of carbon footprint of fresh agricultural products based on LCA [J]. *Journal of Lanzhou University of Arts and Science(Natural Sciences)*, 2021,35(1): 24–29.
- [15] 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 B, Liu B, Chen A Q, et al. Calculation of carbon footprint of fruits and vegetables based on cold chain model [J]. *Journal of Refrigeration*,

- 2021,42(2):158-166.
- [16] 马 静,柴彦威,刘志林.基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理 [J]. 地理学报, 2011,66(8):1023-1032.
- Ma J, Chai Y W, Liu Z L. The mechanism of CO₂ emissions from urban transport based on individuals' travel behavior in Beijing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(8):1023-1032.
- [17] 吴 燕,王效科,逯 非.北京市居民食物消费碳足迹 [J]. 生态学报, 2012,32(5):1570-1577.
- Wu Y, Wang X K, Lu F. The carbon footprint of food consumption in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012,32(5):1570-1577.
- [18] 生态环境部应对气候变化司.《关于做好 2022 年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》解读 [EB/OL]. [2022-03-15]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202203/t20220315_971493.shtml. Department of Climate Change, Ministry of Ecology and Environment. Interpretation of the notice on key work related to the management of enterprise greenhouse gas emission reporting in 2022 [EB/OL].[2022-03-15].https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202203/t20220315_971493.shtml.
- [19] 王志慧,王洪涛,黄 娜,等.纸塑铝复合包装材料的碳足迹评价与认证 [J]. 环境科学研究, 2012,25(6):712-716.
- Wang Z H, Wang H T, Huang N, et al. Carbon footprint assessment and certification of Al-PE-Pa complex package [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012,25(6):712-716.
- [20] Wang R, Liu G, Zhou L, et al. Quantifying food loss along the animal products supply chain in China with large-scale field-survey based primary data [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2023,188: 106685.
- [21] Lu S, Cheng G, Li T, et al. Quantifying supply chain food loss in China with primary data: A large-scale, field-survey based analysis for staple food, vegetables, and fruits [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2022,177:106006.
- [22] Heller M C, Keoleian G A. Greenhouse Gas Emission Estimates of US Dietary Choices and Food Loss [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015,19(3):391-401.
- [23] Liu J, Lundqvist J, Weinberg J, et al. Food Losses and Waste in China and Their Implication for Water and Land [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(18):10137-10144.
- [24] Duran-Sandoval D, Duran-Romero G, Lopez A M. Achieving the Food Security Strategy by Quantifying Food Loss and Waste. A Case Study of the Chinese Economy [J]. *Sustainability*, 2021,13(21):12259.
- [25] 朱 强,李 丰,钱 壮.全国高校食堂食浪费概况及其外卖碳足迹研究——基于 30 省(市)30 所高校的 9660 份问卷调查 [J]. 干旱区资源与环境, 2020,34(1):49-55.
- Zhu Q, Li F, Qian Z. A survey of canteen food waste and its carbon footprint in universities national wide [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020,34(1):49-55.
- [26] Filimonau V, Uddin R. Food waste management in chain-affiliated and independent consumers' places: A preliminary and exploratory study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,319:128721.
- [27] 潘佳玲.基于碳足迹的生鲜农产品供应链网络优化研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- Pan J L. Study on the optimization of fresh agricultural products supply chain network based on carbon footprint [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [28] Zhong T, Si Z, Crush J, et al. The Impact of Proximity to Wet Markets and Supermarkets on Household Dietary Diversity in Nanjing City, China [J]. *Sustainability*, 2018,10(5):1465.
- [29] 田少龙.基于 POI 数据的合肥中心城区餐饮业空间格局实证研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- Tiao S L. An empirical study on the spatial pattern of catering industry in the central city of Hefei based on POI data [D]. Hefei :Hefei University of Technology, 2020.
- [30] 孟海洋.基于多源数据的城市菜市场空间多层次分析与优化研究——以大连市沙河口区为例 [D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- Meng H Y. Multi level analysis and optimization of urban vegetable market space based on multi-source data——taking Shahekou district of Dalian as an example [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [31] Bilska B, Piecek M, Kolozyn-Krajewska D. A Multifaceted Evaluation of Food Waste in a Polish Supermarket-Case Study [J]. *Sustainability*, 2018,10(9):3175.
- [32] Filimonau V, De Coteau D A. Food waste management in hospitality operations: A critical review [J]. *Tourism Management*, 2019,71:234-245.
- [33] Hu G, Mu X, Xu M, 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.
- [34] Flanagan K, Kai R, Hanson C. Reducing Food Loss and Waste: Setting a Global Action Agenda [R]. Washington, DC: World Resources Institute, 2019.
- [35] 何黄慧.连锁门店集中配送时空特征及路径选择碳排放情景研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- He H H. Research on the temporal and spatial organizational characteristics of centralized distribution of chains stores and the carbon emissions scenarios of route choices [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2020.
- [36] Wang S, Tao F, Shi Y. Optimization of Location-Routing Problem for Cold Chain Logistics Considering Carbon Footprint [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018,15(1):86.
- [37] Xu Z, Sun D W, Zhang Z, et al. Research developments in methods to reduce carbon footprint of cooking operations: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015,44(1):49-57.

作者简介: 蒋 璐(2000-),女,江苏常州人,南京大学硕士研究生,主要从事农食系统的可持续管理研究.发表论文 1 篇.1056912735@qq.com.