

不同包装方式对包装熟食米饭中碳足迹影响

周盛楠, 徐中岳, 朱志伟, 孙大文, 王启军

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510641; 华南理工大学现代食品工程研究中心, 广东省冷链食品智能感知与过程控制工程技术研究中心, 广东广州 510006)

摘要: 气候变暖已成为全球面临的严重问题, 各国均积极应对。食品体系产生大量温室气体, 其碳足迹已成为研究热点。本研究依据产品碳足迹全生命周期评价标准, 从单元操作角度计算不同包装(真空、空气和气调包装)操作工艺碳足迹。主要研究结论如下: 包装 200 g 熟食米饭, 在真空包装和空气包装条件下, 最终碳足迹为: 34.05 ± 0.01 g CO₂eq 和 57.94 ± 0.01 g CO₂eq。气调包装条件为 40% O₂+20% CO₂+40% N₂、50% O₂+20% CO₂+30% N₂、60% O₂+20% CO₂+20% N₂ 和 70% O₂+20% CO₂+10% N₂ 时, 最终碳足迹分别为: 214.39 ± 0.26 g CO₂eq, 220.53 ± 0.26 g CO₂eq, 224.76 ± 0.55 g CO₂eq 和 230.58 ± 0.52 g CO₂eq。研究发现使用塑料制品带来的碳排放最终碳足迹中占较高比例, 并且气调包装中使用气体产生的最终碳足迹占比较高。敏感性分析显示, 包装过程中碳足迹对塑料制品排放因子是敏感的; 空气及气调包装过程中碳足迹对设备排放因子变化以及电力使用效率变化是稳定的, 而真空包装过程对两者敏感。可通过减少使用塑料制品, 降低产品最终碳足迹。

关键词: 碳足迹; 真空包装; 空气包装; 气调包装

文章编号: 1673-9078(2017)7-213-219

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.7.031

Effects of Different Packaging Methods on the Carbon Footprint of Cooked Rice

ZHOU Sheng-nan, XU Zhong-yue, ZHU Zhi-wei, SUN Da-wen, WANG Qi-jun

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; Academy of Contemporary Food Engineering, South China University of Technology, Engineering and Technological Research Centre of Guangdong Province on Intelligent Sensing and Process Control of Cold Chain Foods, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Global warming has become a serious problem facing the international community, and all countries strive to deal with it. The food system produces a large amount of greenhouse gases (GHGs), and thus study of the carbon footprint (CF) in the food industry has become a hot topic. Based on the lifecycle assessment (LCA) method, the CFs of different packaging processes of cooked rice were calculated in the present study from the prospective of unit operations. The results showed that the final CFs of packaging 200 g of cooked rice were 34.05 ± 0.01 , 57.94 ± 0.01 , 214.39 ± 0.26 , 220.53 ± 0.26 , 224.76 ± 0.55 , and 230.58 ± 0.52 g carbon dioxide eq under vacuum packaging, air packaging, and modified-atmosphere packaging conditions (40% oxygen+20% carbon dioxide+40% nitrogen, 50% oxygen+20% carbon dioxide+30% nitrogen, 60% oxygen+20% carbon dioxide+20% nitrogen, and 70% oxygen+20% carbon dioxide+10% nitrogen), respectively. The carbon emissions from plastic products contributed the majority of the final CF, and the final CF produced by the gases used in modified atmosphere packaging accounted for a high proportion. In addition, sensitivity analysis showed that the final CF during the packaging process was sensitive to plastic emission factors. For air packaging and modified-atmosphere packaging, CF was stable to the changes of originally applied equipment emission factors and the efficiency of electricity use, but for vacuum packaging, CF was sensitive to both of these factors. The results indicated that the final CF of a product could be reduced by decreasing the use of plastic products.

Key words: carbon footprint; vacuum packaging; air packaging; modified atmosphere packaging

收稿日期: 2017-03-29

基金项目: 广东普通高校国际暨港澳台合作创新平台 (2015KGJH2001); 农产品保鲜物流共性技术创新团队 (2016LM2154); 广州市科技计划 (201604020057)

作者简介: 周盛楠 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程专业, 食品工程研究

通讯作者: 王启军 (1972-), 男, 讲师, 主要从事食品发酵及食品冷冻技术方面研究

目前, 全球进入工业化时代, 生产生活过程中排放大量温室气体, 产生全球温室效应, 威胁人类生存。

各国需通力协作,积极应对温室效应^[1]。各温室气体对温室效应有不同程度的贡献,CO₂产生的温室效应占人为温室气体产生的温室效应总量的78.7%^[2],因此在计算温室气体排放量时,需将其换算成CO₂当量质量。为了形象而准确地衡量产品、服务的温室气体排放对气候及人类活动的影响^[3],Wiedmann^[4]提出碳足迹定义:一种活动或一个产品全生命周期中的各阶段累计造成的二氧化碳总量,用二氧化碳物理质量(如kg、t)表示。有研究表明,全球食品体系所产生的碳排放约占人为排放总量的33%^[5]。目前中国食品行业快速发展,但该行业总体工业化水平低,效率低下,所以需要建立低碳食品体系,改变生产模式,使得从田间到餐桌的整个过程中,不可再生能源使用量、碳排放量最小化^[6],从而减低碳排放。监控食品生产中各个环节的碳排放,跟踪其碳足迹,可以有效针对某环节进行工艺技术改革,降低碳排放总量。

食品体系繁复庞杂,环节众多,使得计算整体碳排放难以实现,因此目前的研究多集中于产品生产过程中的碳足迹^[7,8],较少涉及操作过程中碳足迹。食品体系包括多个主要单元操作,如加热单元和灭菌单元等,以其为研究对象,研究碳排放,可以为食品全生命周期(从田园到餐桌及食品垃圾的处理)的研究提供基础数据,减轻工作强度,并且在一定程度上保证了结果的有效性和准确性。有研究从单元操作角度,比较了传统浸渍冻结方法和新兴的超声辅助冷冻法的碳足迹^[9],得出超声辅助冷冻方式是较环保冷冻方式,给企业改进生产工艺提供便捷。

包装是食品生产加工过程中必不可少的一环,包装方式一般有真空包装、空气包装和气调包装。其中应用较为广泛的包装方式为真空包装,有研究显示气调包装有提高多种食品储存品质,延长货架期等优势^[10,11]。随着人们生活节奏的加快,快餐食品变得越来越流行,而米饭是中式快餐中重要组成部分^[12],市场上常见的盒饭产品为空气包装。因此,本文以200g熟食米饭作为对象,研究在真空包装、空气包装和气调包装等不同包装方式过程中的碳足迹。

1 材料与方 法

本研究是以生命周期评价方法(LCA)为基础,根据PAS2050中规定方法^[13]。计算在包装这一单元操作过程中不同包装方式下的碳足迹,评价包装方式对产品碳足迹的影响。

1.1 目标定义与范围

研究的目的是比较真空包装、空气包装和气调包装操作过程中的潜在碳排放。包装单元操作的过程分析方法用于计算熟食米饭包装碳足迹。有研究显示真空预冷可以有效地使熟食米饭快速降温^[14],因此,本研究采用真空冷却方式,将米饭中心温度降至10℃,冷却后盒装米饭采用不同包装方式进行包装,包装方式分别为真空包装、空气包装与气调包装。

1.1.1 功能单位

功能单位反映了最终用户消费的方式,可以被认为是某一特定产品的有意义数量^[15]。本次实验是计算包装单元操作过程中的碳排放,而非某产品生命周期过程中的碳排放,即研究的对象未涉及产品运输和消费。本研究的功能单位是:包装一份质量为200g的熟食米饭。

1.1.2 系统边界

确定系统边界便于计算具体产品、过程中碳足迹,系统边界的确定明确了评价研究目标,规定实验中具体研究的范围,明确实验中的输入和输出源^[16]。为研究熟食米饭包装过程中的碳排放,本实验过程中包括熟食米饭制备、调控设备、冷却及包装过程。在本研究中,只考虑包装过程中的环境影响部分,即本次实验中系统边界仅包括包装过程,实验中仅计算在熟食米饭包装过程中产生的碳足迹,包装过程中的系统输入包括实验设备、电力、气体及塑料制品等。实验流程如图1所示,其中实线框为系统边界。

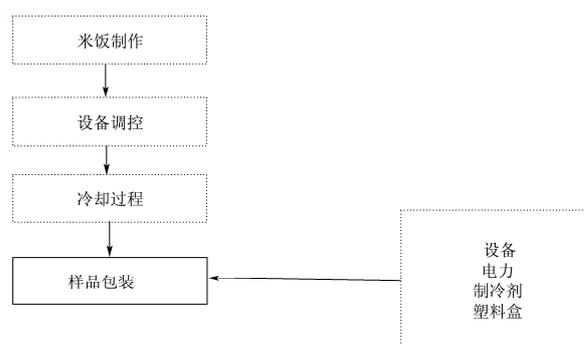


图1 实验流程图

Fig.1 Experimental procedure

注:实线框中为本研究中的系统边界。

1.2 设备调试

选取广东省中山市小榄镇丰兴包装机械厂生产的真空包装机(FX-DZT400),作为真空包装实验设备,该设备总质量是115kg。用电能无线计量插座测量包

装机耗电量,包装过程中,设备耗电为1.96kW/h。一台真空包装设备的售价大约为1万元。

选取成都市罗迪波尔机械设备有限公司生产的台式气调机, 并且连接伯特利电设备有限公司生产的空压机 (SLG30) 作为空气包装实验设备。用数字钳形表测设备运转过程中电能单位能耗分别为 0.95 kW 和 0.85 kW。设备价格分别为 9 万元和 2 千元。设备重量分别为 320 kg 和 22 kg。

选取成都市罗迪波尔机械设备有限公司生产的台式气调机, 连接 Dansensor 的气体混合仪、气瓶、缓冲罐作为气调包装实验设备。罐装气体通过进入气体混合仪进行特定比例混合, 混合气通入缓冲罐中, 最后充入台式气调机中。数字钳形表测得气体混合仪的单位时间内能耗 0.09 kW, 在 MAP-1 (40% O₂+20% CO₂+40% N₂)、MAP-2 (50% O₂+20% CO₂+30% N₂)、MAP-3 (60% O₂+20% CO₂+20% N₂) 和 MAP-4 (70% O₂+20% CO₂+10% N₂) 气体比例条件下, 台式气调机的使用功率为 0.95 kW。台式气调机、气体混合仪、气瓶和缓冲罐设备价格分别为大 9 万元、8 万元、800 元和 300 元, 重量分别是 320、14、15 和 9 kg。各气瓶容积为 40 L, 氧气、氮气瓶中压力为 13.5 MPa, 二氧化碳以液态形式存在于瓶中, 瓶内压力为 5 MPa。缓冲罐容积为 20 L。

1.3 实验方法

(1) 熟食米饭制备及冷却

称取 800 g 米, 用水淘洗两次, 沥干, 置于电饭锅内, 加入 1.3 倍的水 (1040 mL), 在室温下浸泡 30 min 后选择“蒸煮”模式蒸煮^[17]。蒸煮完成后松动米饭, 然后趁热将蒸煮后的米饭分装入规格为 224×133×60 mm³ 的塑料饭盒, 每盒米饭净重约 200 g。

选取东莞市科美斯制冷设备有限公司的真空预冷设备 (VC-1601) 进行冷却, 分装后的米饭放入设备中, 采用温度模式进行冷却, 即米饭中心温度降为 10 °C 时结束冷却过程。

(2) 熟食米饭包装

针对真空包装, 将冷却后熟食米饭转移至重量为 9.97 g 的真空包装袋内, 装填平整, 放置于设备内腔, 真空时间为 20 s, 塑封时间为 1.2 s, 冷却时间为 0.3 s, 总包装时间为 21.5 s, 每次包装 1 袋。

针对空气包装方式, 将盒装熟食米饭转移包装机内, 充入空气进行包装, 每次可以包装 1 盒。包装过程中精充时间为 0.8 s, 初充时间 2 s, 热封时间为 2 s, 包装总时间为 4.8 s。

针对气调包装, 将盒装熟食米饭转移至台式气调机内, 调节气体比例, 缓冲罐压力维持 0.45 MPa, 进行包装, 包装过程与空气包装相似, 每次可包装 1 盒。

包装过程中使用的包装盒与包装薄膜总重量为 25.62 g。包装过程中混合气精充时间为 0.8 s, 总包装时间为 4.8 s, 用流量计检测在 MAP-1、MAP-2、MAP-3 和 MAP-4 气体比例条件下, 充气流量分别为 18.14 L/min、18.04 L/min、18.15 L/min 和 18.09 L/min。

1.4 清单分析

针对全生命周期评价过程中清单分析步骤, 需要收集足够详细的产品碳足迹的输入输出数据信息, 并对这些信息进行处理与分类^[18]。清单分析中耗费时间最多的是数据收集阶段^[9], 收集的数据的准确性、有效性对计算碳排放的准确性有明显影响, 在计算碳排放过程的四个主要阶段中具有决定性意义^[19]。

LCA 的数据来源可以是发表的文献来源、实验数据甚至假设。数据收集有两种方法, 直接收集和间接收集。直接收集指通过实验或者采访实验人员采集原始资料, 间接收集方式指通过阅读文献、采访专家、使用辅助软件等方式获取某一工艺过程的碳排放量。

在包装过程中, 根据在国际标准 ISO 14040 中所规定: 固定设备的制造、维护和拆除应包括在系统边界内^[9]。本实验中真空包装、空气包装和气调包装熟食米饭过程中的输入分别包括设备、电力、气体 (间接排放及直接排放) 和塑料制品。计算包装过程的产品碳足迹公式如公式 (1) 和公式 (2) 所示:

$$EF_i = \frac{GHG_i}{t_i} \quad (1)$$

$$CF = \sum_{i=1}^n (Q_i \times EF_i) \quad (2)$$

式中, EF_i 是第 i 种输入碳排放因子, g CO₂eq/min; GHG_i 是第 i 种输入的生命周期碳排放, g CO₂eq; t_i 是第 i 种输入的生命周期, min; Q_i 是样品的处理时间, min。

使用各输入排放因子乘以各输入得到各输入的生命周期温室气体排放数据, 估计设备生命周期温室气体排放数据过程中, 使用 110 kg/万元作为设备排放因子进行计算^[20], 即将设备排放因子乘以各设备售价得到各设备生命周期温室气体排放。真空包装机、台式气调机、空压机、气体混合仪、气瓶和缓冲罐的工作寿命由设备生产商、销售商提供。除了设备外, 包装过程还需要消耗其它材料。电力排放因子是 1.03 kg CO₂/kW·h^[21], 每千克塑料产生 2.0 kg 的 CO₂eq 作为塑料产品的排放因子^[22], 采用由杭州青绿蓝环境技术有限公司开发的专业的计算碳足迹软件 GaBi 5 版本 GaBi 数据库, 计算在美国生产 1 kg O₂, N₂ 及 1 kg 液态 CO₂ 时, 对大气中排放出的二氧化碳当量, 得出生产 O₂、N₂ 和 CO₂ 的气体排放因子分别为: 0.15 kg

CO₂eq/kg、0.088 kg CO₂eq/kg 和 0.45 kg CO₂eq/kg。各种输入的总工作寿命和生命周期温室气体排放数据如表 1 所示。

表 1 各种输入的工作寿命和生命周期温室气体排放

Table 1 Total working time and GHG data of the inputs

各种输入	工作寿命/min	生命周期温室气体排放
真空包装机	1.15×10 ⁶	110 kg CO ₂ eq
台式气调机	1.15×10 ⁶	990 kg CO ₂ eq
空压机	1.15×10 ⁶	22 kg CO ₂ eq
气体混合仪	1.15×10 ⁶	880 kg CO ₂ eq
气瓶	1.15×10 ⁶	8.8 kg CO ₂ eq
缓冲罐	1.15×10 ⁶	3.3 kg CO ₂ eq
CO ₂	-	0.45 kg CO ₂ eq/kg
O ₂	-	0.15 kg CO ₂ eq/kg
N ₂	-	0.088 kg CO ₂ eq/kg
电力	-	1.03 kg CO ₂ /(kW·h) ^[21]
塑料饭盒	-	2.0 kg CO ₂ eq/kg ^[22]

1.5 影响评价

在本研究中，只研究熟食米饭包装过程中的生命周期碳排放。根据政府间气候变化专门委员会，采用 100 年的时间范围全球变暖潜力值进行计算。

1.6 数据分析

采用 SPSS 软件对实验数据进行统计分析，使用 Tukey 法对各样品平均值进行方差分析，置信度水平为 95%；实验数据均以平均值±标准偏差表示；采用 Origin 8.5 软件进行作图。

2 结果与讨论

2.1 不同包装方式的碳足迹

包装过程中输入分别为：设备（真空包装机、台式气调机、空压机、气体混合仪、气瓶和缓冲罐），电力消耗，气体（CO₂、O₂ 和 N₂）和包装用塑料产品等。在不同包装方式：VP、AP、MAP-1、MAP-2、MAP-3 和 MAP-4 下，包装 200 g 熟食米饭过程中的最终碳足迹，可以用公式（1）、（2）进行计算。

图 2 表示在不同包装方式为：VP、AP、MAP-1、MAP-2、MAP-3 和 MAP-4，包装 200 g 熟食米饭的最终碳足迹有显著性差异 ($p < 0.05$)，分别为 34.05±0.01 g CO₂eq, 57.94±0.01 g CO₂eq, 214.39±0.26 g CO₂eq, 220.53±0.26 g CO₂eq, 224.76±0.55 g CO₂eq 和 230.58±0.52 g CO₂eq。其中气调包装过程最终碳足迹最大，其次空气包装，真空包装过程最终碳足迹最小。

比较真空包装与空气包装方式，即均未充装罐装气体的包装方式可知：使用塑料产品带来的碳足迹占最终碳足迹较高比例，分别为 58.56%和 88.44%；消耗电力产生的碳足迹占比分别为 35.41%和 4.27%；使用设备产生的碳足迹占比分别为 6.04%和 7.29%。

真空包装过程中消耗电力产生的碳足迹占比远高于空气包装过程，这是由于设备运行功率较高，且包装时间较长导致的；其使用塑料产品带来的碳足迹量较低，是由于真空包装使用的塑料包装袋质量小导致的；其使用设备产生的碳足迹量较低是由于真空设备价格较低导致的。

比较空气包装与气调包装可知：气调包装过程中最终碳足迹远高于空气包装过程，这是由于气调包装过程中使用罐装气体，且罐装气体排放因子较大导致的；两种包装方式中，使用塑料产品产生的碳足迹量相同，这是由于两者使用的托盘及膜的物理质量相同导致的；空气包装过程中消耗电力产生的碳足迹量高于气调包装，这是由于空气包装设备的使用功率较高导致的；空气包装过程中使用设备产生的碳足迹量低于气调包装，这是由于包装设备价格较低所引起的。

比较不同气调方式 MAP-1、MAP-2、MAP-3 和 MAP-4 下的最终碳足迹可知：使用气体产生的碳足迹占较高比例，分别为：71.79%、72.58%、73.09%和 73.77%；其最终碳足迹随使用氧气比例增加而增加，这是由于罐装氧气的排放因子高于罐装氮气的排放因子所致。

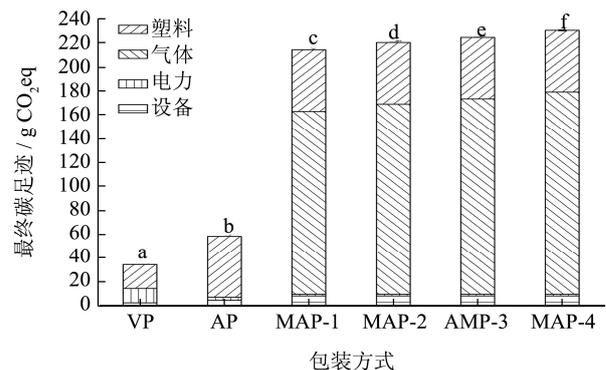


图 2 不同包装方式包装 200 g 熟食米饭的最终碳足迹

Fig.2 Final carbon footprint of packaging 200 g of cooked rice by different methods ($p < 0.05$)

2.2 不同包装方式的敏感性分析

敏感性分析是 LCA 重要的一部分，它可以改变一个 LCA 的结果。因此，一些在前面没有考虑的重要影响因素在本部分均做了分析，研究改变这些因素是否会明显改变包装过程碳足迹，碳足迹敏感性分析研究阶段所涉及的参数如下：设备碳排放因子、电力

使用效率和塑料排放因子。

2.2.1 设备碳排放因子

在本研究中, 实验设备的质量排放因子将用于计算包装过程最终碳足迹。改变设备的排放因子为 3.54 kg CO₂eq/kg, 每千克塑料产生 2.0 kg CO₂eq。使用设备排放因子乘以各设备重量得到各设备的使用寿命温室气体排放数据。利用公式 1 和 2 计算得出改变设备排放因子前后的包装最终碳足迹以及相关数据, 由表 2 表示。表 2 给出了设备碳排放因子的敏感性分析, 结果显示, 气调包装方式下最终碳足迹降低, 真空包

装及空气包装过程中产生的最终碳足迹增加, 且改变设备排放因子时, 真空包装过程中最终碳足迹的改变量较大。这可能是由于气调包装设备价格较高, 且设备质量较小导致的。

结果显示, 改变设备排放因子后, 真空包装过程最终碳足迹改变量大, 而空气包装及气调包装过程中最终碳足迹改变量较小, 因此对于真空包装过程, 其最终碳足迹对设备排放因子是敏感的, 而空气包装及气调包装的最终碳足迹对设备排放因子是稳定的。

表 2 设备的碳排放因子的敏感性分析

Table 2 Sensitivity analysis of the carbon emission factors of equipment

包装方式	设备排放因子	最终碳足迹/(g CO ₂ eq)	设备碳足迹占比/%	碳足迹改变量/%
VP	110 kg/万元	34.05±0.01	6.04	+16.31
	3.54 kg CO ₂ eq/kg	39.61±0.01	19.22	
AP	110 kg/万元	57.94±0.01	7.29	+0.01
	3.54 kg CO ₂ eq/kg	58.77±0.01	8.87	
MAP-1	110 kg/万元	214.39±0.26	3.64	-0.01
	3.54 kg CO ₂ eq/kg	211.91±0.43	2.36	
MAP-2	110 kg/万元	220.53±0.26	3.54	-0.02
	3.54 kg CO ₂ eq/kg	217.1±1.01	2.30	
MAP-3	110 kg/万元	224.76±0.55	3.48	-0.01
	3.54 kg CO ₂ eq/kg	221.94±0.55	2.25	
MAP-4	110 kg/万元	230.58±0.52	3.39	-0.01
	3.54 kg CO ₂ eq/kg	227.76±0.52	2.19	

2.2.2 电力的使用效率

由于不同类型和使用年限的设备的电能利用率是不同的, 因此, 本研究中, 假设电能利用效率相比原始值提高 30%和降低 30%, 用以进行敏感性分析。利用公式 1 和 2 计算得出改变电力使用效率前后的包装最终碳足迹以及相关数据, 由表 3 表示。电力使用效率的敏感性分析如表 3 所示, 当电力使用效率增加(减少)时, 最终碳足迹减少(增加), 使用电力产生的碳足迹比例减少(增加); 空气包装及气调包装过程中,

使用电力产生的碳足迹占总碳足迹比例较小, 而真空包装过程中消耗电力产生的碳足迹在最终碳足迹中占较高比例。这是由于真空包装设备使用功率较大, 且包装时间较长导致的。

改变电力使用效率时, 真空包装过程中最终碳足迹改变量较大, 而空气包装与气调包装过程最终碳足迹改变量较小, 说明真空包装过程对于电力使用效率这一因素敏感, 而空气包装与气调包装过程对于电力使用效率这一因素稳定。

表 3 电力使用效率的敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of electricity use efficiency

包装方式	电力使用效率/%	最终碳足迹/g CO ₂ eq	电力碳足迹占比/%	碳足迹改变量/%
VP	+30	30.44±0.01	27.73	10.62
	Original	34.05±0.01	35.41	
	-30	37.67±0.02	41.61	
AP	+30	57.20±0.00	3.027	1.28
	Original	57.94±0.01	4.27	
	-30	58.68±0.01	5.48	

转下页

接上页

MAP-1	+30	214.24±0.33	0.47	0.07
	Original	214.39±0.26	0.67	
	-30	215.16±0.43	0.86	
MAP-2	+30	219.49±1.02	0.45	0.47
	Original	220.53±0.26	0.65	
	-30	220.34±1.01	0.84	
MAP-3	+30	224.33±0.55	0.45	0.19
	Original	224.76±0.55	0.63	
	-30	225.19±0.55	0.82	
MAP-4	+30	230.15±0.52	0.43	0.18
	Original	230.58±0.52	0.62	
	-30	231.01±0.52	0.80	

2.2.3 塑料排放因子

王志慧等利用全生命周期评价方法, 对在中国生产的纸塑铝复合包装的生命周期碳足迹建模, 得到生产每千克塑料制品产生的碳足迹为 1.69 kg CO₂eq^[23], 本研究中将使用该数据用于敏感性分析。利用公式 1 和 2 计算出改变塑料排放因子前后的包装最终碳足迹以及相关数据, 由表 4 表示。表 4 给出了塑料的碳排放因子的敏感性分析, 结果显示: 不同包装方式下,

使用塑料产品产生的碳足迹在包装过程中最终碳足迹占一定比例, 当改变塑料排放因子时, 最终碳足迹均有所下降且有一定改变, 说明碳足迹对塑料排放因子是敏感的, 可以通过利用环保的塑料制品来降低包装过程中的最终碳足迹。本研究也说明通过改进工艺降低塑料生产过程中的碳排放, 对降低食品领域的碳排放有重要影响。

表 4 塑料排放因子敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of plastic emission factors

包装方式	塑料排放因子/(kg CO ₂ eq/kg)	最终碳足迹/(g CO ₂ eq)	塑料碳足迹占比/%	碳足迹改变量/%
VP	2.0	34.05±0.01	58.56	-9.08
	1.69	19.18±0.01	54.42	
AP	2.0	57.94±0.01	88.44	-13.71
	1.69	50.00±0.01	87.32	
MAP-1	2.0	214.39±0.26	23.90	-3.55
	1.69	206.79±0.43	20.94	
MAP-2	2.0	220.53±0.26	23.23	-3.88
	1.69	211.97±1.01	23.25	
MAP-3	2.0	224.76±0.55	22.80	-3.53
	1.69	216.82±0.55	22.75	
MAP-4	2.0	230.58±0.52	22.22	-3.44
	1.69	222.64±0.52	22.18	

3 结论

3.1 本文从单元操作角度研究了真空包装、空气包装和气调包装方式下包装熟食米饭的碳足迹, 研究表明: 真空包装过程中碳足迹最低, 气调包装过程中碳足迹最高。在 VP、AP、MAP-1、MAP-2、MAP-3 和 MAP-4 条件下, 包装 200 g 熟食米饭的最终碳足迹分别为 34.05±0.01 g CO₂eq, 57.94±0.01 g CO₂eq, 214.39±0.26 g CO₂eq, 220.53±0.26 g CO₂eq, 224.76±0.55 g CO₂eq 和 230.58±0.52 g CO₂eq。

3.2 不同包装方式下, 使用塑料产品带来的碳足迹占最终碳足迹较高比例, 真空包装过程中消耗电力产生的碳足迹占比远高于空气包装与气调包装过程, 而使用塑料产品及设备产生的碳足迹占比较低; 气调包装与空气包装过程中, 使用塑料产品产生的碳足迹量相同; 气调包装中使用气体产生的碳足迹占最终碳足迹较高比例, 且最终碳足迹随使用氧气比例增加而增加。

3.3 对设备的碳排放因子、电力使用效率、塑料的碳排放因子对结果的影响做了敏感性分析。发现对于真空包装过程, 其最终碳足迹对于原来的设备排放因子

和电力使用效率均是敏感的;空气包装与气调包装过程的最终碳足迹,对于设备排放因子与电力使用效率是稳定的;不同包装方式下,最终碳足迹对塑料的碳排放因子是敏感的,可以通过降低塑料制品排放而降低包装过程中最终碳足迹。

参考文献

- [1] Thøgersen J, Nielsen K S. A better carbon footprint label [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125: 86-94
- [2] Bernstein L, Bosch P, Canziani O, et al. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis report [M]. Geneva: IPCC, 2008
- [3] Minx J C, Wiedmann T, Wood R, et al. Input-output analysis and carbon footprinting: an overview of applications [J]. *Economic Systems Research*, 2009, 21(3): 187-216
- [4] Wiedmann T. Carbon footprint and input-output analysis -an introduction [J]. *Economic Systems Research*, 2009, 21(3): 175-186
- [5] Audsley E, Brander M, Chatterton J, et al. An assessment of greenhouse gas emissions from the UK food system and the scope for reduction by 2050: how low can we go [J]. Godalming, UK: WWF UK and Food Climate Research Network, 2010
- [6] Xiao-wei Y, Xing J. Low carbon economy and low-carbon food [J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 1099-1103
- [7] Mungkung R T, de Haes H A U, Clift R. Potentials and limitations of life cycle assessment in setting ecolabelling criteria: a case study of thai shrimp aquaculture product [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(1): 55-59
- [8] Xu C C, Huang J, Chen F. The application of carbon footprint in agri-food supply chain management: case study on milk products [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 807-809: 1988-1991
- [9] Xu Z, Sun D W, Zhu Z W. Potential life cycle carbon savings for immersion freezing of water by power ultrasound [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(1): 69-80
- [10] A L K, Kim K T, Paik H D. Physicochemical, microbial, and sensory evaluation of cook-chilled Korean traditional rice cake (Bakseolgi) during storage via various packaging methods [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2011, 20(4): 1069-1074
- [11] Ulusoy Ş, Özden Ö. Preservation of stuffed mussels at 4 °C in modified atmosphere packaging [J]. *J. Aquat. Food Prod. Technol.*, 2011, 20(3): 319-330
- [12] Ma Y, Sun D W. Hardness of cooked rice as affected by varieties, cooling methods and chill storage [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2009, 32(2): 161-176
- [13] Virtanen Y, Kurppa S, Saarinen M, et al. Carbon footprint of food -approaches from national input-output statistics and a LCA of a food portion [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(16): 1849-1856
- [14] Zhang Z, Sun D W. Effects of cooling methods on the cooling efficiency and quality of cooked rice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(2): 269-274
- [15] Kristensen T, Søgaard K, Eriksen J, et al. Carbon footprint of cheese produced on milk from Holstein and Jersey cows fed hay differing in herb content [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 101: 229-237
- [16] Xue J F, Pu C, Liu S L, et al. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 249-257
- [17] Yu S, Ma Y, Sun D W. Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage [J]. *J. Cereal Sci.*, 2009, 50(2): 139-144
- [18] Biswas W K, Naude G. A life cycle assessment of processed meat products supplied to Barrow island: A western Australian case study [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 180: 48-59
- [19] Reap J, Roman F, Duncan S, et al. A survey of unresolved problems in life cycle assessment [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13(5): 374-388
- [20] Ying-zhi X, Yong-shun H. Analysis of the difference of carbon emissions of China's manufacturing sector: a decomposition study based on input-output model [J]. *Soft Science*, 2011, 25(4): 69-75
- [21] Hou P, Wang H T, Zhang H, et al. GreenHouse gas emission factors of Chinese power grids for organization and product carbon footprint [J]. *China Environ. Sci.*, 2012, 32(6): 961-967

(下转第 244 页)