

# 生命周期视角下食品碳足迹的评估及案例分析

惠博文<sup>1</sup>, 刘锐<sup>2,3</sup>, 李健<sup>1,3,\*</sup>, 孙君茂<sup>2,3</sup>

(1.北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048; 2.农业农村部食物与营养发展研究所, 北京 100081;

3.中国绿色食品协会绿色农业与食物营养专业委员会, 北京 100081)

**摘要:**“减排降碳”“碳达峰”“碳中和”已经成为全球气候治理的焦点, 作为衡量气候变暖的重要工具, 碳足迹可以对食品生命周期内的温室气体排放量进行量化评估, 帮助人们提出碳减排的措施。本文从国内外的研究现状出发, 以生命周期评价理论为基础, 系统阐述碳足迹分析模型和食品产业链排放源, 对国内外研究趋势进行可视化分析, 并进一步对该领域内面临的挑战、政策环境、消费者购买行为进行讨论, 以期完善我国食品碳足迹标签制度提供借鉴。

**关键词:** 生命周期; 食品; 碳足迹; 排放清单; 文献计量

## Assessment and Case Analysis of Food Carbon Footprint from the Perspective of Life Cycle

HUI Bowen<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>2,3</sup>, LI Jian<sup>1,3,\*</sup>, SUN Junmao<sup>2,3</sup>

(1. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;

3. Green Agriculture and Food Nutrition Committee, China Green Food Association, Beijing 100081, China)

**Abstract:** “Carbon emission reduction”, “carbon emission peak”, and “carbon neutrality” have become the focus of global climate governance. As an important tool for measuring climate warming, carbon footprint allows for quantification of the carbon footprint of the food life cycle and helps people to propose carbon reduction measures. Beginning with an overview of the current status of research on carbon footprint, this article systematically reviews the carbon footprint analysis model and the food industry chain emission source based on the life cycle assessment theory, makes a visual analysis of the research trends around the world, and discusses the development challenges in the field, policy environment and consumer purchasing behaviors in this field, in order to provide a basis for improving the Chinese food carbon footprint labeling system.

**Keywords:** life cycle; food; carbon footprint; emission inventory; bibliometrics

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210327-341

中图分类号: TS201.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2022) 07-0381-10

引文格式:

惠博文, 刘锐, 李健, 等. 生命周期视角下食品碳足迹的评估及案例分析[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 381-390.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210327-341. <http://www.spkx.net.cn>

HUI Bowen, LIU Rui, LI Jian, et al. Assessment and case analysis of food carbon footprint from the perspective of life cycle[J].

Food Science, 2022, 43(7): 381-390. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210327-341.

<http://www.spkx.net.cn>

近年来随着人类活动的加剧, 温室气体的排放加快了全球气候变暖。化石燃料的燃烧、工农业生产和土地资源过度开发等行为也严重破坏了生态系统的多样性和可持续性, 不仅限制了人类的生存空间, 也给未来的发展带来了严重挑战<sup>[1]</sup>。有关气候学家警告称, 截至2050年,

全球CO<sub>2</sub>排放水平相较于2000年需减少85%, 否则全球气温的升高将给生态系统带来难以估计的影响<sup>[2-3]</sup>。2020年以来, 世界人口数量突破了70亿, 预计至2050年世界人口将达到100亿, 人口增长加剧了对能源、粮食、环境等资源的消耗, 给世界食品供应链带来了极大的压力<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2021-03-27

第一作者简介: 惠博文(1998—)(ORCID: 0000-0001-8059-175X), 男, 硕士研究生, 研究方向为植物源食品开发利用。

E-mail: 15511576581@163.com

\*通信作者简介: 李健(1985—)(ORCID: 0000-0001-9368-4533), 男, 教授, 博士, 研究方向为植物源食品开发利用。

E-mail: lijian@btbu.edu.cn

食品行业温室气体的排放约占全球温室气体排放总量的1/4, 并呈持续上升趋势, 实现领域内的可持续发展, 早日做到全球温室气体的净零排放成为亟待解决的难题, 实现人为温室气体排放量与清除量相平衡的状态即“碳中和”。

“碳中和”源于1992年全球第二届环境发展大会上通过的《联合国气候变化框架公约》, 成型于2015年通过的《巴黎协定》, 《联合国气候变化框架公约》与《京都协定书》《巴黎协定》一并成为全球范围内应对气候变化的具有法律约束性质的文件, 最终目标是尽早实现碳排放达峰, 并在此基础上实现碳中和<sup>[6]</sup>。世界上多家食品公司已经宣布了实现碳净零排放的期限, 2019年加拿大的Maple Leaf Foods成为了世界上第一家实现碳中和的食品公司, 瑞士雀巢旗下的子品牌Garden Gourmet、Nespresso和Kitkat预计相继在2022年和2025年实现, 美国百事可乐公司也承诺最晚于2040年实现碳中和<sup>[7-8]</sup>。

Our World in Data数据库的统计数据显示了1800—2020年全球CO<sub>2</sub>的增长趋势, 自18世纪60年代的工业革命以来, CO<sub>2</sub>排放量开始逐年增长, 1950年后增速明显加快<sup>[9]</sup>, 该阶段世界经济同样增长迅速。2018年CO<sub>2</sub>排放量达到366.5亿 t, 受新型冠状病毒肺炎疫情的影响, 2020年CO<sub>2</sub>的排放量较2019年约减少5% (图1)<sup>[9-12]</sup>。食品产业是国民经济的基础产业, 其现代化水平和消费模式反映了人民的生活水平, 也是国家发展水平的重要评价标志。但是, 因为该产业部分领域内存在结构不合理、生产方式粗放等问题, 又是一个高耗能、高污染、高排放的行业, 是人为气候变化的重要推动因素<sup>[13]</sup>。

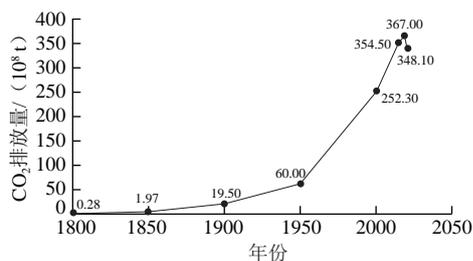


图1 1800—2020年全球CO<sub>2</sub>年排放量<sup>[9-12]</sup>

Fig. 1 Global annual CO<sub>2</sub> emission amounts from 1800 to 2020<sup>[9-12]</sup>

Poore等<sup>[10]</sup>研究了食品产业对环境的影响, 得出食品产业温室气体排放量约占全球温室气体排放总量的26%, 其温室气体排放可细分为畜牧业和渔业、农作物生产、土地占用和食品供应链这几个方面。畜牧业和渔业温室气体排放量占食品产业排放总量的31%, 其温室气体的排放主要来源于牲畜的粪便发酵、反刍动物的胃肠道发酵、捕鱼的机械设备能耗、场地管理能耗等; 农作物生产温室气体排放量占食品产业排放总量的27%, 大部分由人类的食用消费产生, 小部分由生产动物饲料产生, 其中温室气体的排放主要来源于农作物种植过程、施用含氮化肥及土壤中释放的N<sub>2</sub>O、农业机械设

能耗等; 土地占用温室气体排放量占食品产业温室气体总量的24%, 如开荒造成土地类型改变; 食品的供应链温室气体排放量占食品产业温室气体排放总量的18%<sup>[14]</sup>, 可以划分成加工、包装、运输、零售4个过程, 其中温室气体的排放主要来源于设备能耗、制冷剂逸散。在实际的生命周期中还应包括废弃物的处置过程, 因数据收集的局限性未考虑在内。

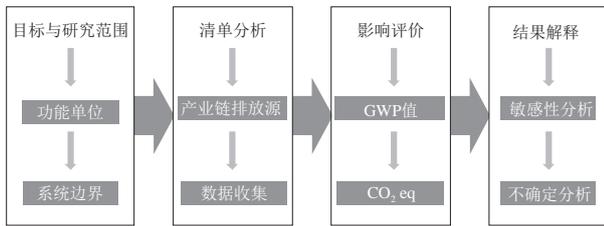
为了深入分析温室气体对环境的影响程度, 碳足迹的概念应运而生。碳足迹的概念最早起源于生态足迹, 生态足迹是指以使用的功能性土地面积为单位描述人们生产消费活动对生态环境造成的影响, 最早由Wackernagel等<sup>[15]</sup>提出, 在当时引起了世界研究组织和民众的广泛关注。《联合国气候变化框架公约》中给出了“碳足迹”的定义, 即衡量人类活动中产生或释放的, 用以评估国家、组织及个人所生产产品或服务带来的温室气体排放量, 其以二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>eq)为单位, 也是一种衡量对气候环境变化贡献程度的方法<sup>[2]</sup>。从世界范围来看, 保护生态环境、发展低碳经济、实现可持续发展是大势所趋。

基于以上内容, 本文以生命周期评价(life cycle assessment, LCA)理论为基础, 研究碳足迹在食品产业评价中的应用, 从食品碳足迹量化模型、国内外研究趋势、应用讨论等角度分析其在食品领域中的应用案例, 讨论分析对象的复杂性和分析结果的矛盾性、国内外的政策环境以及消费者购买行为对碳足迹量化结果的影响, 以期完善我国食品领域内碳足迹评价体系、发展环境友好型经济及如期实现包括食品行业在内的碳中和目标提供参考。

## 1 食品碳足迹量化模型

### 1.1 生命周期评价理论

LCA是进行足迹分析的常用工具, 是一种以过程为基本出发点、自下而上的分析方法, 用以评估产品在生命周期过程中对环境的影响<sup>[16]</sup>。LCA法常用于分析某一类产品或产业链造成的环境负荷, 以食品产业链的碳排放核算为例, 通常需考虑原材料获取、生产加工、仓储、运输、消费、废弃物处置过程中产生的温室气体排放, 是一种在微观层面上对产品碳足迹进行量化以评估对环境的主要方法<sup>[17-18]</sup>, 该方法旨在通过分析产品生命周期的全过程, 确定食品生产系统中的关键工艺路线, 找出影响碳源的关键控制点, 提出可行性措施以减少温室气体排放。LCA体系的建立主要依据国际标准ISO 14040<sup>[19]</sup>、ISO 14067<sup>[20]</sup>及英国标准协会标准PAS 2050<sup>[21]</sup>等, 基于标准中对产品碳足迹框架的阐述, 食品碳足迹的量化评估模型可分为目标与研究范围、清单分析、影响评价、结果解释4个阶段(图2), 并根据最终得出的系统性结论给出碳减排建议。



GWP,全球变暖潜力 (global warming potential)。

图2 LCA分析示意图

Fig. 2 Schematic diagram of life cycle assessment analysis

1.2 目标与研究范围

食品碳足迹的量化首先是根据预期确定所要研究的目标与范围, 如果所服务的对象是消费者群体, 那么研究的目标是明确某种食品或某种服务的碳足迹信息, 并以此为参考指导其选择合理的消费方式; 若面对的是食品企业, 则主要关注的是其产业链的评估, 细化产业链内的排放负荷, 从而找出关键控制点, 通过采取有效的碳减排措施以符合国家相关的制度要求、兑现清洁生产的减排承诺及应对国际上可能面对的碳壁垒<sup>[22]</sup>。研究范围包括确定功能单位和划分系统边界。

1.2.1 功能单位

食品是一类具有复杂功能性的产品, 功能单位是指用于食品碳足迹分析的重要参考单位, 选择时应综合考虑分析对象的独特性、服务对象的差异性、计算的便捷性以选择便于比较、方便理解的功能单位<sup>[23-24]</sup>。目前广泛使用的功能单位有单位产品质量、单位产品体积、单位营养素含量等多种量化指标。柳杨等<sup>[25]</sup>采用LCA法对宁夏某企业干果进行了碳足迹评价, 在农作物种植至仓储运输的周期内使用了每千克枸杞干果为功能单位。Zhu Zhiwei等<sup>[26]</sup>在研究熟米饭冷却方式对碳足迹的影响中, 选择了单位包装盒米饭从50 °C降至10 °C的温度变化区间为功能单位, 比较不同单元操作下的碳足迹。Roibás等<sup>[27]</sup>分析了来自马耳他的10余种果汁的碳足迹, 并以250 mL的瓶装果汁为功能单位, 从植物源产品供应链的角度提出了针对性的碳减排措施。Xu Zhongyue等<sup>[28]</sup>针对19种富含碳水化合物的食品进行了碳足迹评估, 在前人研究的基础上对比了以质量、能量、葡萄糖含量以及分别由11种和21种营养素组成的两个综合营养指数为功能单位的碳排放结果。此外, 对于农产品的分析常选择以产量为功能单位, 以方便比较农场规模、生产区域之间碳足迹的差异性<sup>[29-30]</sup>。

1.2.2 系统边界

系统边界定义了研究系统内所要核算的过程单元, 具体边界的划分应遵循所研究对象的规律, 从而精确地梳理出产品在系统内的输入源与输出源<sup>[31]</sup>。食品的

全生命周期应包括原材料输入阶段、农场阶段、生产阶段、销售阶段、消费者阶段、废弃物处置阶段。农产品的碳足迹评估常常将范围界定为“摇篮到农场”, 即从化肥、农药、大棚、杀虫剂等原材料生产开始至农作物成熟结束; 若分析对象为某特定食品生产过程的碳足迹, 则系统边界应划分为“摇篮到销售”, 即从食品所有原辅料、包装材料的生产开始至销售时的仓储运输结束(图3)。当然, 食品的全生命周期应该从所有原料的生产至最终产品生命周期的终点——废物处置阶段, 即“摇篮到坟墓”, 实际运用时应综合考虑研究对象、数据来源和应用预期<sup>[32]</sup>。

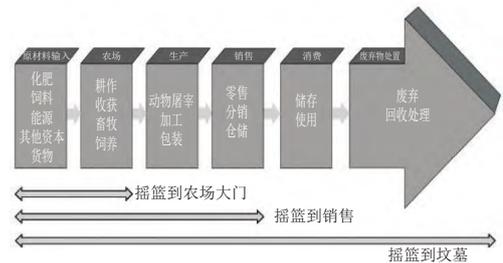


图3 系统边界示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of system boundary<sup>[32]</sup>

1.3 清单分析

确定研究目标、划分系统边界后, 研究人员应在本阶段分析食品生命周期的排放清单, 对研究范围内的输入源与输出源进行量化汇总, 具体工作包括食品产业链排放源和数据收集与汇总。

1.3.1 食品产业链排放源

为进一步确定产业链内各个阶段的温室气体排放源, 研究人员可从以下6个角度进行探讨: 土地类型变更、原材料获取与加工、产品加工、仓储运输、销售消费和废弃物处置, 图4为食品全生命周期阶段的排放清单示意图。

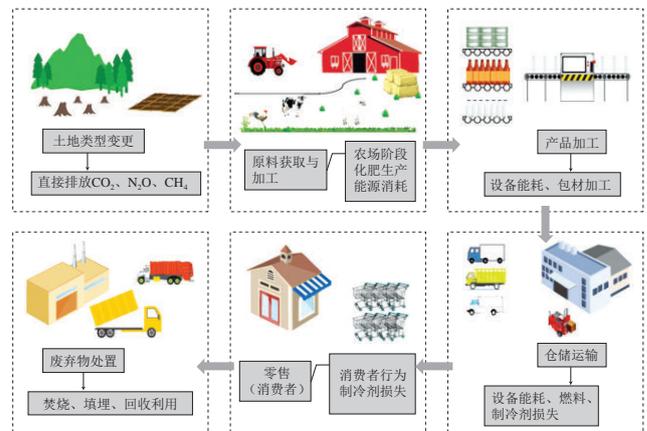


图4 生命周期内的碳排放清单示意图

Fig. 4 Schematic diagram of carbon emission inventory during the life cycle

随着人口数量的增长,人们对谷物、肉制品、乳制品等食品的需求日益增大,这成为了森林等自然资源转化为农牧业用地的主要驱动力<sup>[31-33]</sup>。根据联合国粮食与农业组织的统计数据显示,全球适宜人类居住的土地有一半被用于农业生产,森林、灌木、草原、湿地不断被转化为农业用地和工业生产用地等。工业革命以来,人类对自然资源的集约化利用改变了动物的栖息地,给生物多样性带来严重威胁<sup>[34-35]</sup>。在农业系统中,土地类型变化往往会直接导致温室气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O)的排放。土壤中的微生物及表层的植被通过光合作用,将无机碳转化为有机碳储存在生物内即生物固碳,而农业耕作、人工牧场的出现会大量消耗土壤中的有机碳,从而导致土壤中CO<sub>2</sub>排放至大气中;因此,在耕作时必须投入大量有机物质才能保持土壤碳平衡<sup>[36]</sup>。N<sub>2</sub>O也是一种常见的农业温室气体,源于土壤微生物中的硝化反应,作为副产物从土壤中逸散至大气中,受土壤特性、农作物种类、人类活动和外界气候条件的影响。原材料的获取阶段包括农作物种植、畜产品养殖、化肥的生产使用以及农资能耗,排放的温室气体包括CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub><sup>[37]</sup>。CH<sub>4</sub>主要来源于水稻生产、反刍动物的肠道发酵、牲畜的粪便发酵。稻田系统中化肥的施用不仅排放了大量CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O,更极易污染土壤和地下水,水稻生长时水下部分的有机物也会被厌氧菌分解产生CH<sub>4</sub>,会受水稻生长条件、植物根系活动和土壤条件的影响<sup>[38]</sup>。在厌氧条件下,反刍动物瘤胃中的微生物群对饲料中的纤维素进行酵解,生成挥发性脂肪酸、H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>,并最终被产甲烷古菌分解产生CH<sub>4</sub>,通过排气的方式释放至大气中<sup>[39]</sup>。同样的,牲畜粪便的管理不当也会在一定条件下产生CH<sub>4</sub>。该阶段的CO<sub>2</sub>主要来自农资的使用消耗、化石燃料的燃烧,如农业用拖拉机、播种机、收割机等农用机械的使用,造成了CO<sub>2</sub>的大量排放。该阶段的N<sub>2</sub>O主要来自于化肥的施加,部分氮会被植物利用,剩余的氮则会残留在土壤中以N<sub>2</sub>O的形式逸散,所以在农作物生产过程中施加氮肥会导致N<sub>2</sub>O的直接排放,也是碳足迹较高的主要因素<sup>[40]</sup>。食品加工阶段主要涉及了设备能耗、包材等辅料的加工,主要是以电能的形式进行能量转换。仓储运输和零售消费阶段包含食品冷藏储存和运输过程,主要是以电能、制冷剂、交通工具能耗的形式体现。冷链系统旨在保障食品的营养与质量安全,在食品的储存运输中尽可能减少食品的损失<sup>[41]</sup>,制冷过程中发生制冷剂逸出时,也会产生少量氢氟碳化合物,从而造成温室效应<sup>[42-43]</sup>。当前的废物处置办法大多采取填埋和焚烧,这会产生苯、二噁英等大量有毒有害气体,造成空气污染。为尽量减少对环境的影响,应对直接回收的食品

包装进行回收,对不可回收的材料采取自然降解或厌氧降解的方法,其产生的生物能源如C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH、CH<sub>4</sub>等可充当燃料循环使用<sup>[44]</sup>。

除上述CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 3种常见的温室气体外,贡献度较大的温室气体还有全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)等。《京都协定书》中列出了6种主要的温室效应贡献气体<sup>[45]</sup>,表1为6种主要的温室气体的GWP值,GWP是在100年的时间框架内,各种温室气体的温室效应对应于相同效应二氧化碳的质量,如根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次评估报告的最新数据显示,CH<sub>4</sub> 100年的GWP值为28<sup>[46-47]</sup>。

表1 部分温室气体的GWP<sup>[46-47]</sup>

名称	二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	甲烷 (CH <sub>4</sub> )	一氧化二氮 (N <sub>2</sub> O)	全氟化碳 (PFC <sub>4</sub> )	氢氟碳化合物 (HFCs)	六氟化硫 (SF <sub>6</sub> )
GWP值	1	28	265	6 630~11 100	4~12 400	23 500

### 1.3.2 数据收集与汇总

一般来说,需要收集的数据是活动水平数据和排放因子,活动水平数据指食品生命周期内所消耗材料或能源的数据参数,排放因子是指每一活动单位产生的温室气体的质量<sup>[48]</sup>。数据的来源包括初级数据和次级数据,初级数据是食品生产各原料的直接消耗量、机械运转时能源消耗量、产品实际产量等,是与目标食品本身直接对应的数据,而次级数据指同类别的材料或阶段的通用参数,如国家部门统计量等,一般数据收集时应尽可能采用初级数据,若初级数据难以获得则可用次级数据代替<sup>[22]</sup>。

### 1.4 影响评价

影响评价过程根据清单分析收集所得的数据进行汇总,将不同类型温室气体的活动水平、对应的排放因子以及IPCC最新公布的GWP值相乘后累加,计算出给定系统边界内的碳足迹,一般以产品总计产生二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>eq)表示<sup>[19-20]</sup>。食品碳足迹按下式<sup>[49]</sup>计算。

$$CF = \sum_{i=1}^n A_i \times \gamma_i \times GWP_i$$

式中:CF为食品碳足迹/kg CO<sub>2</sub>eq; A<sub>i</sub>为第i种温室气体的活动水平/kg; γ<sub>i</sub>为第i种温室气体的排放因子; GWP<sub>i</sub>为第i种温室气体的GWP值/(kg CO<sub>2</sub>eq/kg)。

该阶段仅针对碳排放清单内的数据进行计算,不包括系统边界以外的环节。不同类型食品的碳足迹差异很大,同一类型的食品在不同系统条件下的碳足迹同样具有较大差异,如运输条件、温室储存条件、销售条件等<sup>[50]</sup>。

该过程能直观地对所得数据进行比较, 结合横向对比与纵向对比, 为结果解释提供数据支撑。

### 1.5 结果解释

结果解释阶段包括敏感性分析和不确定检查, 对核算过程中的局限性做出解释, 并对食品产业链中的关键环节提出碳减排建议<sup>[51]</sup>。敏感性分析是通过改变一系列相关因素来观察其对最终结果的贡献程度, 本质上是通过对比较不同因素的改变量与结果改变量的比值来确定, 比值越大表示其贡献程度越大<sup>[52]</sup>。数据收集时原则上应尽可能采用较准确的数据, 但是对于某些参数因过程复杂、方法欠缺及系统自然变化等而具有不确定性, 比如土地类型变更、商品处于流通过程等。所以, 在结果解释阶段应进行不确定检查, 针对数据的来源, 评估分析数据的真实性<sup>[53]</sup>。

## 2 食品碳足迹的国内外研究趋势

为了进一步明确国内外食品碳足迹的发展前景及研究热点, 本文使用Cite space软件进行了食品碳足迹相关文献的计量分析, 以实现研究领域的可视化, 展现未来食品碳足迹的发展趋势<sup>[54]</sup>。Cite space软件分析原理是利用科学计量学和数据信息可视化来挖掘文献中的关键信息和热点, 通过构建合作信息和共现网络来实现研究数据的可视化, 故对年发文量变化、国家科研合作、共被引文献分析3个方向进行了可视化分析<sup>[54-55]</sup>。

### 2.1 文献数据检索方式

检索文献目标数据库为Web of Science核心合集, 检索年份为1985—2021年, 设定检索条件为“carbon footprint\* And food”。文献导出后使用Cite space软件对缺少信息、重复的文献进行精炼后得到1 231 篇文献, TOP N阈值设置为50, 不进行任何的裁剪计算。

### 2.2 年发文量变化

图5为食品碳足迹研究文献的年发文量变化, 首先从Web of Science数据库中导出文献数据, 经过筛选得到1999—2021年的文献分布。在1999—2020年间, 发文量逐年增加, 2008年之前每年出版的文献不到5篇, 2008年英国在世界上首次发布碳足迹评价规范<sup>[2]</sup>, 这表明该时间段内食品碳足迹研究正处于起步阶段。2009年以后食品碳足迹相关的发文量迅速增加, 其领域内发展迅速; 2020年增速最快, 较2019年文献数目增加53篇, 由于本文整理工作更新日期为2021年1月23日, 所以2021年呈现的文献数目仅代表截至1月23日的文献数目, 预测在此趋势下, 2021年之后的发文量又将达到新的峰值。

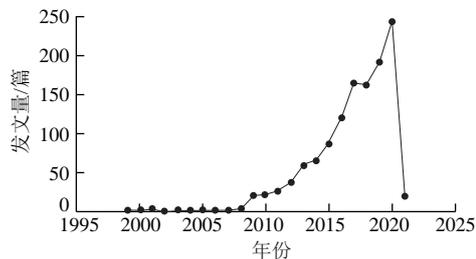


图5 食品碳足迹年发文量变化  
Fig. 5 Annual changes in the number of publications concerning food carbon footprint

### 2.3 国家科研合作

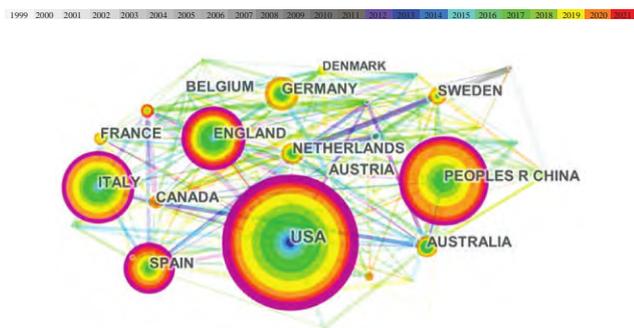
国家科研合作包括国家间合作和机构间合作, 在食品碳足迹相关的研究领域内约有52个国家和235个机构参与其中, 表2和图6分别为1999—2021年发文量排名前10的国家及其科研合作网络图。节点之间的连线代表了国家间的合作, 图顶部的颜色栏代表着时间轴, 与连线的年份相对应。中心性是评价节点在网络图中贡献度大小的重要指标, 其大小用紫色圆环的厚度表示<sup>[55-56]</sup>, 图6反映了一个国家在食品碳足迹研究领域的国际地位, 圆环内不同的颜色和厚度代表着合作的阶段和频率, 国家间合作的频率越高, 圆环的厚度越大。美国是食品碳足迹领域内发表文献最多的国家, 数量达253篇, 中心性最大, 在研究领域内地位最高。意大利发文量排名第4, 中心性仅次于美国, 未来有极大的发展潜力。虽然我国发文量位列第2, 仅次于美国, 但中心性数值却位列第5, 所以我国应进一步加大国际合作, 以便掌握在食品碳足迹研究的主动权。

表2 1999—2021年国家发文量排名  
Table 2 Ranking of countries by the number of publications from 1999 to 2021

排名	数量/篇	中心性	国家
1	253	0.33	美国
2	176	0.12	中国
3	140	0.16	英国
4	131	0.17	意大利
5	112	0.15	西班牙
6	88	0.06	德国
7	78	0.07	澳大利亚
8	74	0.08	荷兰
9	68	0.07	瑞典
10	62	0.10	加拿大

表3和图7分别显示了发文量排名前10位的科研机构以及它们之间的科研合作关系, 节点之间的连线代表了机构之间的合作。其中多数科研机构为高校, 来自丹麦的奥胡斯大学(Aarhus University)中心性第一, 说明其在食品碳足迹领域中的贡献度是最高的。来自中国的研究机构有3个, 分别是中国科学院、中国科学院大学和中国农业大学, 中国科学院发文量最多,

中心性第二, 这些数据表明我国在食品领域内的碳足迹研究有很大的发展潜力。



ITALY.意大利; FRANCE.法国; BELGIUM.比利时; ENGLAND.英格兰; CANADA.加拿大; SPAIN.西班牙; GERMANY.德国; NETHERLANDS.荷兰; USA.美国; DENMARK.丹麦; AUSTRIA.奥地利; SWEDEN.瑞典; PEOPLES R CHINA.中国; AUSTRALIA.澳大利亚。

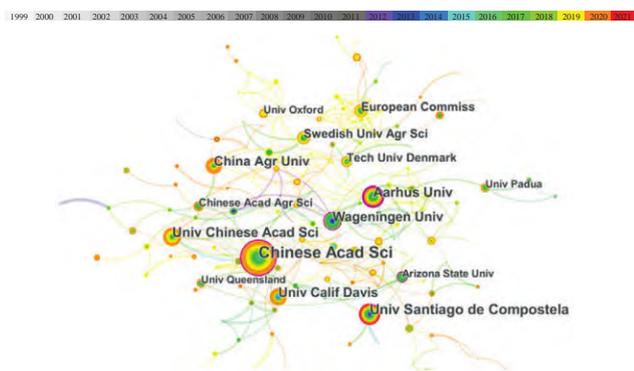
图6 国家间合作网络图

Fig. 6 Network diagram of cooperation among countries

表3 发文量前十的科研机构

Table 3 Top 10 universities or research institutions according to the number of publications

排名	数量	中心性	国别	机构名称
1	34	0.19	中国	中国科学院
2	21	0.07	美国	圣地亚哥大学
3	18	0.09	中国	中国科学院大学
4	18	0.20	丹麦	奥胡斯大学
5	17	0.05	美国	加州大学戴维斯分校
6	16	0.14	荷兰	瓦格尼根大学
7	16	0.08	中国	中国农业大学
8	13	0.08		欧洲委员会
9	13	0.01	瑞典	瑞典农业科技大学
10	11	0.09	丹麦	丹麦科技大学



Chinese Acad Sci.中国科学院; Univ Santiago de.圣地亚哥大学; Univ Chinese Acad Sci.中国科学院大学; Aarhus Univ.奥胡斯大学; Univ Calif Davis.加州大学戴维斯分校; Wageningen Univ.瓦格尼根大学; China Agr Univ.中国农业大学; European Commiss.欧洲委员会; Swedish Univ Agr Sci.瑞典农业科技大学; Tech Univ Denmark.丹麦科技大学。

图7 机构间合作网络图

Fig. 7 Network diagram of cooperation among universities and research institutions

## 2.4 共被引文献分析

表4为1999—2021年期间碳足迹研究在食品领域内的前5篇高被引文献, 来源于4种不同的期刊。其中有2篇文献来自于世界顶刊*Nature*, Tilman等<sup>[57]</sup>主要研究了环境、饮食和人类健康的关系, 探讨了如何通过改变饮食模式来提高人类健康水平、减少全球农业的温室气体排放, 并分析了该问题在环境保护和公共卫生方面的重要性。De Vries等<sup>[58]</sup>比较了不同种类畜产品对环境的影响, 结果表明生产单位质量的牛肉造成了大规模的温室气体排放并占用大量的土地, 是未来最需要关注的食品之一。Foley等<sup>[59]</sup>对农业系统提出了针对性的碳减排措施, 提倡通过减少食物浪费、优化土地结构、提高种植效率等方式减少农业系统对环境的影响。仅仅通过提高生产效率不足以有效减少温室气体排放水平, 更重要的是推动人们改变消费方式, 如增大植物源蛋白在饮食中的比重, 减少肉类、乳类等高碳排放食品的摄入, 减少食物浪费等<sup>[60-61]</sup>。

表4 共被引文献前五位

Table 4 Top five most cited papers on carbon footprint

排名	共被引次数	来源	文献名
1	77	<i>Nature</i>	<i>Global diets link environmental sustainability and human health</i> <sup>[57]</sup>
2	60	<i>Livestock Science</i>	<i>Comparing environmental impacts for livestock products: A review of lifecycle assessments</i> <sup>[58]</sup>
3	56	<i>Food Policy</i>	<i>Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)</i> <sup>[60]</sup>
4	54	<i>Nature</i>	<i>Solutions for a cultivated planet</i> <sup>[59]</sup>
5	52	<i>Food Policy</i>	<i>The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitute</i> <sup>[61]</sup>

注: 共被引次数为1999—2021年间结果。

## 3 讨论

### 3.1 面临的挑战

当下食品碳足迹评价面临的挑战主要为分析对象的复杂性和结果的矛盾性。首先, 食品碳足迹的分析对象具有复杂性, 应用的领域包括粮谷类、果蔬类、肉类和乳类产品, 在实际研究中应根据实际对象确定研究范围和功能单位。在稻谷方面, 如Zhang Dan等<sup>[62]</sup>基于LCA法估算了中国玉米、小麦、大米的碳足迹, 结果分别为0.48、0.75 kg CO<sub>2</sub> eq和1.6 kg CO<sub>2</sub> eq, 高于美国、印度等国家的平均水平, 其主要的影响因素包括氮肥的施用量、农资能耗、秸秆燃烧和稻田的CH<sub>4</sub>排放。王上等<sup>[63]</sup>对比了“春绿豆-夏玉米”和“冬小麦-夏玉米”两种不同种植方式下的产量、收益和碳足迹差异, 发现“春绿豆-夏玉米”模式较后者收益增加20.2%, 单位面积和单位产值的碳足迹均减少35%以上, 可见前者在收益和碳足迹上均有较大优势, 有良好的经济效益与环境效益。在果蔬方面, Ribal等<sup>[64]</sup>分析了原产于西班牙的瓦伦西亚橙, 从种植到收获的周期内对比了有机和传统方式橙子种植的碳足迹差异, 每千克有机橙子和普通橙子的碳足迹

分别是0.82 kg CO<sub>2</sub> eq和0.67 kg CO<sub>2</sub> eq, 两者数值的差异性源于农业系统的差异性, 两者在农业系统的贡献度分别为19.8%和34.1%。容耀坤等<sup>[65]</sup>将LCA理论与果汁生产实际相结合, 得出每330 mL瓶装果汁的碳足迹0.267 kg CO<sub>2</sub> eq, 发现通过优化包装材料、改进设备工艺等措施, 每条生产线能够实现碳减排1 620 t, 根据当地的碳交易市场价预计能带来5.8万元的经济效益。Buratti等<sup>[66]</sup>对意大利牛肉的生产系统进行了碳足迹分析, 将有机农场和传统农场进行对比, 研究得出有机农场系统中每千克牲畜产生的碳足迹为24.6 kg CO<sub>2</sub> eq, 较传统系统的排放量多出了30%, 其中牲畜肠道发酵贡献了50%以上的温室气体排放, 最后从饲料生产、肠道发酵、粪肥管理和土壤碳平衡的角度提出了改进措施。Espinoza-Oria等<sup>[67]</sup>对西方典型的方便食品——三明治进行了分析, 认为每个三明治的碳足迹取决于食材组成, 但是自制三明治的碳足迹仍低于商业在售的三明治, 并提出了包括优化配方、改进包装模式、引导消费者购买行为等一系列改进方案。

分析结果具有矛盾性, 选取不同的功能单位往往会获得不同的分析结果, 这给之后的数据比较、汇总带来不便。Vergé等<sup>[68]</sup>在对加拿大11种乳制品进行碳足迹核算中, 发现每千克奶酪、奶粉、黄油的碳足迹明显高于其他产品, 分别为5.3、10.1、7.3 kg CO<sub>2</sub> eq, 若以每千克蛋白质计算, 则奶油、酸奶油、黄油的碳足迹最高, 分别为83、78、730 kg CO<sub>2</sub> eq。由于某些产品蛋白质含量很低, 导致其单位蛋白质的碳足迹很大, 因此, 普通的单位成分可能不适合作为功能单位使用, 同时功能单位的确定应从食品的实际功能出发, 考虑当地的饮食特征及食品的功能性权重。以牛奶为例, 在某些地区由于宗教或生活习惯的不同, 牛奶并不是作为蛋白质补充营养, 而是用于满足水分摄入需求、食物送服、洗浴等, 在这种情况下, 比较牛奶与其他饮料的碳足迹时显然以单位体积为单位更为合适<sup>[32]</sup>。农业生产的碳足迹往往通过单位产量产生的CO<sub>2</sub> eq表示, 假如其在生产中超额添加杀虫剂、灭菌剂、除草剂等农业用剂, 可短时间内提高其产量以降低单位产量的碳足迹, 但是这样也会污染土壤及地下水, 对环境产生新的影响。因此, 在食品生产中控制温室气体排放的同时应避免引入新的影响因子。Balafoutis等<sup>[69]</sup>采用了精准农业技术, 通过控制播种、农药喷洒、施肥、灌溉等因素, 在时间和空间上减少农业投入以实现碳减排。每种功能单位都有其自身的局限性, 为所有种类的食品找到一个共同的功能单位仍任重道远。为避免实际评估过程中因不确定性产生误判, 可使用多种功能单位从多个角度进行评价, 尽可能避免采用单一的功能单位<sup>[68]</sup>; 因此, 应尽快建立一个关于食品碳足迹核算的统一功能单位, 以降低对于不同食品比较的局限性。

### 3.2 政策环境

在国际上受经济全球化的影响, 世界经济呈现出了低碳全球化的特征, “减排降碳、碳达峰、碳中和”成为国际关注的焦点, 温室效应、资源枯竭、生态系统失衡等问题也促使越来越多的国家携手合作, 采取措施共同应对气候变化。据经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)统计数据显示, 全球目前已有54个国家实现碳达峰, 多数为发达国家, 至2030年将有包括中国在内的58个国家达到碳峰值。美国碳排放达峰的年份为2007年, 碳排放总量约为74.16亿t, 人均碳排放量约为24.5 t。受新冠疫情的影响, 其2020年能源燃烧碳排放总量降至45.74亿t, 较2019年下降了11个百分点, 新任总统拜登也宣布将重返《巴黎协定》, 通过优化能源结构、推广能源电子信息技术、推行市场优惠政策等措施以实现2050年碳中和的目标<sup>[70-71]</sup>。欧盟最早有9个成员国已于1990年实现碳达峰, 碳排放总量约为48.54亿t, 人均碳排放量约为11.3 t, 主要源于能源消耗和农业生产<sup>[70]</sup>。日本于2013年出现碳排放峰值, 碳排放总量为14.08亿t, 人均碳排放量为11.2 t, 碳达峰是实现碳中和的基础, 美国、欧盟、日本提出的碳中和的目标时间均为2050年, 并推出一系列政策来保障实施<sup>[70,72]</sup>。

2015年12月《巴黎协定》在巴黎气候变化会议上正式通过, 确定了“公平、共同、能力与责任并重”的原则, 要求各国依据国情自主制定减排方案, 力争在21世纪下半叶实现全球范围内的碳排放与清除间的平衡<sup>[73]</sup>。我国是《巴黎协定》积极的奠定者和贡献者, 同时作为世界上负责任的大国, 积极响应全球气候治理, 我国对碳减排政策的态度是“主动参与、积极倡导”。2017年我国多个城市成立了全国性的碳排放权交易市场, 利用市场的调控作用推动相关责任方自发地控制碳排放<sup>[74]</sup>。2020年9月我国在联合国第75届大会以及气候雄心峰会上表示, 在2030年前抵达碳排放高峰, 将力争在2060年前实现碳中和, 2030年将实现非化石能源消费比重达到一次能源的1/4, 提高森林蓄积量及清洁能源发电的总装机容量, 推动人类命运共同体的构建<sup>[75-76]</sup>。

低碳全球化促进了发达国家与发展中国家间的合作, 但也导致了碳贸易壁垒的产生和全球性贸易保护主义的抬头, 发达国家为缩短与发展中国家之间的贸易逆差对其碳排放较高的产品征收碳税、提高贸易门槛, 这也给我国发展国际贸易、实现经济转型带来了极大的挑战<sup>[77]</sup>。

### 3.3 消费者购买行为

碳标签是一种产品对环境的影响标识, 将产品生命周期内的碳足迹信息以标签的形式呈现给消费者, 从而影响消费者对商品的选择倾向性, 也能通过市场的调节作用来推动企业做出碳减排行动<sup>[78-79]</sup>。消费者在购买食品

时主要关注的是其价格、营养、质量等特性,因此可通过标签的形式尽可能向消费者呈现食品完整的属性,并从营养的角度引导消费者选择更为健康的饮食模式,如增大植物蛋白的摄入比例。Heusala等<sup>[80]</sup>认为植物蛋白较动物蛋白在土地利用、碳排放、环境污染等方面更具有优势,人们可以通过减少动物蛋白的摄入来降低温室气体排放。Nijdam等<sup>[61]</sup>对畜牧业和水产渔业的52种动物和植物蛋白源产品的碳足迹进行了比较分析,结果显示每千克动物源与植物源产品的碳足迹差异高达100倍,总体上看,动物源食品在碳排放、土壤污染、废弃物等对环境的影响方面远远超过植物源食品。在土地利用上,肉类、水产类、乳制品等生产约占用了全球83%的耕地,贡献了56%~58%的气体排放量,却仅仅提供了37%的蛋白质和18%的热量,以牛羊为代表的反刍动物单位蛋白质排放量约为豆类的250倍<sup>[10,81]</sup>。因此有必要对消费者的购买行为进行深入研究,以碳足迹标签的形式向消费者呈现出清晰的量化指标,鼓励消费者选择营养均衡、低碳环保、环境友好的食品,即在健康饮食的基础上选择碳排放量较少的食品,从食品的最终服务对象入手,将市场调控作用与食品产业链的优化结合起来。

#### 4 结 语

基于LCA理论对食品进行碳足迹分析是一个复杂的过程,所以应在考虑分析对象独特性的基础上应尽可能全面地收集数据和理论依据<sup>[1]</sup>。本文在生命周期视角下阐述了食品碳足迹评价模型,LCA理论包括目标与研究范围、清单分析、影响评价、结果解释4个步骤,重点叙述了功能单位、系统边界和食品产业链排放源的划分,完善了食品碳足迹的评估模型。同时本文还对1985—2021年Web of Science数据库内食品相关碳足迹的研究进行了可视化分析,从年发文量变化、国家科研合作和共被引文献分析的角度实现了对食品碳足迹研究领域的进展可视化,以发现关键信息和未来的热点。最后讨论了碳足迹评价在食品领域内面临的挑战、当下的政策环境以及消费者的购买行为,结合国内外的应用案例探讨了该理论模型应用于食品环境评价的可行性。

碳标签的出现有助于人们量化所购买食品以及所享受服务所产生的碳足迹,能够衡量人类的生产消费活动对温室效应的影响,推动食品相关的生产者优化生产方式、改进工艺,切实推进产业链的碳减排进度,响应国家低碳、绿色、可持续发展的号召,同时也能营造一种良好的社会氛围以促进消费者选择健康低碳的饮食或消费习惯。国外部分组织和机构早已对碳足迹标签进行了理论和实践探索,而我国仍处于起步阶段,尚未大规模推广,因此我国未来的发展目标应该是推动食品

企业的资源和技术转型,保障我国“2060年碳中和战略目标”的如期达成,同时应扩大与国外先进企业的合作,尽快完善碳贸易预警机制,为未来可能到来的碳贸易壁垒做好准备<sup>[82]</sup>。未来在对某一食品进行环境影响评估时仅考虑碳足迹是不全面的,具有很大的局限性,故可以将碳足迹、水足迹、生态足迹纳入“足迹家族”的综合足迹模型,通过3个指标间的信息互补,全面监测人类的生产消费行为对环境的影响,以弥补单靠碳足迹难以全面体现其对环境造成的压力的不足<sup>[83]</sup>。随着低碳全球化的出现,控制温室气体排放成为世界各国关注的焦点,目前国家间的碳达峰、碳中和进展不一,未来我国食品产业实现低碳化和可持续发展模式的转型仍任重而道远。

#### 参考文献:

- [1] 韩薇薇. 生命周期理论视角下的食品碳足迹分析及其应用研究进展:以国外主要肉类食品为例[J]. 食品工业科技, 2017, 38(15): 329-334. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.15.062.
- [2] 黄文秀. 国外产品碳足迹评价的发展[J]. 创新科技, 2012(5): 12-13. DOI:10.19345/j.cnki.1671-0037.2012.05.014.
- [3] SHAIKH M S, SHAIKH P H, QURESHI K, et al. Green house effect and carbon foot print[J]. Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 2018, 2: 120-125. DOI:10.1016/B978-0-12-803581-8.10456-4.
- [4] 周洁. 60亿、70亿……世界人口离100亿还有多远?[J]. 新民周刊, 2020(38): 86-87.
- [5] 王藺景, 范川, 何晓睿, 等. 温室效应成因及其与全球变暖关联性研究[J]. 今日财富, 2018(1): 163-164.
- [6] 李俊峰. 做好碳达峰、碳中和工作, 迎接低排放发展的新时代[J]. 世界环境, 2021(1): 16-19.
- [7] Maple Leaf Foods. Maple Leaf Foods becomes first major food company in the world to be carbon neutral[EB/OL]. (2019-11-07)[2021-03-10]. <https://www.mapleleaffoods.com/news/maple-leaf-foods-becomes-first-major-food-company-in-the-world-to-be-carbon-neutral/>.
- [8] Food Navigator. Nestlé sets carbon target for KitKat: 'We are reducing and removing emissions to reach carbon neutrality by 2025'[EB/OL]. (2021-04-21)[2021-06-10]. <https://www.foodnavigator.com/Article/2021/04/21/Nestle-sets-carbon-target-for-KitKat-We-are-reducing-and-removing-emissions-to-reach-carbon-neutrality-by-2025#>.
- [9] Our World in Date. CO<sub>2</sub> emissions dataset: Our sources and methods[DB/OL]. (2022-02-09)[2022-03-10]. <https://ourworldindata.org/co2-dataset-sources>.
- [10] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. Science, 2018, 360: 987-992. DOI:10.1126/science.aag0216.
- [11] Our World in Date. Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions[DB/OL]. (2019-11-06)[2021-03-10]. <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions>.
- [12] 佚名. 2020年全球二氧化碳排放量下降7%[J]. 科学大观园, 2021(1): 7.
- [13] MURPHY-BOKERN D. Understanding the carbon footprint of our food[J]. Complete Nutrition, 2010, 10: 61-63.
- [14] Our World in Date. Environmental impacts of food production [DB/OL]. (2021-06)[2022-03-10]. <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food>.

- [15] WACKERNAGEL M, REES W E. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 9.
- [16] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 696-708. DOI:10.11849/zrzyxb.20170197.
- [17] VIDERGAR P, PERC M, LUKMAN R K. A survey of the life cycle assessment of food supply chains[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 286(3): 1-28. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.125506.
- [18] CUCURACHI S, SCHERER L, GUINÉE J, et al. Life cycle assessment of food systems[J]. One Earth, 2019, 1(3): 292-297. DOI:10.1016/j.oneear.2019.10.014.
- [19] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework: ISO 14040[S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2006: I-VI.
- [20] International Organization for Standardization. Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification: ISO 14067[S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2018: I-V.
- [21] British Standards Institution. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services: PAS 2050[S]. London: British Standards Institution Copyright Office, 2011: I-V.
- [22] 陈震东, 张延杰, 胡志高, 等. 食品生产企业低碳发展示范概述[J]. 食品安全导刊, 2017(6): 26-27. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2017.06.014.
- [23] SCHAU E M, FET A M. LCA studies of food products as background for environmental product declarations[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(3): 255-264. DOI:10.1065/lca2007.12.372.
- [24] 张帆, 肖郡笑, 肖锋. 果类农产品碳足迹核算及碳标签推行策略: 以赣南脐橙为例[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 568-571. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.159.
- [25] 柳杨, 程志, 王廷宁, 等. 基于生命周期评价的宁夏出口枸杞干果产品碳足迹评价: 以宁夏某企业为例[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(2): 49-52. DOI:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.2016.02.014.
- [26] ZHU Zhiwei, ZHOU Shengnan, SUN Dawen, et al. Effects of different cooling methods on the carbon footprint of cooked rice[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 215: 44-50. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.07.014.
- [27] ROIBÁS L, RODRÍGUEZ-GARCÍA S, VALDRAMIDIS V P, et al. The relevance of supply chain characteristics in GHG emissions: the carbon footprint of Maltese juices[J]. Food Research International, 2018, 107: 747-754. DOI:10.1016/j.foodres.2018.02.067.
- [28] XU Zhongyue, XU Weijun, PENG Zijin, et al. Effects of different functional units on carbon footprint values of different carbohydrate-rich foods in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 907-916. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.07.091.
- [29] KASHYAP D, AGARWAL T. Carbon footprint and water footprint of rice and wheat production in Punjab, India[J]. Agricultural Systems, 2021, 186: 1-9. DOI:10.1016/j.agsy.2020.102959.
- [30] 徐淑娅, 贺婷, 王晓龙, 等. 基于生命周期评价法对燕麦碳足迹的研究[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(12): 1459-1467. DOI:10.7606/j.jssn.1009-1041.2019.12.09.
- [31] MA A J, ZHAO H Z, REN F Z. Study on food life cycle carbon emissions assessment[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1983-1987. DOI:10.1016/j.proenv.2010.10.213.
- [32] RS E, SUNDBERG C, HANSSON P A. Carbon footprint of food products[M]// MUTHU S S. Assessment of carbon footprint in different industrial sectors, volume 1. Singapore: Springer, 2014: 85-86. DOI:10.1007/978-981-4560-41-2\_4.
- [33] MURPHY-BOKERN D. Understanding the carbon footprint of our food[J]. Complete Nutrition, 2010, 10: 61-63.
- [34] Our World in Date. Land use[DB/OL]. [2021-03-10]. <https://ourworldindata.org/land-use>.
- [35] 聂亚玲, 肖焯, 曾玉娇, 等. 农业用地优化决策的食品-能源-水关联评价方法[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 78-88. DOI:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.009.
- [36] BELL S, BARRIOCANAL C, TERRER C, et al. Management opportunities for soil carbon sequestration following agricultural land abandonment[J]. Environmental Science & Policy, 2020, 108: 104-111. DOI:10.1016/j.envsci.2020.03.018.
- [37] VERMEULEN S J, CAMPBELL B M, INGRAM J S I. Climate change and food systems[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2012, 37: 195-222. DOI:10.1146/annurev-environ-020411-130608.
- [38] TIAN Z, NIU Y, FAN D, et al. Maintaining rice production while mitigating methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in China: evaluating tradeoffs by using coupled agricultural systems models[J]. Agricultural Systems, 2018, 159: 175-186. DOI:10.1016/j.agsy.2017.04.006.
- [39] MARTIN C, MORGAVI D P, DOREAU M. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale[J]. Animal, 2010, 4(3): 351-365. DOI:10.1017/S1751731109990620.
- [40] HILLIER J, HAWES C, SQUIRE G, et al. The carbon footprints of food crop production[J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2009, 7(2): 107-118. DOI:10.3763/ijas.2009.0419.
- [41] MERCIER S, MONDOR M, VILLENEUVE S, et al. The Canadian food cold chain: a legislative, scientific, and prospective overview[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 637-645. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2018.01.006.
- [42] 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: 1-11. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118053.
- [43] ROY Z, HALDER G. Replacement of halogenated refrigerants towards sustainable cooling system: a review[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2020, 3: 1-15. DOI:10.1016/j.cej.2020.100027.
- [44] LI Y Z, AHMED A, WATSON I, et al. Waste-to-biofuel and carbon footprints[M]// BHASKAR T, PANDEY A, RENE E, et al. Waste biorefinery. Amsterdam: Elsevier, 2020: 579-597. DOI:10.1016/B978-0-12-818228-4.00021-6.
- [45] 联合国. 《联合国气候变化框架公约》京都议定书[EB/OL]. [2021-03-10]. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpchinese.pdf>.
- [46] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2014: mitigation of climate change[R]. Cambridge: IPCC, 2014.
- [47] World Resources Institute. Product life cycle accounting and reporting standard: GHG protocol[S]. Washington: World Resources Institute, 2013.
- [48] 陈昭彦. 以果汁为例的一种产品碳足迹核算方法学[J]. 大众科技, 2019, 21(3): 18-21.
- [49] 刘红梅. 食品生命周期碳足迹评价研究[J]. 荆楚理工学院学报, 2012, 27(9): 13-16. DOI:10.3969/j.issn.1008-4657.2012.09.003.
- [50] STOESSEL F, JURASKE R, PFISTER S, et al. Life cycle inventory and carbon and water footprint of fruits and vegetables: application to a Swiss retailer[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(6): 3253-3262. DOI:10.1021/es2030577.
- [51] 李丽华, 王殿华. 低碳食品链碳减排研究综述及未来研究建议[J]. 科技管理研究, 2017, 37(1): 238-243. DOI:10.3969/j.issn.1000-7695.2017.01.042.
- [52] 廖仁郡. 基于生命周期理论的规模化养猪场碳足迹与水足迹研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 37-39.
- [53] FLYSJÖ A, CEDERBERG C, JOHANNESSEN J D. Carbon footprint and labelling of dairy products-challenges and opportunities[C]//

- Proceeding Joint Actions on Climate Change Conference, Department of Development & Planning. Aalborg: Aalborg University, 2009.
- [54] 杨万成, 杨卫华, 王毅萌. 碳足迹研究的知识图谱: 基于Cite Space与WoS核心合集[J]. 节能, 2020, 39(8): 123-126. DOI:10.3969/j.issn.1004-7948.2020.08.039.
- [55] 李杰, 陈超美. Cite space: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016: 90; 180-185.
- [56] ZHAO R, WU D, PATTI S. A bibliometric analysis of carbon labeling schemes in the period 2007–2019[J]. *Energies*, 2020, 13(16): 1-16. DOI:10.3390/en13164233.
- [57] TILMAN D, CLARK M. Global diets link environmental sustainability and human health[J]. *Nature*, 2014, 515: 518-522. DOI:10.1038/nature13959.
- [58] DE VRIES M, DE BOER I J M. Comparing environmental impacts for livestock products: a review of life cycle assessments[J]. *Livestock Science*, 2010, 128(1/2/3): 1-11. DOI:10.1016/j.livsci.2009.11.007.
- [59] FOLEY J A, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 2011, 478: 337-342. DOI:10.1038/nature10452.
- [60] GARNETT T. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)?[J]. *Food Policy*, 2011, 36: 23-32. DOI:10.1016/j.foodpol.2010.10.010.
- [61] NIJDAM D, ROOD T, WESTHOEK H. The price of protein: review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes[J]. *Food Policy*, 2012, 37(6): 760-770. DOI:10.1016/j.foodpol.2012.08.002.
- [62] ZHANG Dan, SHEN Jianbo, ZHANG Fusuo, et al. Carbon footprint of grain production in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-11. DOI:10.1038/s41598-017-04182-x.
- [63] 王上, 李康利, 聂江文, 等. 华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(6): 910-919. DOI:10.13930/j.cnki.cjea.190916.
- [64] RIBAL J, ESTRUCH V, CLEMENTE G, et al. Assessing variability in carbon footprint throughout the food supply chain: a case study of Valencian oranges[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(8): 1515-1532. DOI:10.1007/s11367-018-01580-9.
- [65] 容耀坤, 李仁旺, 贾江鸣, 等. 基于LCA的果汁制造过程的碳足迹核算[J]. *成组技术与生产现代化*, 2019, 36(1): 19-25. DOI:10.3969/j.issn.1006-3269.2019.01.004.
- [66] BURATTI C, FANTOZZI F, BARBANERA M, et al. Carbon footprint of conventional and organic beef production systems: an Italian case study[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 576: 129-137. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.10.075.
- [67] ESPINOZA-ORIAS N, AZAPAGIC A. Understanding the impact on climate change of convenience food: carbon footprint of sandwiches[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2018, 15: 1-15. DOI:10.1016/j.spc.2017.12.002.
- [68] VERGÉ X P C, MAXIME D, DYER J A, et al. Carbon footprint of Canadian dairy products: calculations and issues[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(9): 6091-6104. DOI:10.3168/jds.2013-6563.
- [69] BALAFOUTIS A, BECK B, FOUNTAS S, et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1-28. DOI:10.3390/su9081339.
- [70] 苏小环. 走进碳达峰碳中和 碳达峰: 世界各国在行动[EB/OL]. (2021-01-19)[2021-03-10]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_10857848](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_10857848).
- [71] 王能全. 碳达峰 美国的现状与启示[J]. *科学大观园*, 2021(10): 36-39.
- [72] 秦容军. 国外碳达峰碳中和经验借鉴及对我国煤炭行业发展的启示[J]. *煤炭经济研究*, 2021, 41(3): 23-27. DOI:10.13202/j.cnki.cer.2021.03.005.
- [73] 巢清尘, 张永香, 高翔, 等. 巴黎协定: 全球气候治理的新起点[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(1): 61-67. DOI:10.12006/j.issn.1673-1719.2015.243.
- [74] 田静, 刘学文. 低碳壁垒影响下中国低碳外贸发展的制度安排[J]. *价格月刊*, 2020(11): 73-79. DOI:10.14076/j.issn.1006-2025.2020.11.12.
- [75] 冯相昭. 积极探索大气污染物与温室气体协同减排[N]. *中国能源报*, 2020-12-21(004). DOI:10.28693/n.cnki.nshca.2020.002846.
- [76] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(2): 17-24. DOI:10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7380.
- [77] 刘璐, 李莉. 碳关税对我国对外贸易的影响及对策[J]. *商业会计*, 2019(20): 97-99. DOI:10.3969/j.issn.1002-2104.2012.02.007.
- [78] 孙永平. 中国碳市场的目标遵循、根本属性与实现逻辑[J]. *南京社会科学*, 2020(12): 9-18. DOI:10.15937/j.cnki.issn1001-8263.2020.12.002.
- [79] 殷可欣. 碳标签制度对中国国际贸易的影响和对策[J]. *商场现代化*, 2020(7): 69-70. DOI:10.14013/j.cnki.scxdh.2020.07.033.
- [80] HEUSALA H, SINKKO T, MOGENSEN L, et al. Carbon footprint and land use of food products containing oat protein concentrate[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 1-34. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122938.
- [81] TILMAN D, CLARK M. Global diets link environmental sustainability and human health[J]. *Nature*, 2014, 515: 518-522. DOI:10.1038/nature13959.
- [82] 兰梓睿. 发达国家碳标签制度的创新模式及对我国启示[J]. *环境保护*, 2020, 48(12): 71-73. DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.12.014.
- [83] GALLI A, WIEDMANN T, ERCIN E, et al. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100-112. DOI:10.1016/j.ecolind.2011.06.017.