

基于生命周期评价的我国稻米碳足迹核算*

马海波¹ 朱强²

(1. 南京财经大学粮食和物资学院, 南京 222000; 2. 湖州师范学院经济管理学院, 湖州 313000)

提 要: 党的二十大报告强调, 我们要积极稳妥推进碳达峰碳中和。民以食为天, 粮食是维持人类生命的基本需求, 粮食从生产、加工、运输、使用以及废弃处理等各阶段的能源消耗及其对环境的影响, 近年来开始受到国内外的广泛关注。文中基于生命周期理论, 利用实地调研数据结合相关文献, 分析计算我国稻米生命周期各阶段的碳排放。结果显示: 每千克普通稻米的碳排放为 1.1492kg, 农业生产阶段为稻米碳排放的主要阶段, 占据碳排放总量的 47.46%, 其次为使用阶段占 27.91%、加工阶段和运输阶段各占 18.28% 和 6.10%, 废弃处理阶段最少不足 0.26%; 每千克有机稻米的碳排放为 1.4042kg, 同样是农业生产阶段为碳排放消耗的主要阶段, 占据碳排放总量的 49.52%, 其次为使用阶段占 22.84%、加工阶段和运输阶段各占 14.96% 和 12.11%, 最后为废弃处理阶段仅占 0.57%。研究认为, 每千克有机米的碳排放量显著高于普通米的碳排放量, 这与有机米的产量较低有关。文中建议通过对稻米原料阶段的生长技术进行改善、大力推行农产品产地消费等方式降低稻米的碳排放。

关键词: 稻米; 生命周期; 碳足迹; 二十大报告

中图分类号: F124.5; F307.11

文献标识码: A

习近平总书记在第 75 届联合国大会上宣布力争在 2030 年达到碳达峰, 并争取在 2060 年实现碳中和^[1]。2020 年党的十九届五中全会上, 又提出要加快推动绿色低碳发展, 可见政府对双碳目标的高度重视。2022 年党的二十大报告提出积极稳妥推进碳达峰、碳中和, 是中央对我国碳达峰、碳中和的最新战略部署, 显示中国在“双碳”目标上更加坚定、更加自信。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指出, 如果人类持续进行当前的经济活动, 在本世纪可能使全球平均气温上升 2-4℃(IPCC 2013)^[2], 而这无疑会给人类的生存、经济发展、健康以及粮食安全造成巨大的威胁。温室气体排放的增加受到许多经济活动的影响, 如化石燃料的使用、工业废气的排放、农业耕作以及食品废弃物处理等等。近年来, 我国出台了一系列相关法律法规用以抑制全球气候变暖带来的威胁, 就农业生产方面的减排措施来说, 于 2015 年分别出台了《全国种植业调整规划 2016-2020》《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》《到 2030 年农药使用量零增长行动方案》等政策措施, 用以减少温室气体的排放。据统计, 中国农业碳排放约占二氧化碳当量排放总量的 5.4%, 其中水稻约占农业二氧化碳排放量的 16%。

碳足迹是用来衡量人类在日常生活中消耗的二氧化碳, 此概念最早来源于英国(Matthew et al., 2012)^[3]。目前关于碳足迹的研究主要集中在四个层面: 1) 个人碳足迹, 以针对个人日常生活中的衣食住行所导致的直接或间接的碳排放量加以计算的过程^[4-8]; 2) 产品碳足迹, 主要由单一产品或商品制造使用以及废弃阶段, 因燃料或能源使用导致的温室气体排放量^[9-13]; 3) 组织或企业碳足迹, 主要由组织(或企业)本身定义的范围内直接或间接的二氧化碳排放量, 相较于产品碳足迹还包括一些非生产性的活动, 如相关投资的碳排放量^[14-18]; 4) 国家/城市碳足迹, 主要着重于整个国家或城市的总体物质与能源使用所产生的碳排放量, 并着眼于原料、能源消耗、植被以及间接与直接、进口与出口所产生二氧化碳排放量差异。

* 收稿日期: 2022-7-23; 修回日期: 2023-3-19。

基金项目: 四川省哲学社会科学重点研究基地项目(PXKY-YB-202210); 省高校人文社会科学重点研究基地课题(CJCB2022-07); 成都市哲学社会科学重点研究基地项目(CXZL202203); 德阳市哲学社会科学重点研究基地项目(WHLY2023001) 资助。

作者简介: 马海波(1985-), 男, 汉族, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事粮食安全方面的研究。

通讯作者: 朱强(1989-), 男, 汉族, 江苏连云港人, 博士, 讲师, 主要从事生态经济方面的研究。

分析^[19-22]。

通过计算某种产品或活动的整个生命周期的碳足迹可以估算其对气候变化的贡献^[23]。生命周期评估(LCA)是通过生命周期思维的概念衡量产品于原料开采、生产制造、运输配送、使用以及废弃等各阶段过程,皆纳入生命周期计算范畴,评估所有过程投入产出可能产生的环境冲击^[24-27]。生命周期评估方法早期研究着重于废弃物、能源及容器的评估。从 20 世纪 90 年代起,才开始在环境领域受到重视,国际间有越来越多的生命周期评估报告与相关研究被提出。2018 年 8 月公告新版 ISO 14067: 2018。根据 ISO

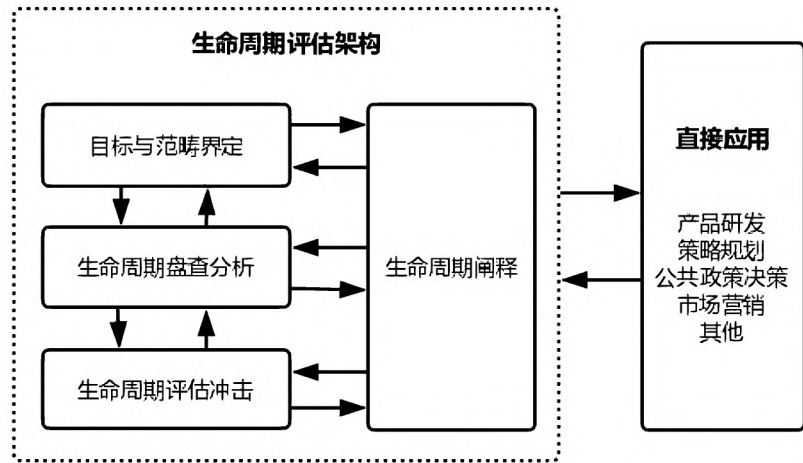


图 1 生命周期评估基本架构

Figure 1 Basic lifecycle assessment architecture

14067 环境管理 - 生命周期评估 - 原则与架构所述: 需考量环境冲击通常包含资源使用、人体健康、生态影响等类别, 评估流程(图 1)。在稻米整体生命周期评估架构研究上, Gain(2009) 指出应包含农药、肥料、种子生产甚至运输过程及包装过程皆应在内^[28]。

2022 年中央一号文件指出,“稳定全年粮食播种面积和产量, 坚持中国人的饭碗任何时候都要牢牢端在自己手中, 饭碗主要装中国粮。”习近平总书记在全国政协十三届五次会议也强调“粮食安全是‘国之大者’, 悠悠万事, 吃饭为大”, 更加凸显了粮食安全的极端重要性。水稻是重要的粮食作物, 在我国保障粮食安全中具有重要的地位和作用。2021 年我国水稻总产量为 2.1 亿 t, 种植总面积为 2992.1 万 hm², 平均产量为 7113.4kg/hm²。2015 - 2021 年间, 国内水稻亩产基本稳定在 458 - 474kg 左右。作为我国的主粮之一, 稻米在居民口粮消费中稻谷消费总量占到 60% 左右, 2021 年稻谷产量占粮食总产量的 31.17%, 水稻丰收了, 粮食安全就能得到保障^[29-30]。目前国内关于稻米碳排放的研究多集中于水稻生产环节的碳排放研究, 鲜有学者基于生命周期理论探讨稻米生命周期各阶段的碳排放。陈中督等(2018) 测算了位于双季稻主产区的长江中游地区双季稻农业生产阶段的碳排放, 认为应该适当减少双季稻种植面积并发展水稻节肥节水技术^[31]。刘建君等(2018) 测算了黑龙江省水稻生产阶段的碳足迹, 认为应该提高水资源利用效率、合理提高化肥利用率并大力推广节能减排^[32]。综合以上分析可以发现, 以往的研究在对农产品碳排放进行分析时, 往往只从农业生产阶段分析其碳排放。文中提出运用生命周期理论对我国稻米从生产至废弃阶段的整个生命周期的碳排放进行测算和分析。而当前关于水稻碳排放的研究并没有对水稻的品种进行区分, 文中通过实地调研对普通稻米与有机稻米的比较分析, 计算普通稻米与有机稻米的碳排放量。

1 研究区概况、研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

文中以泗洪稻米为研究对象, 探讨我国稻米生命周期各阶段的碳排放。泗洪境内河流纵横, 水体质量优良, 土层深厚, 土壤通透性良好, 有利于优质稻米生产。泗洪县是全国农业生态环境示范县, 全国商品粮生产基地, 也是江苏省主要产粮大县, 共有耕地面积 13.23 万 hm²。泗洪地区水稻常年种植面积 500km², 总产量达到 5 亿 kg。近几年, 泗洪县先后建成了 400km² 水稻无公害农产品生产基地和 66.7km² 有机农产品生产基地。泗洪大米以其优质的口感以及色泽透明的外观, 深受消费者喜爱^[33]。

1.2 数据来源

文中以稻米为研究对象, 探究其生命周期各阶段的碳排放构成, 通过实地问卷调查、访谈和文献搜集的方式计算稻米的碳排放。泗洪县普通稻米的种植面积为 4.87 万 hm², 产量为 4380 万 kg, 有机稻米的种植面积为 0.67 万 hm², 产量为 300 万 kg。普通稻米统一认定为泗洪稻米, 有机稻米经过相关部门认证为

有机米。收集水稻从摇篮到坟墓的调查数据,包括:农业生产阶段、加工阶段、运输阶段、使用阶段以及废弃处理阶段等五个阶段。文中数据来源于江苏省泗洪县水稻种植户走访式问卷调查,调研共收集农户调查问卷 190 份,有效问卷 178 份,问卷合格率达到 93%,问卷内容主要包括播种面积、化肥用量、种子来源、灌溉、运输、加工耗电量、农机投入消耗的柴油量和农药使用量等。同时文中还针对稻米生命周期不同阶段的不同主体进行了访谈,访谈对象包括农户、碾米厂、消费者等(运输阶段的数据由文献收集获取),其他相关数据来自《全国农产品成本收益资料汇编》《全国农产品成本资料收益汇编》《中国物价年鉴》以及农机通网站(<http://nongjitong.com/>)等。

1.3 系统边界及功能单位

文中引用 ISO 14067:2018 生命周期评估架构进行稻米生产生命周期盘查分析。由于生命周期评估时,会产生主观性的问题,而国内生命周期评估的相关资料库也未完整建立,因此目前多利用国外相关碳排放数据库,然而在环境背景与国情差异的影响下,数据的代表性仍有讨论与修正的必要。文中研究以我国主要的粮食作物稻米的生命周期评估为架构,针对泗洪县稻米产制过程的各个阶段加以说明,并进行研究的范围界定,拟定相关功能单位以及研究假设,其内容将于以下各环节进行说明。以泗洪县 1kg 有机米和普通米功能单位生命周期为评估基准,生命周期流程图(图 2)。

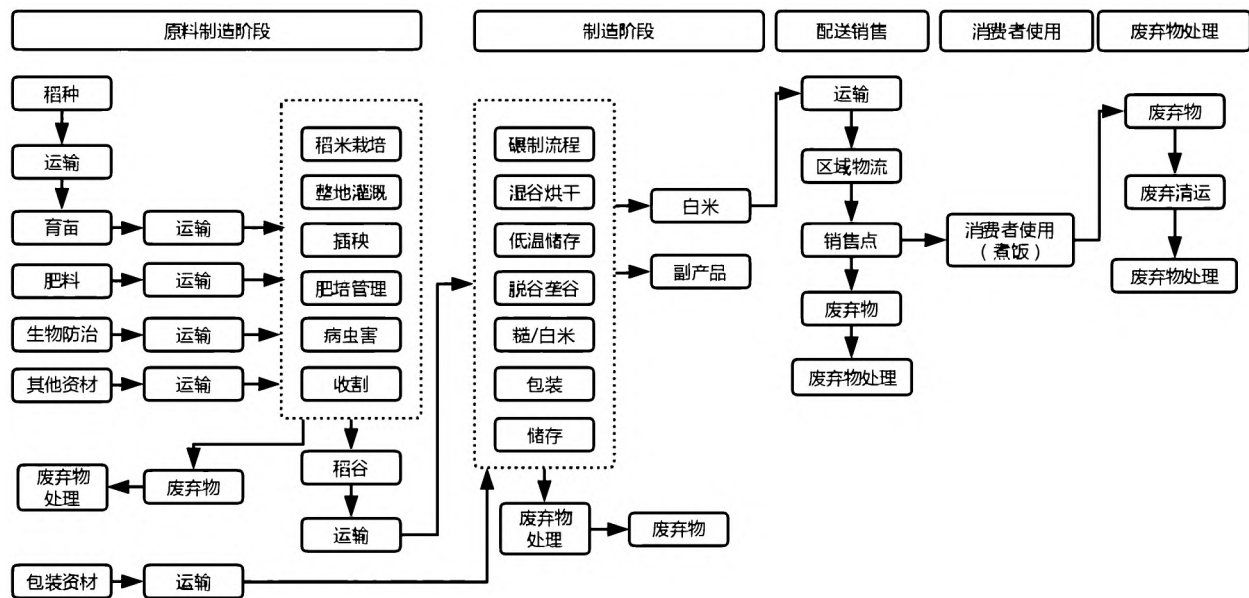


图 2 稻米生命周期流程图

Figure 2 Flow chart of rice life cycle

稻米的生命周期分为农业生产阶段、加工处理阶段、交通运输阶段、使用阶段以及废弃处理阶段等五个阶段。系统边界范畴为从原料取得至废弃阶段整个产品生命周期。因此,可将产品生命周期分为生产、加工、运输、使用、废弃处理五个阶段进行碳排放的测算。功能单位以 1kg 稻米的生命周期为评估标准。稻米生命周期系统边界(图 3)。

文中以我国居民主要粮食作物稻米为主要研究对象,以 1kg 稻米的生命周期为标准,消费者购买使用 1kg 的稻米并以此来进行系统边界排除厨余计算。运输阶段普通稻米假设从泗洪县运送至南京销售,有机稻米假设从泗洪县运输至上海销售,而使用阶段则以五人份使用的用量情境方式假设。

1.4 碳排放计算方法

$$CF = \sum_{i=1}^n Q_i \times EF_i$$

式中,CF 为碳排放, Q_i 为物质或活动的数量或强度数据(质量/体积/千瓦时/千米), EF_i 为碳排放因子(CO_2eq /单位)。

通过与泗洪县稻米合作社、泗洪稻米小镇、泗洪水稻育苗中心以及加工碾米厂联系,进行调研访谈取得相关调研数据,而水稻种植时所产生的甲烷和氧化亚氮等资料,则根据国内的相关研究文献参考计算,调查计算方法如下:

1.4.1 农业生产阶段碳排放

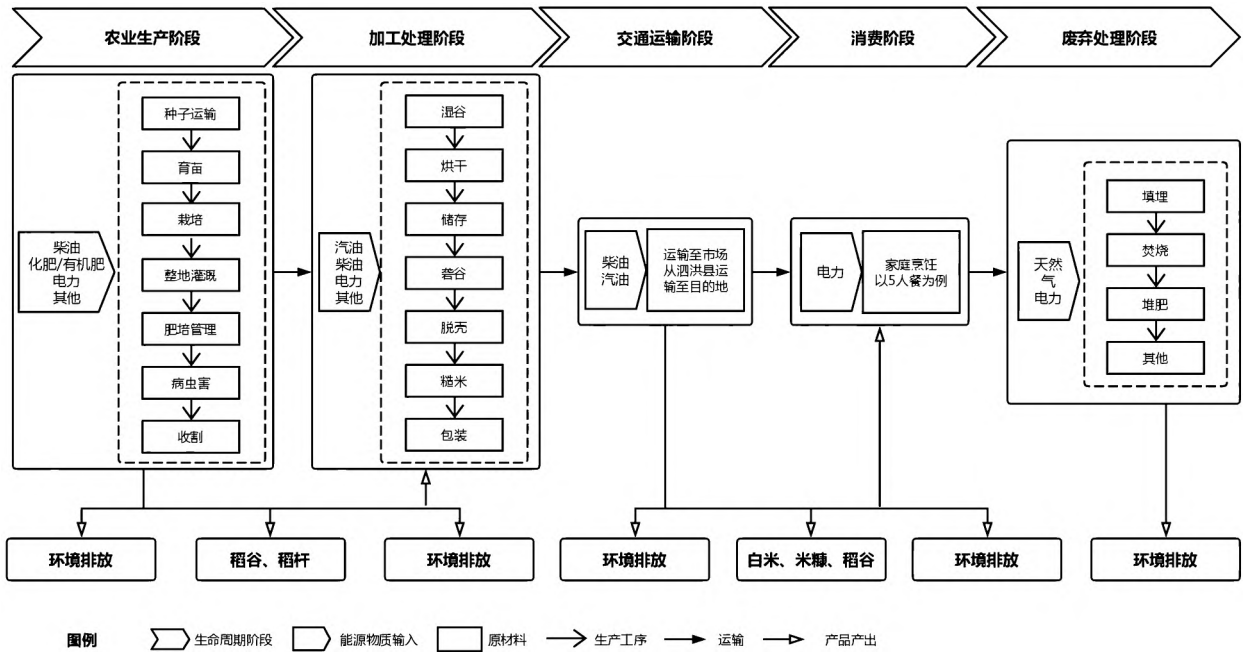


图 3 稻米生命周期系统边界图

Figure 3 Boundary of rice life cycle system

农业生产阶段的碳排放量主要包括农业物资投入所产生的碳排放、水稻生长发育、土壤破坏、畜禽肠道以及粪便管理系统过程中所产生的 CH₄、N₂O 排放等。该阶段的稻米种植方式分为稻米原料取得、稻米生长以及收割阶段三个部分，其中种子经由淮南市运至泗洪县三年更换一次，在泗洪县育苗中心育苗后，配送至当地种植。稻米种植过程的阶段包括：整地灌溉、插秧、肥培管理、病虫害防治、收割等阶段。农业生产阶段碳排放的计算公式如下：

$$CF_{\text{agricultural}} = \sum_{n=1}^4 CF_{\text{agricultural} \cdot n}$$

式中，CF_{agricultural} 为农业生产阶段的碳排放，CF_{agricultural · n} 分别表示农用物资投入所引发的碳排放、水稻生长发育过程中所产生的 CH₄ 排放、农作物种植破坏土壤所导致的 N₂O 排放以及畜禽养殖的碳排放等。农业生产阶段的排放系数(表 1)。

1.4.2 制造阶段碳排放

经由实地调查得知，碾米厂的制造流程主要为湿谷、烘干、低温储存、砻谷、脱壳、糙米、白米包装等流程。制造阶段碳排放的计算公式如下^[34]：

$$CF_{\text{processing}} = \sum R \times Ene_{m \cdot \text{per}} \times EF_{n \cdot \text{energy}}$$

式中，CF_{processing} 为加工处理阶段碳排放，Ene_{m · per} 为第 m 种加工工具的单位能耗，EF_{n · energy} 为第 n 种能源的碳排放系数。碾米厂的加工制造阶段相关碳排放系数(表 2)。

1.4.3 运输阶段碳排放

运输阶段以公路运输为主，运输距离采用百度地图进行估算，普通稻米的运输距离为 198km，有机米的运输距离为 455km。运输阶段碳排放的计算公式如下：

$$CF_{\text{distribution}} = \sum R \times D_i \times Ene_{\text{per}} \times 0.372$$

式中：CF_{distribution} 为运输阶段碳排放，R 为粮食重量，D_i 为运输距离；Ene_{per} 为运输方式的单位能耗；

表 1 生产阶段碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficient at each rice production stage

| 项 目 | 碳排放系数 | 数据来源 |
|---------|--|------------|
| 种子(运输) | 1.66 kgCO ₂ eq/tkm | SimaPro 软件 |
| 插秧机(柴油) | 3.15 kgCO ₂ eq/L | SimaPro 软件 |
| 有机肥料(氮) | 9.18 kgCO ₂ eq/kg | SimaPro 软件 |
| 有机肥料(磷) | 1.18 kgCO ₂ eq/kg | SimaPro 软件 |
| 有机肥料(钾) | 0.666 kgCO ₂ eq/kg | SimaPro 软件 |
| 氮肥 | 1.53 kgCO ₂ eq/kg | CLCD0.7 |
| 磷肥 | 1.63 kgCO ₂ eq/kg | CLCD0.7 |
| 钾肥 | 0.65 kgCO ₂ eq/kg | CLCD0.7 |
| 除草剂 | 10.15 kgCO ₂ eq/kg | CLCD0.7 |
| 杀虫剂 | 16.61 kgCO ₂ eq/kg | CLCD0.7 |
| 杀菌剂 | 10.57 kgCO ₂ eq/kg | CLCD0.7 |
| 稻田甲烷 | 0.1038 kgCO ₂ eq/m ² | SimaPro 软件 |
| 稻田氧化亚氮 | 0.082 kgCO ₂ eq/m ² | SimaPro 软件 |

表 2 加工阶段碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficient at processing stage

| 项目 | 碳排放系数 | 数据来源 |
|----|---|------------|
| 电力 | 0.532 kgCO ₂ eq/KWh | SimaPro 软件 |
| 水 | 0.244 kgCO ₂ eq/m ³ | SimaPro 软件 |
| 柴油 | 3.15 kgCO ₂ eq/L | SimaPro 软件 |
| 煤油 | 2.568 kgCO ₂ eq/L | SimaPro 软件 |

0.372 kgCO₂eq 为汽油的碳排放系数。运输阶段的相关碳排放系数(表3)。

1.4.4 使用阶段碳排放

使用阶段以0.8kw的电饭煲煮饭,假设5人份450g大米兑0.45L自来水,含清洗2次,总共使用自来水1.35L。以0.8kw电饭煲,加热一次约20分钟,消耗约2.27kW·h。则每1kg功能单位的大米,约消耗电力0.59kW·h,使用自来水约3L。使用阶段的碳排放计算公式如下:

$$CF_{\text{consumption}} = \sum R \times Ene_{x \cdot \text{per}} \times EF_{y \cdot \text{energy}}$$

式中,CF_{consumption}为餐饮消费阶段碳排放,Ene_{x·per}为第x种消耗的单位能耗,EF_{y·energy}为第y种能源的碳排放系数。使用阶段的相关碳排放系数(表4)。

1.4.5 废弃物处理阶段碳排放

废弃物处理主要指的是碾米厂包装袋的废弃物处理,稻米包装为塑料袋的焚化和填埋。废弃物处理阶段的碳排放计算公式如下^[35]:

$$CF_{\text{management}} = \sum R \times Ene_{m \cdot \text{per}} \times EF_{n \cdot \text{energy}}$$

式中,CF_{management}为废弃处理阶段碳排放,R为重量,Ene_{m·per}为第m种废弃物处理方式的单位能耗,EF_{n·energy}表示第n种废弃物处理方式的碳排放系数。废弃物处理阶段的碳排放系数(表5)。

基于生命周期过程的稻米碳排放,由各阶段的碳排放叠加得到。即:

$$CF = \sum_{p=1}^5 CF_p$$

2 结果与分析

2.1 不同稻米产品碳排放测算

文中基于生命周期理论,通过计算1kg普通稻米与有机稻米生命周期各个阶段:生产阶段、加工阶段、运输阶段、使用阶段以及废弃处理阶段的总和后发现,普通稻米所产生的碳排放量为1.1492 kgCO₂eq,有机稻米所产生的碳排放量为1.4042 kgCO₂eq。其中各阶段碳排放结果比例(表6、图4)。

表6 国内不同米产品碳排放各阶段碳排放比较 单位:kgCO₂eq/kg

Table 6 Comparison of carbon emissions between two different rice products at different stages in China

| | 碳排放 | 生产 | 加工 | 运输 | 使用 | 废弃 |
|------|--------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| 普通稻米 | 1.1492 | 0.5454 (47.46%) | 0.2101 (18.28%) | 0.07 (6.10%) | 0.3207 (27.91%) | 0.003 (0.26%) |
| 有机稻米 | 1.4042 | 0.6954 (49.52%) | 0.2101 (14.96%) | 0.17 (12.11%) | 0.3207 (22.84%) | 0.008 (0.57%) |

2.2 不同稻米各阶段碳排放测算

由表6、图4可知在普通稻米生命周期各阶段中,农业生产阶段的碳排放为0.5454 kgCO₂eq,其次为使用阶段0.3207 kgCO₂eq,加工阶段为0.2101 kgCO₂eq,运输阶段为0.07 kgCO₂eq,废弃阶段最小,碳排放为0.003 kgCO₂eq,总量为1.1492 kgCO₂eq。由表6可知在有机米生命周期各阶段中,农业生产阶段碳排放为0.6954 kgCO₂eq,其次为使用阶段0.3207 kgCO₂eq,加工阶段为0.2101 kgCO₂eq,运输阶段为0.17 kgCO₂eq,废弃阶段最小碳排放为0.008 kgCO₂eq,总量为1.4042 kgCO₂eq。

稻米的碳排放阶段分别由生产、加工、运输、使用以及废弃等阶段。从表6中可以看出普通稻米生产阶段碳排放比例47.46%为最高,其次为使用阶段27.91%、加工阶段18.28%以及运输阶段6.10%,废弃阶段占比最低为0.26%。从表6中可以看出有机稻米生产阶段碳排放比例49.52%为最高,其次为使用阶段22.84%、加工阶段14.96%以及运输阶段12.11%,废弃阶段占比最低为0.57%。

经生命周期评价后发现,稻米生产阶段碳排放贡献主要来自于甲烷、氧化亚氮产生、农机耗用柴油以及肥料使用,加工阶段则是碾米厂低温储存耗用电力与碾米加工使用的煤油,运输阶段碳排放为公路运输,使用阶段碳排放以煮饭时使用电力,废弃阶段碳排放则以包装耗材焚化和填埋为主。

表3 运输阶段碳排放系数

Table 3 Carbon emission coefficient at transport stage

| 项目 | 碳排放系数 | 数据来源 |
|----|--------------------------------|------------|
| 运输 | 0.372 kgCO ₂ eq/tkm | SimaPro 软件 |

表4 使用阶段碳排放系数

Table 4 Carbon emission coefficient at edible stage

| 项目 | 碳排放系数 | 数据来源 |
|----|---|------------|
| 电力 | 0.532 kgCO ₂ eq/KWh | SimaPro 软件 |
| 水 | 0.244 kgCO ₂ eq/m ³ | SimaPro 软件 |

表5 废弃阶段碳足迹排放系数

Table 5 Carbon footprint emission coefficient at waste stage

| 项目 | 碳排放系数 | 数据来源 |
|----|-------------------------------|--------------------------------------|
| 焚烧 | 0.887 kgCO ₂ eq/kg | SimaPro 软件 |
| 填埋 | 0.014 kgCO ₂ eq/kg | Eriksson et al. 2015 ^[36] |

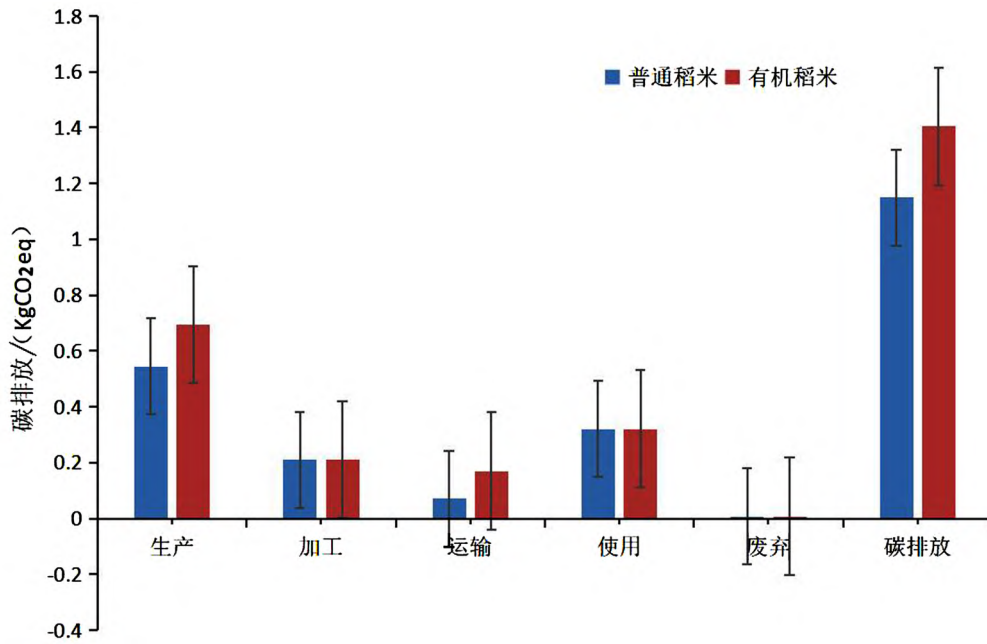


图 4 生命周期各阶段普通稻米与有机稻米碳排放量

Figure 4 Carbon emissions of normal and organic rice at different stages of the life cycle

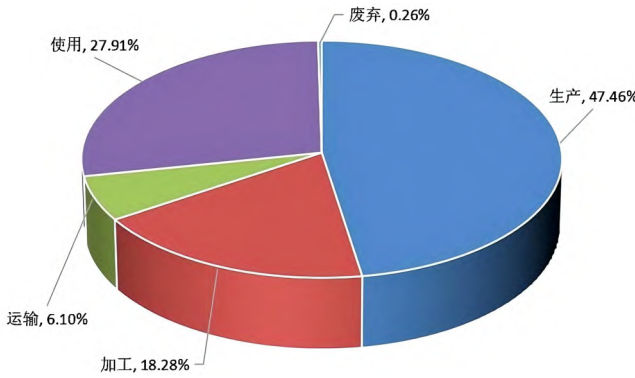


图 5 普通稻米生命周期各阶段碳排放比例

Figure 5 Carbon emission ratio at each stage of the life cycle of normal rice

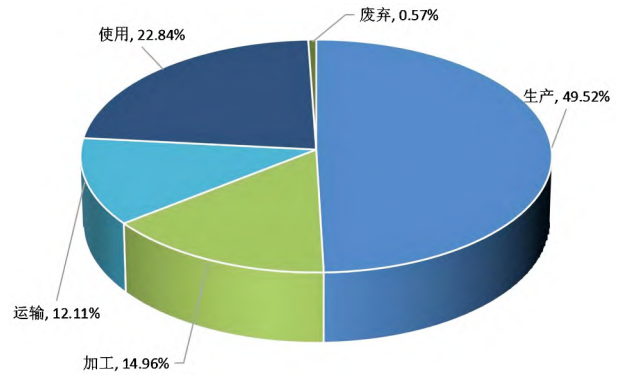


图 6 有机稻米生命周期各阶段碳排放比例

Figure 6 Carbon emission ratio at each stage of the life cycle of organic rice

2.3 敏感性分析

文中按照对环境影响的贡献从高到低选择普通稻米和有机稻米的 5 个输入变量: 普通稻米分别选择用电量、CH₄、N₂O、氮肥以及运输距离等变量, 有机稻米分别选择用电量、CH₄、N₂O、运输距离以及煤油用量等变量。在保持其他变量不变的情况下, 研究变量保持在 -10%、-8%、-6%、-4%、-2%、2%、4%、6%、8%、10% 的变动范围, 通过对比研究变量前后的环境影响的变化情况, 来判断普通稻米和有机稻米生命周期对研究变量变化的敏感性。如图 7 和图 8 所示, 显示了变量的变化对普通稻米和有机稻米生命周期评价结果的影响, 纵坐标表示普通稻米和有机稻米碳排放总量变化的百分比, 横坐标表示普通稻米和有机稻米敏感因素变化的百分比。例如, 当用电量增加 10% 时, 普通稻米的碳排放量增加约为 3.83%, 有机稻米的碳排放量增加约为 3.11%。当普通稻米的 CH₄、N₂O、氮肥以及运输距离等变量发生同样的变化时, 生命周期评价结果分别增加约 1.74%、1.39%、0.70% 和 0.61%; 当有机稻米的 CH₄、N₂O、运输距离以及煤油用量等变量发生同样的变化时, 生命周期评价结果分别增加约 2.69%、2.12%、1.20% 和 0.57%。由此可以发现用电量的变化无论是对普通稻米还是对有机稻米碳排放量的影响都是最大的。敏感性分析提供了减少稻米碳排放量的轻重缓急, 从总体上来看, 在农业加工环节和食用环节通过节约用电和技术手段等措施减少对电量的用量对减少环境的影响是最有效的^[37]。

3 讨论

3.1 与同类研究结果的比较

文中基于生命周期理论,通过计算 1kg 普通稻米与有机稻米生命周期各个阶段:生产阶段、加工阶段、运输阶段、使用阶段以及废弃阶段的总和后,普通稻米所产生的碳排放量为 1.1492 kgCO₂eq,有机稻米所产生的碳排放量为 1.4042 kgCO₂eq。通过与其他国家和地区稻米碳排放的比较发现,我国单位产量普通稻米的碳排放量低于其他国家和地区,而单位产量有机稻米的碳排放量除了日本以外,高于其他国家和地区。由此可见,生产栽培方式的差异是我国普通稻米与有机稻米碳足迹差异较大的主要原因;而技术水平、生产方式的差异是导致我国稻米碳足迹与国外有较大差异的主要原因。

3.2 有机稻米与普通稻米的比较

通过有机稻米与普通稻米二氧化碳的全部活动数据、排放系数与计算结果进行分析发现:普通稻米的农业生产阶段 0.5454kgCO₂eq (47.46%)、使用阶段0.3207kgCO₂eq(27.91%)、加工阶段为 0.2101kgCO₂eq(18.28%)、运输阶段为0.07 kgCO₂eq(6.10%) 以及废弃阶段 0.003 kgCO₂eq (0.26%) ,总量为 1.1492kgCO₂eq。有机稻米生命周期各阶段中,农业生产阶段碳排放为 0.6954kgCO₂eq(49.52%)、使用阶段 0.3207kgCO₂eq(22.84%)、加工阶段为 0.2101 kgCO₂eq(14.96%)、运输阶段为 0.17 kgCO₂eq(12.11%) 以及废弃阶段最小碳排放为 0.008 kgCO₂eq(0.57%) ,总量为 1.4042 kgCO₂eq。对有机稻米与普通稻米产品生命周期各阶段的碳排放比较发现,有机稻米的碳排放主要贡献来自于农业生产阶段,占比达 49.52%。进一步分析比较发现,有机稻米与普通稻米相比,产品碳排放同样都以农业生产阶段为主要碳排放来源,农业生产阶段除水稻田本身产生 CH₄、N₂O 特质外,大多是在肥料与农机使用过程中的碳排放。

3.3 稻米生命周期各阶段的低碳策略

为实现双碳目标,我国各产业目前都在加紧研拟降低温室气体排放的策略。在农业方面,稻米作为主要的粮食作物,也需要调整现行生产方式,以降低碳足迹,减少全球气候变暖的趋势。在稻米整个生命周期中,各阶段都产生了多寡不一的碳排放。文中建议稻米生产者或管理者,针对稻米原料阶段的生长技术进行改善,不仅可以减少环境污染的影响,也能降低能源资源的消耗,从而朝向精准农业、合理化施肥以及低碳可持续农业的趋势发展。同时,提倡推行农产品产地直销,通过对有机稻米和普通稻米运输阶段的碳

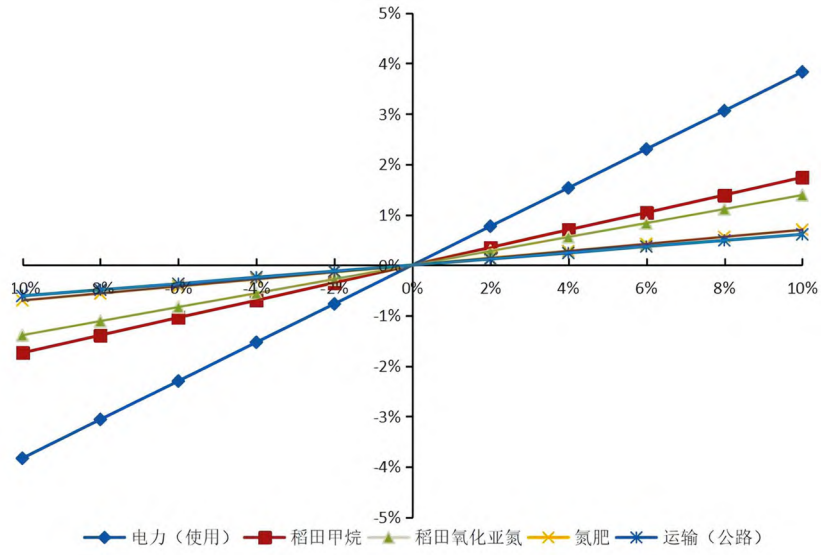


图7 普通稻米碳排放敏感性分析
Figure 7 Carbon emission sensitivity of normal rice

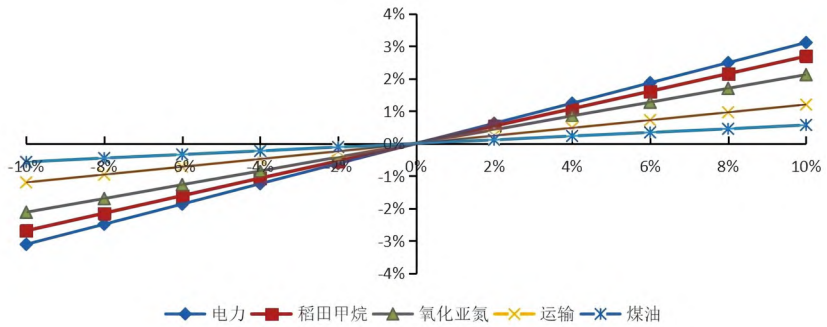


图8 有机稻米碳排放敏感性分析
Figure 8 Carbon emission sensitivity of organic rice

表7 世界各国和地区的碳排放比较
Table 7 Comparison of rice carbon emissions between countries and regions in the world 单位: kgCO₂eq/kg

| 国家和地区 | 稻米 | 碳足迹 | 参考文献 |
|-------|------|-----------|--|
| 中国大陆 | 普通稻米 | 1.1492 | 文中研究 |
| | 有机稻米 | 1.4042 | 文中研究 |
| 日本 | 普通稻米 | 1.46 | Hokazono and Hayashi, 2012 ^[38] |
| 印度 | 普通稻米 | 1.2 - 1.5 | Pathak et al. (2010) ^[39] |
| 台湾地区 | 普通稻米 | 1.18 | 吴以健等(2013) ^[40] |

排放的测算,发现 1kg 有机稻米和普通稻米在运输阶段分别产生了 0.17kg 和 0.07kg 的碳排放,占整个生命周期碳排放的 12.11% 和 6.10%,分析其原因,主要与运输距离有关系。因此出于降低运输阶段碳足迹以及保证食材新鲜度的考虑,建议政府应大力推行农产品产地直销运动,不仅可以降低农产品运输阶段的碳足迹,也可以保证食材的新鲜程度。

4 结论

综上所述,文中对普通稻米与有机稻米进行了全生命周期碳排放的分析与探讨,进而得出普通稻米与有机稻米的二氧化碳排放量,并探究了不同生命周期各阶段的二氧化碳排放量。每千克普通稻米的碳排放为 1.1492kg,农业生产阶段为碳排放消耗的主要阶段,占据碳排放总量的 47.46%,其次为使用阶段占 27.91%、加工阶段和运输阶段各占 18.28% 和 6.10%,废弃处理阶段最少不足 0.26%;每千克有机稻米的碳排放为 1.4042kg,同样是农业生产阶段为碳排放消耗的主要阶段,占据碳排放总量的 49.52%,其次为使用阶段占 22.84%、加工阶段和运输阶段各占 14.96% 和 12.11%,最后为废弃处理阶段仅占 0.57%。文中分析了影响稻米碳排放量的主要因素,希望能为我国农业的节能减碳提供参考。从总体上来看,有机稻米的碳排放量普遍高于普通稻米的碳排放量,其主要原因在于有机稻米的产量显著低于普通稻米,且有机稻米的运输距离高于普通稻米。

参考文献

- [1] 陈诗一, 祁毓. 实现碳达峰、碳中和目标的技术路线、制度创新与体制保障[J]. 广东社会科学, 2022(2): 15-23; 286.
- [2] IPCC WORKING GROUP I. Climate change 2013: The physical science basis - Conclusions[J]. Bulletin Fur Angewandte Geologie, 2013, 18(2): 5-19.
- [3] MATTHEW J F, DEFIN A. 2012 carbon footprint analysis: Concepts, methods, implement, and case studies[M]. New York: CRC Press, 2012: 3-8.
- [4] 王立国, 廖为明, 黄敏, 等. 基于终端消费的旅游碳足迹测算 - 以江西省为例[J]. 生态经济, 2011(5): 121-124; 168.
- [5] 刘羿鑫, 王俊岭, 付斌, 等. 北京市大学生碳排放特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(7): 31-36.
- [6] 张红, 韩子旭, 熊航. 城市消费者对碳标签牛奶的偏好及其异质性来源 - 基于选择实验法的分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(1): 112-122.
- [7] 朱宏城, 田甜. 微观视角下居民消费碳排放结构及影响因素研究 - 基于 PLS-SEM 模型的实证分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 59-65.
- [8] 窦羽星, 刘秀丽. 居民食物消费变化引致的环境足迹测算[J]. 中国环境科学, 2023, 43(1): 446-455.
- [9] 张丹, 成升魁, 高利伟, 等. 城市餐饮业食物浪费碳足迹 - 以北京市为例[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5937-5948.
- [10] 马海波, 朱强. 碳中和目标下夜市鸡排碳足迹分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 41-47.
- [11] 庞茹月, 王明辉, 孔洁, 等. 湖北省不同花生轮作种植体系碳氮足迹[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3997-4003.
- [12] 谭震坤. 考虑温室气体减排的区域居民食物消费结构优化研究[D]. 东莞: 东莞理工学院, 2022.
- [13] 刘夏青, 杨本晓, 张建华, 等. 钢铁产品碳足迹: 概念内涵、影响因素与对策建议[J/OL]. 中国有色冶金: 1-6 [2023-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5066.TF.20221128.0911.010.html>.
- [14] 黄英. 酒店碳足迹测算研究综述[J]. 生态经济, 2015, 31(10): 95-102.
- [15] 朱强, 李丰, 钱壮. 全国高校食堂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.
- [16] 吴欣, 刘熠娜, 任宜欣, 等. 高校碳足迹指标体系核算及减排策略研究: 以西北大学为例[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(S1): 187-193.
- [17] 慈志敏, 余强, 马鸿雁, 等. 双碳背景下中药制药企业碳足迹产生环节与核算模型[J]. 中草药, 2022, 53(24): 7980-7988.
- [18] 李婧. 高校食堂食物浪费的环境、成本影响及驱动因素分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [19] 熊欣, 张力小, 张鹏鹏, 等. 城市食物代谢的动态过程及其水-碳足迹响应 - 以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1886-1896.
- [20] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏伟, 等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380.
- [21] 金欢欢. 我国碳足迹的多维测度、分解与优化研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022.
- [22] 胡笑晗. 广东省城市环境足迹核算及水-碳耦合关联分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [23] 朱凤婷, 李奥, 于晓曼, 等. 马殿荣. 有机与常规培肥模式生产水稻的碳足迹[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2233-2241.
- [24] EPA. Defining life cycle assessment(LCA) [R]. Washington D. C.: EPA, 2010.
- [25] LIU J G, 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.
- [26] 刘松, 王效琴, 胡继平, 等. 施肥与灌溉对甘肃省苜蓿碳足迹的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 556-565.
- [27] 孙威, 张继红, 吴文广, 等. 基于生命周期法的养殖海带的碳足迹评估[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 16-23.

- [28] GAIN J, SARKAR J, KUNDU S. General model for the computation of energy eigen values in aperiodic multiple quantum well structures [C]// 2008 2nd National Workshop on Advanced Optoelectronic Materials and Devices. Varanasi: IEEE, 2009.
- [29] 孔祥智, 何欣玮. 粮食安全背景下早稻生产的战略价值与发展路径[J]. 农村经济 2022(10): 37-46.
- [30] 陈绪昊, 高强, 陈新平等. 东北三省玉米生产资源投入和环境效应的时空特征[J]. 中国农业科学 2022, 55(16): 3170-3184.
- [31] 陈中督, 徐春春, 纪龙等. 基于农户调查的长江中游地区双季稻生产碳足迹及其构成[J]. 中国水稻科学 2018, 32(6): 601-609.
- [32] 刘建君, 陈红. 黑龙江省水稻生产碳足迹分析[J]. 南方农业学报 2018, 49(8): 1667-1673.
- [33] 朱永猛, 施继标, 蔡孝洲. 乡村振兴背景下泗洪县优质稻米产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技 2019(9): 247-248.
- [34] 王钰乔, 濮超, 赵鑫等. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势[J]. 资源科学 2018, 40(9): 1800-1811.
- [35] 朱强, 段继红, 钱煜昊等. 基于生命周期理论的有机米碳足迹分析 - 以金寨县高山有机米为例[J]. 干旱区资源与环境 2019, 33(10): 41-46.
- [36] ERIKSSON M, STRID I, HANSSON P A. Carbon footprint of food waste management options in the waste hierarchy - Swedish case study [J]. Journal of Cleaner Production 2015, 93: 115-125.
- [37] 李婧. 高校食堂食物浪费的环境、成本影响及驱动因素分析[D]. 太原: 太原理工大学 2022.
- [38] HOKAZONO S, HAYASHI K. Variability in environmental impacts during conversion from conventional to organic farming: A comparison among three rice production systems in Japan [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 28: 101-112.
- [39] PATHAK H, JAIN N, BHATIA A et al. Carbon footprints of Indian food items [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment 2010, 139(1-2): 66-73.
- [40] 吴以健, 杨志维, 卢虎生. 稻作环境亲和栽培之环境影响评估[J]. 台中区农业改良场特刊 2013(119): 85-98.

Accounting carbon footprint of rice in China based on life cycle evaluation

MA Haibo¹ ZHU Qiang²

(1. College of Food and Material Science, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 222000; 2. School of Economics and Management, Huzhou University, Huzhou 313000, China)

Abstract: The report of the 20th National Congress of the Communist Party of China emphasizes that we should actively and steadily promote carbon peaking and carbon neutrality. Food is the most important thing for the people, and grain is the basic requirement for maintaining human life. The energy consumption and environmental impact of grain at various stages of production, processing, transportation, consumption and waste disposal have attracted widespread attention at home and abroad in recent years. Based on the life cycle theory, we analyze and calculate the carbon emissions of rice at each stage of its life cycle by using field survey data and relevant literature. The results show that the carbon emission of each kilogram of ordinary rice is 1.1492kg, and the agricultural production stage is the main stage for carbon emissions of rice, accounting for 47.46% of the total carbon emission, followed by the consumption stage, accounting for 27.91%, the processing stage and the transportation stage account for 18.28% and 6.10%, respectively, and the waste disposal stage is the least, less than 0.26%. The carbon emission of each kilogram of organic rice is 1.4042kg, and the agricultural production stage is also the main stage for carbon emission consumption, accounting for 49.52% of the total carbon emission, followed by the consumption stage, accounting for 22.84%, the processing stage and the transportation stage account for 14.96% and 12.11%, respectively, and the waste disposal stage is only 0.57%. This study indicates that the carbon emission of each kilogram of organic rice is significantly higher than that of ordinary rice, which is related to the lower yield of organic rice. This study suggests that the carbon emission of rice can be reduced by improving the growth technology of rice raw material stage, vigorously promoting the local production and consumption of agricultural products and other ways.

Key words: rice; the life cycle; carbon footprint; 20th National Congress Report