

# 降低无效碳排放的重要环节： 水稻产后减损的模拟效应分析

赵霞,陶梓秋,韩经纬

(南京财经大学 粮食和物资学院,江苏 南京 210003)

**[摘要]** 水稻产后造成的数量损失,意味着水稻在损失前产生的碳排放失去经济效益,成为无效碳排放。文章立足于水稻产后损失和无效碳排放的测算,通过梳理水稻产后损失与碳排放的关联关系,构建系统动力学模型,探究水稻产后减损的碳减排效应。研究发现:水稻在从田头到餐桌的流通过程中,水稻损失的数量累积性增加,无效碳排放总量不断增加。其中,稻米加工环节的数量损失最多,是水稻产后减损和无效碳排放减排的关键环节。通过增加同等碳排放规模下顺利进入消费端的稻米数量是有效的碳减排措施。

**[关键词]** 无效碳排放;水稻产后损失;减损;碳减排

**[中图分类号]** F320

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-6973(2023)06-0088-17

## 一、引言

中国不仅是粮食生产和消费大国,也是世界最大的碳排放国之一。<sup>[1]</sup>“双碳”目标是中国基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求而做出的重大战略决策。长期以来,推动工业、电力、建筑和交通等四大行业的碳减排是环境研究的关切,粮食供应链的碳排放问题并未受到足够重视。事实上,粮食供应链既易受气候变化严重影响,也是影响气候变化的重要推手。<sup>[2]</sup>2022 年 10 月召开的联合国《气候变化框架公约》第 27 次缔约方大会(COP27)发起了“促进粮食与农业可持续发展转型倡议”(FAST),倡导推动粮食供应链的低碳转型。然而,推动粮食供应链低碳转型不能以牺牲粮食安全为代价。粮食供应链涵盖粮食的生产系统、产后系统和消费系统等全部环节,既是主要的粮食损失浪费节点,<sup>[3]</sup>也是重要的温室气体排放源。<sup>[4]</sup>

粮食产后系统作为粮食供应链的核心子系统,粮食产后损失不容忽视。从经济学角度来说,粮食在产后损失掉,意味着粮食在损失发生前产生的碳排放会失去经济意义,成为无效碳排放。那么,我国的粮食产后损失水平如何?粮食产后损失与碳排放间存在怎样的关系?如何通过推动粮

**[收稿日期]** 2023-09-17

**[基金项目]** 国家社会科学基金重大项目“党的十八大以来党领导维护国家粮食安全的实践和经验研究”(22ZDA117)。

**[作者简介]** 赵霞(1980—),女,江苏泰兴人,博士,教授,研究方向:粮食经济理论与政策、粮食流通产业发展;陶梓秋(1998—),女,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向:粮食经济理论与政策;韩经纬(1987—),男,山东寿光人,博士,讲师,研究方向:粮食经济理论与政策。

食产后减损更好地助力节能减排?为解答上述问题,本文以水稻为研究对象,从水稻产后损失与碳排放的关联关系入手,探究推动水稻产后减损对消减无效碳排放、提升资源利用率的影响,并据此提出推动粮食供应链低碳转型的政策建议。

## 二、文献综述

### (一)关于粮食损失评估的研究

联合国粮食和农业组织(FAO)很早就关注到粮食损失问题,并对粮食损失给出了比较客观的解释。FAO将任何改变粮食的可食性、可用性及有益健康的特性或质量,从而减少粮食的价值的现象统称为粮食损失。<sup>[5]</sup>也有学者认为粮食损失不等于粮食浪费,不能将粮食浪费纳入到粮食损失的统计中。张健等指出粮食损失是在生产和分配过程中丢失的部分,而将消费过程中被丢弃的那部分粮食称为粮食浪费,认为粮食浪费是属于道德范畴的问题,是消费者“有意而为”的行动。<sup>[6]</sup>高利伟等也认同粮食浪费是发生在粮食的零售和最终消费阶段,包括在零售市场、超市、批发市场以及家庭、食堂、餐馆内发生的粮食数量的损耗都应被称作粮食浪费。<sup>[7]</sup>钱龙等具体分析了农村居民食物浪费情况及其影响因素。<sup>[8]</sup>HLPE等强调明确区分粮食损失和粮食浪费对提出有针对性的节粮减损方案有重要意义,指出粮食损失和浪费是粮食供应链中从粮食的收割到消费之间所有环节上可供人类食用的粮食减少的现象;粮食损失指的是收获到消费前供应链所有环节上的损失;粮食浪费则特指在粮食供应链消费环节被丢掉的供人类食用的粮食。<sup>[9]</sup>

定量评估一直是食物损失和浪费研究的重点,也是难点。这主要是因为,影响损失结果的因素非常复杂,表现形式也多种多样,很难用一个统一的标准或者方法进行计算和分析<sup>[10]</sup>。当前多数的研究仍然关注粮食数量的变化,但也有部分研究开始注重粮食品质、营养以及价值量的改变。从粮食数量的研究来看,目前评估方法大体可以分为直接和间接两类,其中直接法还可以细分为称重法、厨余垃圾收集法、调查法、日记法、记录法、观察法等,而间接法则主要是模型分析、食物平衡表、代替指标和文献资料等。国际食物政策研究所(International Food Policy Research Institute, IFPRI)2017年进一步将现有的方法按照数据来源和方法的不同,分为宏观和微观两种路径(Macro and micro approaches),其中宏观路径主要是指依赖于宏观统计数据 and 食物平衡表计算得到。张其春等构建了公众粮食浪费行为诱发机制的理论模型,揭示了公众粮食浪费行为的发生机理。<sup>[11]</sup>赵霞系统界定了我国主要粮食损失浪费评价对象,在此基础上科学构建了粮食损失浪费评价体系,厘清了不同环节损失率和综合损失率指标的权重设置依据和计算原理。<sup>[12]</sup>高利伟等结合了物质流分析法和农作物流通特征给出了针对主要粮食作物产后损失的计算公式,并结合已有数据评估了水稻、小麦和玉米产后综合损失情况<sup>[13]</sup>。实际上,现有的多数研究都是从食物平衡表或者相关文献推导得出的结果,一手的测量数据仍然只占较少的比例,约20%左右,表明全球食物损失和浪费数据严重不足<sup>[14]</sup>。

### (二)关于粮食供应链碳排放的研究

随着农业的生产和消费的变化,农业产业链不断延长,国际上通常采用农业与食物系统(农食系统)的概念,涵盖农林牧渔业、农产品加工业以及与农业和农产品加工业相关的中间投入品生产相关的运输仓储业、批发零售业和住宿、餐饮等行业构成的系统。尽管农业直接消耗能源带来的碳排放量有限,但整个农食系统的能源消耗及产生的碳排放量不断增加,不容乐观。<sup>[15]</sup>“粮食供应链是农食系统最核心子系统之一”<sup>[16]</sup>,指的是在粮食生产和流通中,从粮食生产资料的采购到粮食的生

产、加工,最后到将粮食和服务提供给最终消费者的上、下游所有组织形成的网链结构。<sup>[17]</sup>因此,粮食供应链的碳源涵盖的范畴要更广泛、排放体系也更复杂。<sup>[18]</sup>

围绕粮食供应链的碳排放的讨论更多地聚焦于粮食供应链的生产环节,认为碳排放主要源于粮食作物种植生长中的资源消耗,<sup>[19]</sup>主要从农药和化肥的使用、灌溉和种植过程中消耗的资源等几方面来对粮食生产环节的碳排放进行评估。<sup>[20]</sup>国内学者立足于中国粮食生产的实际,将中国粮食供应链生产环节的碳源归为化肥、农药、农膜、农用柴油、翻耕和农业灌溉等六类。<sup>[21]</sup>对粮食生产环节的碳排放核算,多采用 IPCC 指南的方法,用主要粮食作物及其种植过程中所消耗的资源数量及其对应的碳排放系数来进行评估。<sup>[22]</sup>谭秋成、闵继胜和胡浩先后使用中国宏观统计数据,对粮食作物生长所产生的碳排放、粮食生产中化肥和资源的投入所产生的碳排放进行研究,明确了粮食生产对碳排放的影响。<sup>[23-24]</sup>

就对粮食供应链其他环节的碳排放问题的研究而言,彭威等将国有粮食仓储企业的碳排放路径归结为直接排放和间接排放,<sup>[25]</sup>认为直接排放主要包括使用化石燃料的粮机设备作业时产生的排放和企业公务出行及粮食转运业务所用的车辆消耗化石能源所产生的排放;间接排放则包括在整个粮食存储周期中,为确保粮食数量和质量使用的各类设施设备所消耗的电力引起的排放和维持企业正常运行所必须消耗的电力、热力导致的排放。随着消费者对多样化食品需求的不断增长,运输成为粮食供应链的一个关键环节。李木子报道了对食品行业全球碳足迹的首次全面评估,显示运输配料和食品产生的碳排量占农食系统总碳排量的近 1/5。<sup>[26]</sup>通过利用全球多区域核算框架对食物里程碳足迹的核算,Li 等发现全球粮食里程会产生约 30 亿吨二氧化碳排放当量,<sup>[27]</sup>约占粮食系统(运输、生产和土地使用)总排放量的 19%。张向阳等(2022)发现,1978 年以来,粮食加工业消耗的能源从 3918 万吨标准煤增长到 7510 万吨标准煤,增长 91.7%,能源消费类型以电力和天然气为主。<sup>[15]</sup>粮食供应链的消费环节也是重要的碳源,Vermeulen 等通过测算指出粮食消费产生的温室气体在全部人类活动的温室气体排放总量中占比达 19%~29%。<sup>[28]</sup>Xu 等的研究表明,2017 年中国粮食消费的碳排放达 4.52 亿吨,较 2002 年增长了倍,排放量前五位省分别是山东、湖北、广东、浙江和江苏。<sup>[29]</sup>

### (三)研究述评

本文旨在通过对我国水稻产后损失和碳排放特征的调查研究,解析水稻产后损失与碳排放间的关联关系,以此探究水稻产后减损的碳减排效应,讨论推动碳减排的可行性水稻产后减损路径,以为我国粮食供应链低碳转型发展提供政策参考。通过对与本文研究主旨相关文献的梳理发现,以下几方面仍有待完善:

第一,粮食产后系统的碳源体系不完备,缺少健全的粮食产后碳排放核算方案。从现有的研究看,粮食供应链碳源的研究主要集中在粮食的生产环节,而对粮食产后系统的碳源研究不充分。虽然也有少量研究对粮食的储存、运输以及消费环节的碳排放进行了讨论,但总的来说,关于粮食产后系统的碳排放源、排放规模、核算方法以及排放机理的研究严重不足。

第二,粮食产后损失内涵的界定争议较大,调查评估方案尚不完善。粮食产后损失内涵的界定是研究节粮减损问题的关键,而学界在粮食产后损失内涵的界定方面存在着很多的争议,尚未形成统一的认识。粮食产后损失现状的把握依托于合理的评估方案,学者们采用不同的方案所得到的结论往往会存在较大差异,严重影响节粮减损问题的研究效力。

第三,粮食产后损失与碳排放关联关系的讨论尚不充分,对粮食产后减损的碳减排效应关注不足。粮食产后减损不等于零损耗,碳减排也不是零排放。一味追求低碳减排而限制必要的资源投入,不仅无法保障粮食稳产增收,还会加剧粮食损失;一味推动粮食减损增产,又极有可能会加剧能源资源的消耗,而产生更多的碳排放。然而,目前学界就粮食产后损失与碳排放关系的理解依旧停留在理论认知层面(粮食损失意味着更多的资源消耗,进而会产生更多的碳排放),对于两者间的深层次关联机理的讨论并不充分。

本文旨在对粮食产后减损的碳减排效果进行评估,主要的研究贡献可以概括为:①以水稻为具体研究对象,明晰水稻产后损失的内涵,并设计水稻产后损失的测算系统;②明确水稻产后损失的无效碳排放概念,识别构建水稻产后碳排放源体系,确定水稻产后碳排放核算方案;③通过调查研究,对水稻产后损失和碳排放现状进行评估,梳理水稻产后损失与碳排放间的关联关系,构建水稻产后损失的碳排放关联体系;④采用仿真模拟,讨论水稻产后减损的碳减排效应,以此为推动粮食供应链低碳转型提供政策建议。

### 三、理论界定与研究设计

#### (一)水稻产后损失概念界定与损失测算

##### 1. 水稻产后损失界定

水稻产后环节指水稻生产后到进入消费前流经的所有环节,包括收获、运输、干燥、储存、加工,储存环节又分为农户储存和储藏。水稻产后损失指水稻在生产后的流转中,因各种因素导致未能进入口粮消费端的水稻数量的减少。本文的水稻产后损失具体指在收获、运输、干燥、储存、加工等五个环节的水稻数量的减少。

①收获环节损失主要受收获时间、劳动力、收割机械效率、异常天气和虫害等影响,在水稻收割、脱粒、清粮等过程中的水稻破碎和撒漏及脱粒时的脱离残留等。

②运输环节损失指在水稻搬运和装卸中的撒漏损失。

③干燥环节损失包括农户晾晒和机械烘干两种流程的损失。农户晾晒损失包含在曝晒和收集中水稻的抛洒、遗落等引起的损失以及延迟干燥和缺少通风引起水稻堆烧等;机械烘干损失主要是水稻飞溅、抛洒和破裂;水稻水分的正常损耗不属于干燥损失。

④储存损失也分农户储存损失和储藏损失。农户储存损失指由于微生物危害、虫霉鼠害、水稻散落、储存条件技术等引起的水稻损失。储藏损失指受仓房性能、自然损耗、控温控湿和通风技术限制等导致的水稻损失。

⑤加工损失指对水稻进行处理和深加工以达到市场要求过程中的水稻损耗,加工损失多源于过度加工导致的大米碎米率上升和出米率下降。

##### 2. 水稻产后损失结构分析

水稻产后会经过分流会形成不同的流转路径,参考《水稻产后损失浪费调查及评估技术研究报告》,分为收获→干燥→农户储存→加工和收获→干燥→储藏→加工→运输两种,即农村水稻产后模式和城市水稻产后模式,如图1所示,分别对两种水稻产后模式进行权重赋值<sup>①</sup>。

<sup>①</sup> 赵霞等(2022)研究发现,农村水稻产后模式占比约为35.51%,因此,将权重设置为 $s=0.3551$ 。

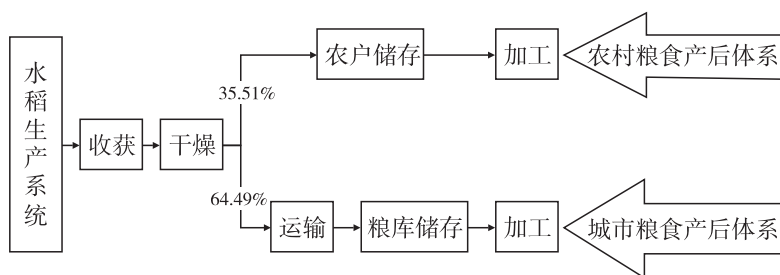


图1 水稻产后分流图

### 3. 水稻产后损失测算

本文采用的数据是国家粮食公益性行业科研专项项目“粮食产后损失浪费调查及评估技术研究”所建立的省级粮食产后损失调查数据库<sup>①</sup>。全国层次的水稻产后各环节损失率如表1所示。这里的损失率是指1单位水稻通过该环节后损失的数量。

表1 水稻产后各环节损失率

环节	收获	干燥	农户储粮	储藏	加工	运输
损失率	3.03%	4.67%	9.36%	0.35%	16.95%	0.11%

数据来源:国家粮食公益性行业科研专项项目“粮食产后损失浪费调查及评估技术研究”所建立的粮食产后损失调查数据库

#### (二) 水稻产后损失无效碳排放界定与核算

##### 1. 水稻生产和产后环节的碳源识别

生产环节的碳源包括水稻种植、农业生产资料使用、能源消耗和废弃物处理等;产后环节的碳源主要是能源消耗等。IPCC(2007)将水稻生产和产后环节的温室气体界定为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ , 具体而言:

①水稻种植的碳排放,指的是水稻泡田产生的  $\text{CH}_4$  排放。

②农业生产资料的碳排放,包括农田土壤排放、农用机械耗电间接排放以及化肥、农药、农膜等农业化学品使用排放的  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  等。

③农业废弃物处理的碳排放,主要指水稻秸秆焚烧产生的  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  排放。

④能源消耗的碳排放,包括水稻生产、收获、运输、加工等环节的能源消耗产生的  $\text{CO}_2$  排放。

按照 IPCC 的核算方法,利用全球增温潜势(GWP)对各温室气体进行折算加总得碳排放量:

$$C_i = \sum_j (E_{ij} * \theta_{ij} * GWP) \quad (1)$$

其中,  $C_i$  为第  $i$  类温室气体折算的碳排放量,  $E_{ij}$  为第  $i$  类温室气体消耗的第  $j$  种碳源量,  $\theta_{ij}$  为碳源的排放系数,  $i$  和  $j$  分别为温室气体和碳源类别。

##### 2. 水稻产后损失无效碳排放界定与核算

本文将水稻产后损失的无效碳排放定义为水稻产后损失导致部分稻米未进入消费端,被损失掉的水稻在损失前的各环节产生的碳排放。那么,水稻产后损失的无效碳排放核算便是对水稻损失发生前各环节的碳排放的加总,即需要包含生产环节和产后环节的碳排放。

<sup>①</sup> 粮食在加工过程中,会出现从原粮到成品粮的形态变化,同时,不同环节粮食所含水分也会存在差异。为了能够使的不同环节的损失率能够相互比较和运算,通过转换系数,数据库中损失率数值均通过转换系数,转换为以原粮为测算单位。

(1)水稻生产环节的碳排放核算,包括水稻泡田的碳排放、农业生产资料使用的碳排放、农业废弃物处理的碳排放和能源消耗产生的碳排放四部分。

①水稻泡田的碳排放,以水稻种植面积与碳排放系数的乘积而得,水稻种植面积源于《中国统计年鉴》。

②农业生产资料使用的碳排放,以农业生产资料使用量与对应的碳排放系数的乘积加总而得。由于统计资料均为谷物类总消耗数据,根据粮食作物种植结构,按水稻在总产量中占比 32.5%进行折算,数据源于《中国农村统计年鉴》。

③农业废弃物处理的碳排放,主要是秸秆焚烧产生的碳排放,即焚烧量与碳排放系数的乘积。水稻秸秆产量为水稻产量乘以水稻草谷比。根据中国农村能源协会数据,将水稻草谷比设为 0.623;根据按照曹国良等(2005)提供的各省级行政区的秸秆露天燃烧比,将水稻秸秆的焚烧量设为秸秆产量的 23.15%。由于国务院 2013 年颁布《大气污染防治行动计划》后,各地加大对秸秆焚烧的整治力度,秸秆焚烧现象大幅下降,因此,结合发改委 2014 年发布的《全国秸秆综合利用和焚烧情况表》中对秸秆焚烧点的统计以及徐奔奔等(2020)基于 MODIS 热异常数据对因秸秆焚烧情况的综合分析,将水稻秸秆焚烧比率定为 10%。且秸秆焚烧产生的 CO 和 CH<sub>4</sub> 较少,碳排放量可忽略不计,本文仅考虑秸秆焚烧产生的 CO<sub>2</sub> 排放。表 2 汇报了水稻生产环节的种植、农业生产资料和废弃物处理的碳排放系数。

表 2 各类排放源及碳排系数

排放活动	碳排放源	温室气体	碳排系数	参考文献
种植排放	水稻种植	CH <sub>4</sub>	338kg/ha/年	王效科等(2003)
农田土壤排放	氮肥施用	N <sub>2</sub> O	旱地 0.0165kg/kg 水田 0.0064kg/kg	张强等(2010)
农用电力排放	农业用电间接排放	CO <sub>2</sub>	0.80kg/kW·h	IPCC(2019)
农用化学品隐含碳	化肥生命周期隐含碳	CO <sub>2</sub>	氮肥 1.53kg/kg 磷肥 1.63kg/kg 钾肥 0.44kg/kg	CLCD
	农药生命周期隐含碳	CO <sub>2</sub>	18.1kg/kg	West Marland(2002)
	农膜生命周期隐含碳	CO <sub>2</sub>	19.0kg/kg	李波等(2011)
		CO、 CO <sub>2</sub> 、 CH <sub>4</sub>	CO 102.2g/kg CO <sub>2</sub> 1390.4g/kg CH <sub>4</sub> 2.19g/kg	李飞跃等(2013)

注:IPCC 将 C、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的转换系数分别为 3.67、25、298;CLCD 为中国生命周期基础数据库

④能源消耗的碳排放,为各种能源消耗量与相应碳排放系数的乘积加总而获得。根据《综合能耗计算通则 GBT2589—2020》和《省际温室气体清单编制指南(2011)》,本文对各能源消耗的碳排放系数进行计算,公式如下:

$$EF_i = H_i \times k_i \times C_i \times O_i \times 3.67 \times 10^{-9} \times 10^3 \quad (2)$$

其中, $EF_i$  为第  $i$  种能源的碳排放系数, $H_i$  为平均低位发热量, $k_i$  为折标准煤系数, $C_i$  为单位热值含碳量, $O_i$  为碳氧化率。 $10^{-9} \cdot 10^3$  为单位转化添加的系数,3.67 为碳的转换系数,表 3 报告了各类能源的排放系数。

表3 各类能源碳排系数

能源类型	平均低位发热量 kJ/kg	折标准煤系数	单位热值含碳量 T/10 <sup>12</sup> J	碳氧化率	排放系数 kg CO <sub>2</sub> -e/kg
煤炭	20934	0.7143	26.37	0.94	1.3603
焦炭	28470	0.9714	29.5	0.93	2.7846
原油	41868	1.4286	20.1	0.98	4.3239
燃料油	41868	1.4286	21.1	0.98	4.5390
汽油	43124	1.4714	18.9	0.98	4.3132
油	43124	1.4714	19.5	0.98	4.4501
柴油	42705	1.4571	20.2	0.98	4.5207
天然气	38979	1.3300	15.3	0.99	2.8818

注:前两列来源于《综合能耗计算通则 GBT2589—2020》,后两列来源于《省级温室气体清单编制指南》

(2)水稻产后损失的碳排放核算,主要包括加工和运输环节的碳排放,由于收获环节的能源消耗已包含在生产环节的测算中,因此不重复计算。

①加工环节的碳排放核算,以加工机械单位耗电量碳排放与水稻耗损量的乘积而得。参考《中国农业机械工业年鉴》的研究,以中型碾米机(主要参数为4.5t/h,功率为41kW)的应用为考察对象,加工环节损失的水稻的碳排放计算公式为:

$$CF_p = \sum_{i=1} W_i * Ele_{ip} * 0.80 \quad (3)$$

其中, $CF_p$ 为加工环节损失的水稻的碳排放量, $W_i$ 为第*i*类水稻的损耗量, $Ele_{ip}$ 为单位水稻加工的耗电量(kW·h/t),电力碳排放系数为0.80kg CO<sub>2</sub>-e/kg。

②运输环节的碳排放核算,采用水稻的货物周转量(Mt·km)、单位运输量综合能耗系数(tce/Mt·km)以及折标煤碳排放系数的乘积计算。铁路运输单位运量的能耗来自《2021年铁道统计公报》,铁路运输水稻的货物周转量来自《中国统计年鉴》,运输环节损失的水稻的碳排放计算公式为:

$$CF_t = \sum_{i=1} W_i * Ene_{it} * 3.67 \quad (4)$$

$CF_t$ 为运输环节损失的水稻的碳排放量, $W_i$ 为水稻的货物周转量, $Ene_{it}$ 为单位运输量综合能耗系数,3.67为折标煤碳排放系数。

### (三)碳减排效应分析

#### 1. 系统边界界定

水稻在产后环节损失而没能进入消费环节,损失发生前的生产和产后环节产生的碳排放会失去价值,成为无效碳排放。在水稻生产和产后环节均会产生碳排放,水稻产后损失会导致无效碳排放增加。本文采用系统动力学模型,对水稻产后损失及其引起的无效碳排放关系的梳理,构建水稻产后减损的碳减排效应模型,通过仿真模拟,探究水稻产后减损对碳减排的作用效果。

水稻产后减损的碳减排效应模型涵盖水稻生产、水稻产后损失、碳排放等子系统。时间边界为2005~2030年<sup>①</sup>,步长为1年,2005~2020年为模型检验阶段,基准年为2009年,2021~2030年为仿真阶段。研究对象为水稻在生产、收获、干燥、运输、储存和加工等环节的损失及碳排放。

<sup>①</sup> 能源消耗、农业生产资料使用数据在2005年前缺失较多,2005年后才有相对完整的统计资料,因此,将系统边界起点设为2005年。

## 2. 因果关系图和存量流量图构建

水稻产后减损的碳减排效应模型通过将各环节的碳排放按损失比例迭代,推算各环节损失所产生的无效碳排放量,构建水稻产后各环节的损失与碳排放关联脉络系统。系统结构按环节分生产和产后环节两部分,按碳源分水稻种植、农业用电、能源消费、农业生产资料使用和废弃物处理等五部分。基于系统内各要素的因果关系,利用 Vensim 软件构建水稻产后减损碳减排效应的因果关系图,如图 2 所示。

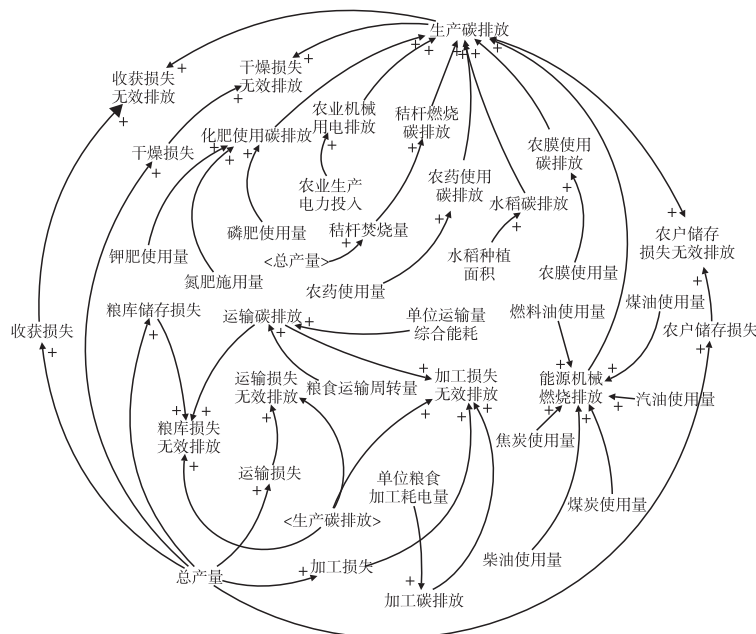


图 2 水稻产后减损的“碳减排”效应因果关系图

在因果关系图的基础上,围绕水稻产后损失和产后损失无效碳排放两个体系,引入状态变量、速率变量、辅助变量和常量构建存量流量图,如图 3 所示。水稻产后损失体系包括收获损失、干燥损失、农户储存损失、粮库储存损失、加工损失和运输损失,均按各环节的绝对损失率计算。水稻产后损失无效碳排放体系包含生产和产后碳排放两部分。生产碳排放包括农业机械用电排放、水稻种植排放、农业生产资料使用排放、能源消耗排放等;产后碳排放包括加工和运输环节的排放。核算某产后环节的水稻减损的碳减排效应需要将该环节以及该环节之前所有环节发生的碳排放量进行加总,例如,收获环节水稻减损的碳减排效应要考虑收获中的水稻损失在收获环节和生产环节产生的无效碳排放,而加工环节水稻减损的碳减排效应要考虑加工环节水稻损失在加工环节和加工前(包括生产、收获、干燥、农户储存、运输、粮库储存)环节发生的无效碳排放。

### 3. 主要系统变量设定

模型中,状态变量包括水稻种植面积、农业生产电力投入量、氮肥施用量等;速率变量包括农药使用增加量、农膜使用增加量、水稻生产增加量等;辅助变量包括化肥使用碳排放、水稻碳排放、收获损失、收获损失无效排放等;常量包括各类碳排系数等。

#### 4. 模型验证<sup>①</sup>

模型验证采用与历史数据的吻合度对比进行误差检验,变量的相对误差不大于15%,则认为模

① 篇幅所限,变量关系描述的方程计算公式未在论文中汇报,如有需要,可联系作者。

型的仿真性能和预测精度较好,检验分析的误差公式如下:

$$\epsilon = \left| \frac{Y' - Y}{Y} \right| \times 100 \quad (5)$$

其中, $\epsilon$ 为模拟值和真实值的误差, $Y'$ 为参数的模拟值, $Y$ 为参数真实值。表4报告的是采用水稻种植面积、氮肥施用量、柴油使用量和水稻产量四个参数的误差检验结果。实际误差满足15%的要求,说明模拟结果能反应真实情境。

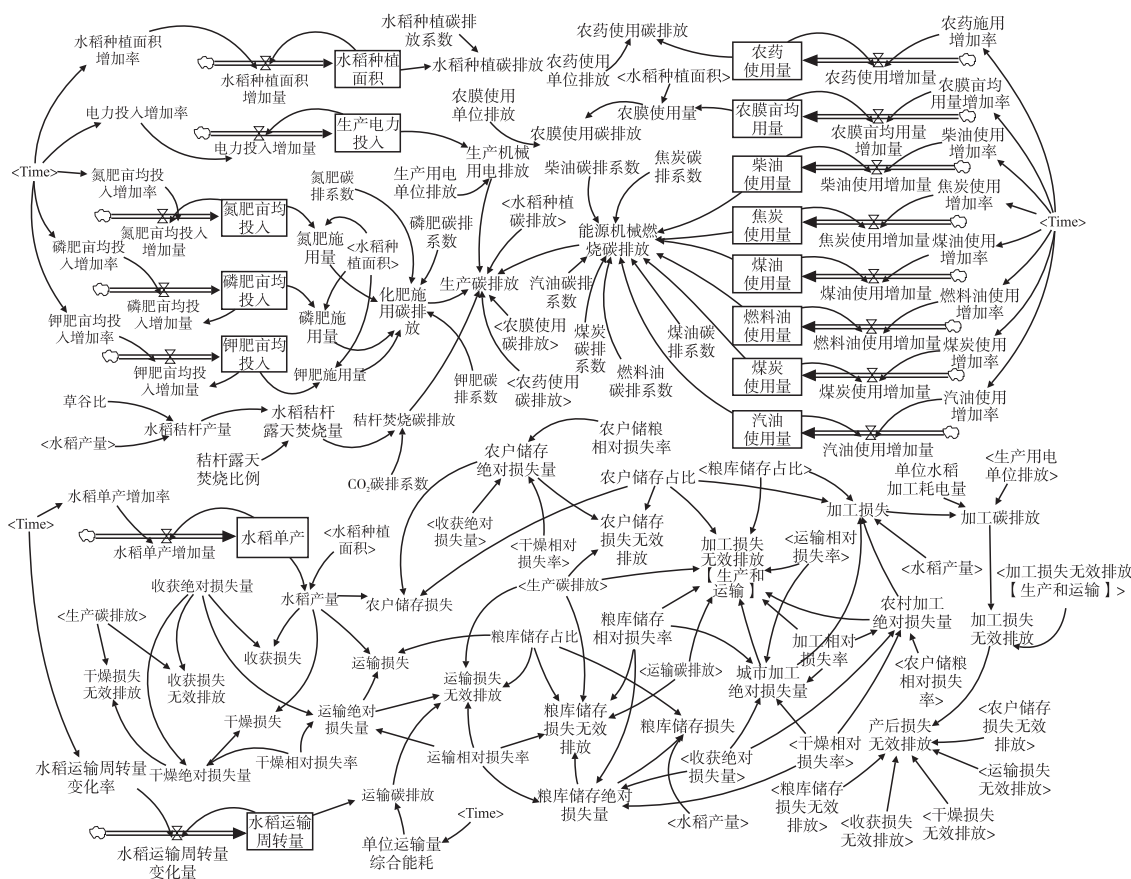


图3 水稻产后减损的“碳减排”效应存量流量图

表4 模型验证的误差检验结果

年份	水稻种植面积	氮肥施用量	柴油使用量	水稻产量
2005	0.00%	-3.72%	0.00%	-3.72%
2006	0.01%	-3.83%	0.03%	-5.82%
2007	-0.18%	-0.16%	4.01%	-5.89%
2008	0.99%	-0.28%	-7.54%	-4.78%
2009	1.20%	-0.63%	2.66%	-4.58%
2010	0.72%	-0.05%	2.09%	-5.03%
2011	0.51%	-2.60%	0.58%	-5.22%
2012	0.16%	-3.97%	1.32%	-5.55%
2013	0.48%	0.44%	1.13%	-5.25%
2014	-0.10%	-3.49%	-0.11%	-5.79%
2015	-0.22%	-3.07%	-0.11%	-5.90%

年份	水稻种植面积	氮肥施用量	柴油使用量	水稻产量
2016	-0.40%	-1.03%	-4.71%	-6.08%
2017	-0.27%	-2.95%	-2.17%	-5.96%
2018	-2.09%	-5.22%	-5.52%	-7.68%
2019	-1.92%	-6.44%	-4.69%	-7.51%
2020	1.00%	1.01%	-5.71%	-4.76%

四、研究结果分析

(一)水稻产后损失分析

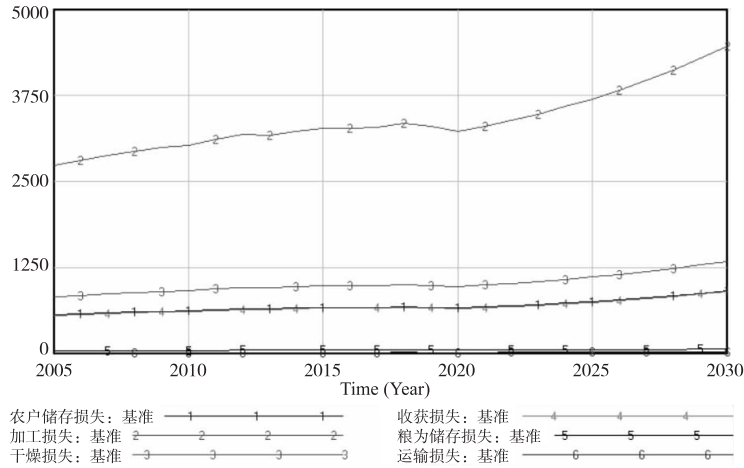


图 4 水稻产后各环节损失曲线图(10kt)

图 4 展示了水稻产后各环节损失的变化曲线。从水稻产后各环节损失曲线的变化可知,产后各环节损失都呈增加趋势,水稻产后损失增加的原因主要归结为水稻产量的上升。水稻产后各环节中损失量最多的是加工环节,预计 2030 年,水稻的加工环节损失将高达 4471.71 万吨,较 2005 年约增长了 63%,其次是干燥、收获和农户储存环节,运输和粮库储存环节的水稻损失相对较少。

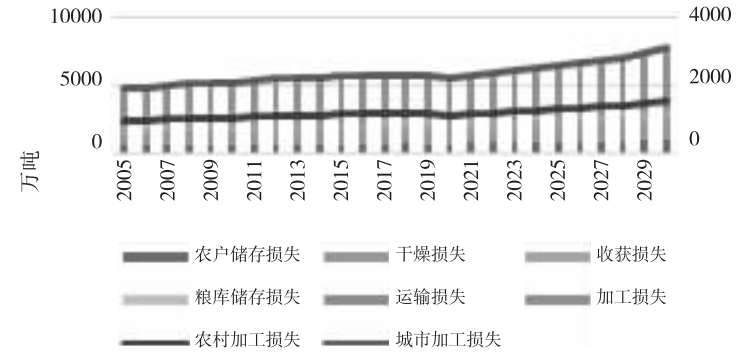


图 5 水稻产后各环节损失对比图

图 5 汇报的是水稻产后各环节损失对比。水稻加工损失始终处于高位,加工环节损失在产后损失中的占比超过 50%,城市模式的加工损失明显高于农村模式,原因在于水稻的产后流转中大部分流入城市,且城市加工模式更加追求精加工,导致水稻在城市模式中过度加工更加严重。农户储存的损失明显高于粮库储存损失,由于粮库储存更为科学,合理的储存模式、精准的温度把控和完善的储存设备条件都能减少储存过程中因霉变、蛇虫鼠害等原因导致的损失。

## (二)水稻产后损失的无效碳排放分析

水稻产后各环节损失的无效碳排放如图6所示,2005年,水稻在加工环节损失产生的无效碳排放为24798.5万吨,其余环节总计产生无效碳排放为3511.5万吨,可得因在产后损失产生的无效碳排放为28310万吨,而产后碳排放总计在2018年达到了33510.8万吨,预计2020~2030年水稻产后损失的无效碳排放量会不断增加。水稻在加工环节损失的无效碳排放占比最高,约占产后损失无效碳排放总量的87%。水稻在加工环节的损失率最高,意味着水稻在加工环节损失会消耗更多的能源,也就产生更多的无效碳排放;加工环节位于产后体系的末端,前置环节较多,根据“无效碳排放”的界定,前置环节越多,1单位水稻损失产生的无效碳排放也越多。因此,水稻产后减损的碳减排效应研究,应更重视产后的末端环节,重点推动末端环节的水稻减损,水稻产后越末端的减损活动产生的碳减排效应越高。

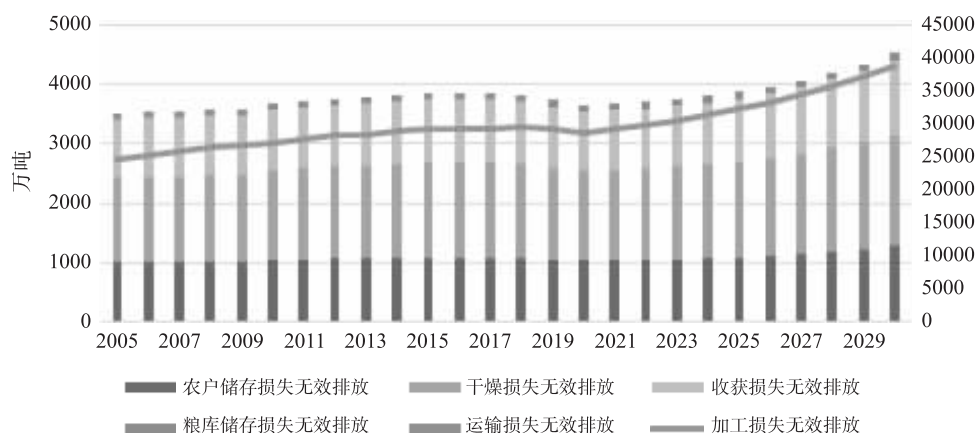


图6 水稻产后各环节损失无效碳排放对比图

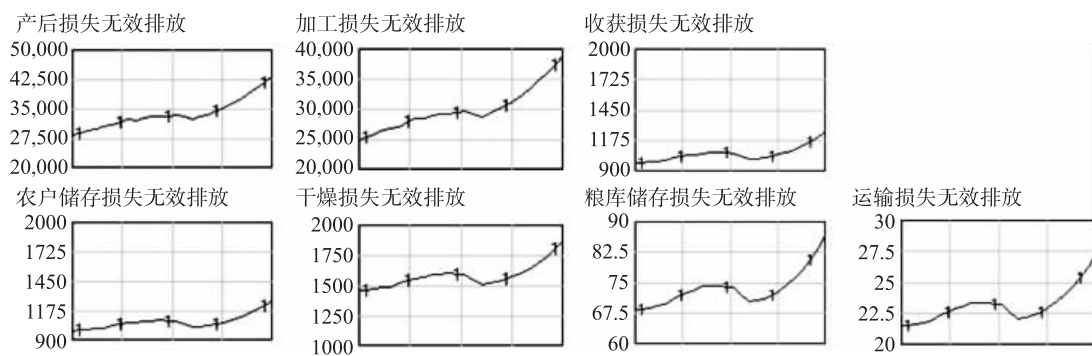


图7 水稻产后损失无效碳排放趋势图(10kt)

水稻产后整体和各环节损失的无效碳排放趋势如图7所示。粮库储存环节和运输环节水稻损失的无效碳排放虽然增长趋势较快,但粮库储存环节和运输环节的相对损失率较低,因此,在粮库储存和运输环节水稻相对损失产生的无效碳排放可忽略不计。收获、干燥和农户储存三个环节水稻相对损失率较粮库储存和运输环节更高,干燥处于收获和农户储存环节之间,但干燥环节的相对损失率要高于收获环节,因而,干燥环节相对损失产生的无效碳排放相较于收获环节和农户储存环节更高。农户储存环节相对损失率虽然相对较高,但受到产后分流的影响,进入农户储存环节的稻米量较少,因此,农户储存环节相对损失产生的无效碳排放要低于干燥环节,囿于农户储存较高的相对损失率作用,农户储存相对损失的无效碳排放也较高。水稻产后损失的无效碳排放规模呈现

出不断增长的趋势,2005 年水稻产后损失无效碳排放为 28,844.99 万吨,2020 年已达 32,924.82 万吨,增加约 4,000 万吨。预计 2020~2030 年,产后损失率不变的情况下,水稻产后损失的无效碳排放将会进一步增长,2030 年会达 44,278.25 万吨。水稻产后损失产生的无效碳排放是粮食供应链碳排放的重要组成,推动水稻产后减损有助于促进粮食供应链低碳转型。

### (三)不同情境下水稻产后无效排放情景分析

水稻在产后环节发生损耗会引起大量的无效碳排放,降低水稻产后相对损失率能有效减少无效碳排放规模,通过增加同等碳排放规模上顺利进入消费端的稻米数量是有效的碳减排措施。运输和粮库储存环节水稻产后相对损失率较低,产生的相对损失无效碳排放也很少。因此,本文在情景模拟中选择收获、干燥、农户储存和加工四个损失率较高的环节,以四个环节的水稻相对损失率为调控因子,分别比较各环节损失率下降 1%水稻产后损失无效碳排放情况。将情景模式分为基准模式、情景 A(收获相对损失率下降 1%)、情景 B(干燥相对损失率下降 1%)、情景 C(农户储存相对损失率下降 1%)、情景 D(加工相对损失率下降 1%)、情景 E(收获、干燥、农户储存、加工相对损失率下降 1%)六个情景模式,具体仿真情景设定如表 5 所示。

表 5 不同情景模式下相对损失率选择

情景模式	收获相对损失率	干燥相对损失率	农户储存相对损失率	加工相对损失率
基准情景	3.03%	4.67%	9.36%	16.95%
情景 A	2.03%	4.67%	9.36%	16.95%
情景 B	3.03%	3.67%	9.36%	16.95%
情景 C	3.03%	4.67%	8.36%	16.95%
情景 D	3.03%	4.67%	9.36%	15.95%
情景 E	2.03%	3.67%	8.36%	15.95%

不同情景模式下水稻产后各环节损失的无效碳排放模拟结果如表 6 所示,对应的不同情景模式下的无效碳排放变化趋势如图 8 和 9 所示。

表 6 不同情景模式下产后各环节损失无效碳排放情况(10kt)

产后环节	年份	基准情景	情景 A	情景 B	情景 C	情景 D	情景 E
收获	2005	975.26	653.37	975.23	975.23	975.23	653.37
	2015	1066.75	714.69	1066.75	1066.75	1066.75	715.89
	2030	1204.4	806.91	1204.4	1204.4	1204.4	806.91
干燥	2005	1457.53	1472.56	1145.42	1457.53	1457.53	1157.23
	2015	1594.31	1610.75	1252.92	1594.31	1594.31	1265.84
	2030	1876.92	1896.27	1475.01	1876.92	1876.92	1490.22
农户储存	2005	988.91	999.11	999.28	883.26	988.91	901.73
	2015	1081.72	1092.87	1093.06	966.15	1081.72	986.35
	2030	1273.46	1286.59	1286.82	1137.4	1273.46	1161.19
运输	2005	21.50	21.71	21.72	21.50	21.50	21.94
	2015	23.35	23.58	23.59	23.35	23.35	23.83
	2030	27.36	27.64	27.64	27.36	27.36	27.93

产后环节	年份	基准情景	情景 A	情景 B	情景 C	情景 D	情景 E
粮库储存	2005	68.32	69.01	69.02	68.32	68.32	69.72
	2015	74.2	74.96	74.97	74.2	74.2	75.73
	2030	86.96	87.85	87.86	86.96	86.96	88.76
加工	2005	24798.5	25053.6	25058	24889.7	23335.5	23909.8
	2015	29249.7	29550.9	29556.1	29357.3	27524	28202.2
	2030	38880.5	39281.2	29288.1	39023.7	36586.7	37488.7
全部环节	2005	28310	28269.4	28268.7	28295.5	26846.9	26713.8
	2015	33090	33067.7	33067.3	33082	31364.3	31268.6
	2030	43401	43420.9	43421.2	43408.1	41107.2	41098.2

收获环节:从表6可知,仅有情景A和情景E的无效碳排放大幅下降。收获环节处于产后环节最前端,因此,只有收获环节水稻相对损失率发生变化才会对收获环节水稻损失的无效碳排放规模产生影响。就无效碳排放的减少而言,收获环节水稻相对损失率下降1%能减少321.89万吨无效碳排放,推动无效碳排放量下降约34%。

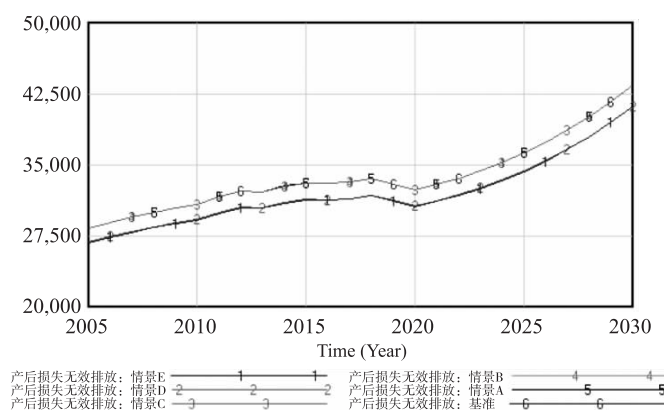


图8 不同情景模式下水稻产后损失无效碳排放量对比图(10kt)

干燥环节:与基准情景相比,情景A模式下干燥环节水稻损失产生的无效碳排放有所增加,收获相对损失率的下降,使得进入干燥环节的水稻增多,干燥环节相对损失率不变的情况下,水稻在干燥环节的绝对损失增多,导致情景A模式无效碳排放的增加。此外,情景B和情景E模式下干燥损失无效碳排放均显著减少,情景B比情景E减少得更多。就情景B而言,干燥环节相对损失率的下降能够有效减少干燥环节水稻损失量,有助于促进无效碳排放规模的降低。干燥环节相对损失率的减少,虽然会引起后续环节绝对损失率的上升,但与基准情景相比,情景E的绝对损失率仍有很大幅度的降低,这也就使得情景E的无效碳排放规模高于情景B而低于基准情景。就无效碳排放的减少而言,干燥相对损失率下降1%可减少312.11万吨无效碳排放。

农户储存环节:类似于干燥环节,处于农户储存环节前的收获、干燥环节相对损失率下降,情景A和情景B模式下会导致农户储存环节水稻损失产生的无效碳排放更多,主要归因于农户储存绝对损失量的提高。与情景C相比,情景E模式下农户储存环节产生的无效碳排放更多。就无效碳排放的减少而言,农户储存相对损失率下降1%将使农户储存环节水稻损失产生的无效碳排放下降116.02万吨,下降比例达11.6%。相较于收获和干燥环节,农户储存环节无效碳排放变化波动较小,农户储存环节本身水稻相对损失率较高,且在干燥后产生分流,进入农户储存环节的水稻量

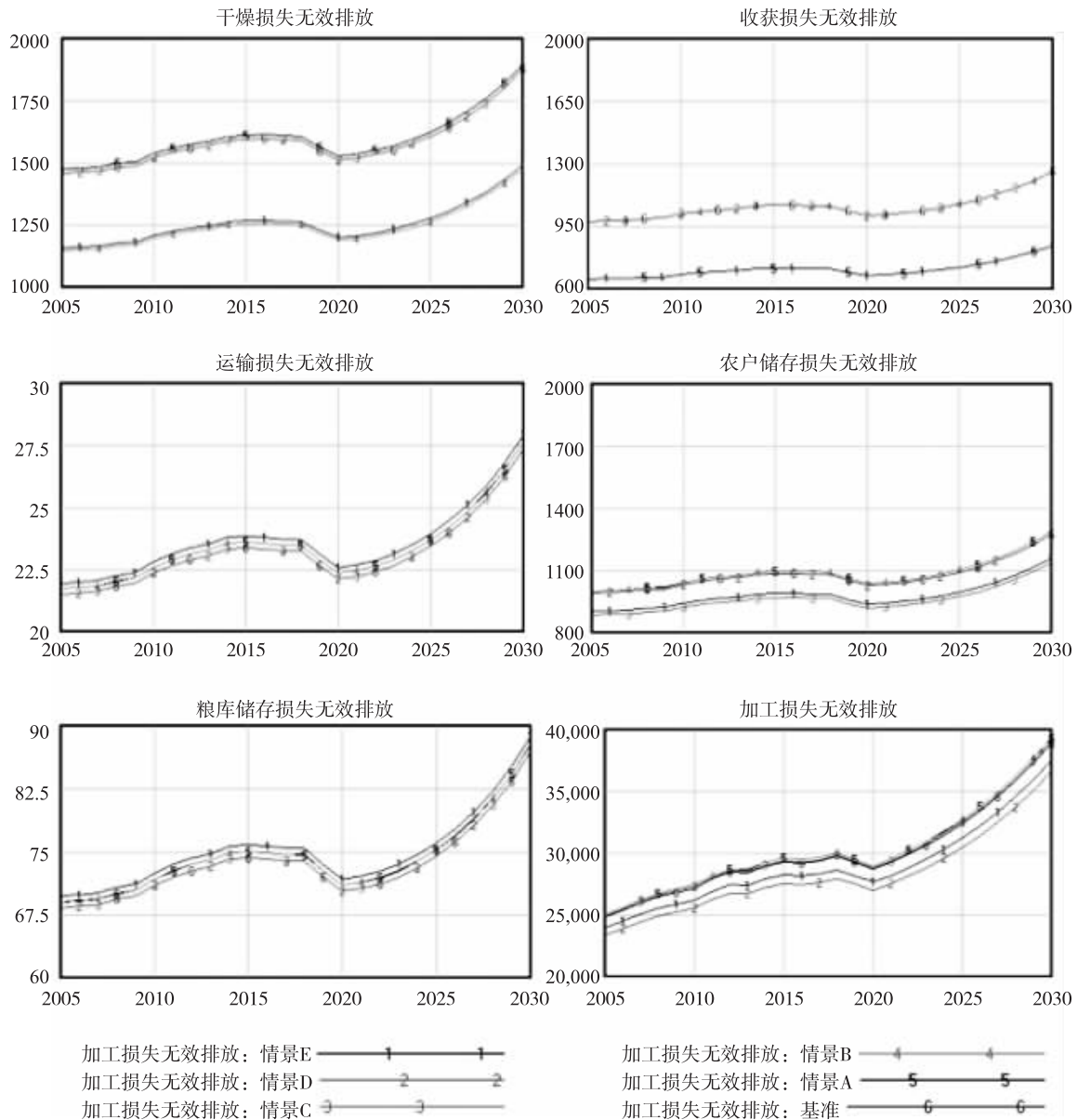


图9 不同情景模式下水稻产后各环节无效碳排放量情景模拟图(10kt)

相对较少。

**运输和粮库储存环节:**运输和粮库储存环节在不同情景模式下水稻损失的无效碳排放情况变化是相似的。由于本身相对损失率极低,因此,在情景 A、情景 B 和情景 E 模式下,运输和粮库储存环节产生的无效碳排放都有所上升。但因产生的无效碳排放量极少,因此忽略不计。

**加工环节:**在产后各环节中,加工环节水稻损失产生的无效碳排放量最多。与收获和干燥环节相似,情景 A、情景 B、情景 C 模式下,当加工环节前的其他环节相对损失率下降时,加工环节产生的无效排放反而会有所上升。情景 E 与情景 D 相比,仅加工环节水稻相对损失率下降时,加工环节产生的无效碳排放更低。就无效碳排放的减少而言,相对基准情景,情景 D 中加工环节无效碳排放下降 3.7%,加工相对损失率下降 1%能减少 1448.6 万吨无效碳排放。

**产后全部环节:**虽然产后各环节都存在不同情景模式下无效碳排放上升的情况,但从产后全部环节来看,五个情景模式下产生的产后整体无效排放都是下降的。五种情景模式下产生的无效碳

排放从少到多依次为情景 E、情景 D、情景 B、情景 A、情景 C。对产后无效碳排放下降做出贡献最大的环节为加工环节,而收获、干燥和农户储存相对损失率减少 1% 对整体无效碳排放的影响较小。加工环节本身产生的碳排放量较大,相对损失率降低能有效减少无效碳排放,且加工环节位于产后环节末端,相对损失率下降并不会导致其它环节的绝对损失量上升,不会产生额外的无效碳排放。

## 五、结论与建议

### (一) 主要研究结论

本文围绕对水稻产后损失及其碳排放的核算,构建水稻产后损失的碳排放关联系统,探究水稻产后减损的碳减排效应,并以此为粮食供应链低碳转型提供政策建议,主要的研究结论如下:①水稻产后各环节损失都呈增加趋势,加工环节是水稻产后损失最多的环节,其次是干燥、收获和农户储存环节,运输和粮库储存环节的损失较少。②水稻在产后环节损失而没能进入消费环节,损失发生前的生产和产后环节产生的碳排放会失去价值,成为无效碳排放。水稻产后损失的无效碳排放量会不断增加,水稻在加工环节损失的无效碳排放占比最高。水稻产后环节中,越靠后环节的水稻损失产生的无效碳排放越多。③水稻在产后环节发生损耗会引起大量的无效碳排放,降低水稻产后损失率能有效减少无效碳排放规模,通过增加同等碳排放规模下顺利进入消费端的稻米数量是有效的碳减排措施。④越靠近深加工、精加工和消费端的环节,越应加强对水稻产后减损的重视。加工环节相对损失率较高,产生的碳排放较多,且处在产后环节的后端,在水稻产后减损和消减无效碳排放方面都应受到重视。

### (二) 政策建议

围绕上述研究结论,本文提出如下的政策建议:第一,着力推动水稻产后环节减损,降低水稻产后相对损失率能有效减少无效碳排放,通过增加同等碳排放规模下顺利进入消费端的稻米数量能形成有效的碳减排机制。推动技术进步,提升机械化水平,着力减少各环节的水稻撒漏、散落问题,创新稻米烘干模式,减少晾晒等原始干燥方式,都是有效地减损举措。第二,着重强化水稻加工环节的减损能力。过度加工是加工环节水稻致损的主要原因,过高的碎米率、多次抛光 and 多重工序精加工导致真正能进入消费市场的稻米量不足 70%,因此,减少加工环节的水稻损失要重视适度加工、增加水稻加工副产物利用率、创新加工技术。第三,大力促进水稻产前产后的直接碳减排。推广绿肥种植,促进化肥减量增效;创新秸秆处理技术,严格管控秸秆露天焚烧;发展农机设备新技术,优化加工工序,提高能源利用率。

## [参 考 文 献]

- [1] Han, J., Miao, J., Du, G., Yan, D. and Miao, Z.: Can market-oriented reform inhibit carbon dioxide emissions in China? A new perspective from factor market distortion, *Sustainable Production and Consumption*, 2021(27): 1498—1513.
- [2] Hebinck, A., Klerkx, L., Elzen, B., Kok, K. P. W., König, B., Schiller, K., Tschersich, J., van Mierlo, B. and von Wirth, T.: Beyond food for thought-Directing sustainability transitions research to address fundamental change in agri-food systems[J]. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2021(41): 81—85.
- [3] Krishnan, R., Arshinder, K. and Agarwal, R.: Robust optimization of sustainable food supply chain net-

- work considering food waste valorization and supply uncertainty[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022(171):108499.
- [4] Acampora, A., Ruini, L., Mattia, G., Pratesi, C. A. and Lucchetti, M. C.: Towards carbon neutrality in the agri-food sector: Drivers and barriers[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023(189): 106755.
- [5] FAO, IFAD and WFP: *The State of Food Insecurity in the World 2015*[R]. Rome, 2015.
- [6] 张健,傅泽田,李道亮.粮食损失的形成和我国粮食损失现状[J]. *中国农业大学学报(社会科学版)*,1998(4):5.
- [7] 高利伟,成升魁,曹晓昌,等.食物损失和浪费研究综述及展望[J]. *自然资源学报*,2015(3):14.
- [8] 钱龙,饶清玲,李丰.农村居民食物浪费情况及其影响因素——以主食浪费为例[J]. *江南大学学报(人文社会科学版)*,2021,20(06):47—57.
- [9] HLPE: *Food losses and waste in the context of sustainable food systems*[R]. Rome, 2014.
- [10] FAO. *Global food losses and food waste: Extent, Causes and Prevention*[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011.
- [11] 张其春,黄雪玲,陈泽颖,等.公众粮食浪费行为的诱发机制研究[J]. *江南大学学报(人文社会科学版)*, 2023,22(01):22—34.
- [12] 赵霞. *中国粮食产后损失研究*[M]. 北京:中国农业出版社,2021.
- [13] 高利伟. *中国主要粮食作物供应链损失和浪费特征及其减损潜力研究*[D]. 中国农业科学院,2019.
- [14] Xue L, Liu G, Parfitt J, et al. Missing food, missing data? A critical review of global food losses and food waste data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12):6618—6633.
- [15] 张向阳,张玉梅,冯晓龙,等.中国农业食物系统能源碳排放趋势分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022,30(4):8.
- [16] Campanhola, C.: *Sustainable Food and Agriculture: An Integrated Approach*[M]. Amsterdam: Elsevier Inc., 2019.
- [17] 赵霞,陶亚萍,曹宝明.中国粮食产后损失评估分析[J]. *干旱区资源与环境*,2022,36(06):1—7.
- [18] 王雅楠,张琪琳,陈伟.基于碳汇功能的省域农业碳排放及减排潜力研究——以中国三种主要粮食作物为例[J]. *重庆社会科学*,2022(05):58—75.
- [19] West, T. O. and Marland, G.: A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 91(1):217—232.
- [20] Goldstein, B., Hauschild, M., Fernandez, J. and Birkved, M.: Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135 (nov. 1):984—994.
- [21] 胡婉玲,张金鑫,王红玲.中国种植业碳排放时空分异研究[J]. *统计与决策*,2020,36(15):92—95.
- [22] IPCC: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*[R]. Switzerland, 2019.
- [23] 谭秋成.中国农业温室气体排放:现状及挑战[J]. *中国人口·资源与环境*,2011,21(10):69—75.
- [24] 闵继胜,胡浩.农产品对外贸易对我国农业生产温室气体排放的影响研究[J]. *软科学*,2013,27(08):55—59.
- [25] 彭威,梁东林,殷贵华等.碳中和目标下国有粮食仓储企业低碳发展路径探索[J]. *粮油食品科技*,2022,30(04):206—210.
- [26] 李木子.食物运输产生大量二氧化碳[N]. *中国科学报*,2022—07—05(002).
- [27] Li, M., Jia, N., Lenzen, M., Malik, A., Wei, L., Jin, Y. and Raubenheimer, D.: Global food-miles account for nearly 20% of total food-systems emissions[J]. *Nature Food*, 2022, 3(6):445—453.
- [28] Vermeulen, S. J., Campbell, B. M. and Ingram, J. S. I.: *Climate Change and Food Systems*[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012, 37(1):195—222.

- [29] Xu, Y., Geng, Y., Gao, Z., Xiao, S., Zhang, C. and Zhuang, M.: Accounting greenhouse gas emissions of food consumption between urban and rural residents in China: a whole production perspective[J]. *Frontiers in energy*, 2022, (2): 16.

(责任编辑: 闫卫平)

## An Important Link in Reducing Ineffective Carbon Emissions: Simulation Effect Analysis of Post-Harvest Loss Reduction in Rice

ZHAO Xia, TAO Zi-qiu, HAN Jing-wei

(Institute of Food and Strategic Reserves, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Post-harvest losses in rice production result in a significant decrease in quantity, which means that the carbon emission generated during rice production before the losses is economically inefficient, thus becoming ineffective carbon emissions. This article focuses on estimating the extent of post-harvest losses and ineffective carbon emission in rice production. By analyzing the relationship between post-harvest losses and carbon emission, a comprehensive systemic dynamics model is developed to explore the carbon emission reduction effects of reducing post-harvest losses in rice production. The research findings reveal that the losses in rice production accumulate throughout the entire supply chain, from field to table, leading to a continuous increase in ineffective carbon emissions. Specifically, the processing stage of rice accounts for the largest proportion of loss and is crucial in reducing post-harvest losses and ineffective carbon emissions. One effective measure to reduce carbon emissions is to increase the quantity of rice reaching the consumer market while maintaining the same carbon emission level.

**Key words:** ineffective carbon emission; post-harvest losses of rice; reducing the losses of rice; reduction of carbon emission

(上接第 42 页)

## Mechanism Design and Policy Guarantee to Prevent the Risk of Large-Scale Poverty Return in the New Development Stage

WANG Han-jie, YUAN Ming-lu

(College of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** The risk of large-scale return to poverty is the main challenge at the stage of the consolidation and expansion of poverty alleviation achievements. How to effectively reduce the risk of returning to poverty and prevent large-scale return to poverty is crucial in the post-poverty alleviation era. Through the review and analysis of the current policy system, it is found that the existing large-scale poverty prevention mechanism has such problems as the insufficiency in differentiation, accuracy and potential risks exploration. Based on the findings, this paper specifically proposes a classified prevention mechanism and policy designs, aiming to serve the goal of consolidating and expanding the achievements of poverty alleviation to promote common prosperity for farmers and rural areas.

**Key words:** large-scale return to poverty; classified prevention mechanisms; monitoring of return to poverty