

粮食供应链碳足迹管理的理论逻辑、现实困境与推进路径

张俊飏¹ 程琳琳²

(1.浙江农林大学 经济管理学院/浙江省乡村振兴研究院,杭州 311300;

2.湖北工业大学 经济与管理学院/湖北农业装备制造产业发展研究中心,武汉 430068)

摘要:在全球气候变化的背景下,面对中国粮食供应链碳足迹水平仍相对较高的现实情景,开展并加强粮食供应链碳足迹管理,对推动农业可持续发展与实现碳减排目标至关重要。分析发现,在粮食供应链的碳源结构中,家庭粮食消费、食物系统废物处理、食品加工和包装等环节均是主要碳源。系统推进粮食供应链碳足迹管理工作,仍然面临标准规范适用性与数据可获得性、多方利益平衡与协调、投资成本与收益回报等方面诸多困境与难题的挑战。基于对国家农业“双碳”战略的深刻认识,提出建立健全碳足迹核算监测核查标准、构建跨部门的合作机制、优化成本分担和投资回报模式等推进路径策略,旨在推动粮食供应链碳足迹的有效管理,为中国农业的绿色低碳转型发展提供理论参考与实践指导。

关键词:粮食供应链;粮食碳足迹;碳足迹管理;农业低碳转型

中图分类号:F323.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-7465(2025)01-0041-14

一、引言

全球气候变化给粮食安全、人类健康和经济社会可持续发展带来严重威胁,已成为全世界共同面临的严峻挑战之一。人类活动是引发全球碳排放的主要诱因,其中农业与食物系统碳足迹占全球人类碳排放总量的1/3^[1]。1990—2019年该系统碳排放增长近17%,从食品加工、运输到消费的粮食生产环节前后端成为引致农业与食物系统碳排放增加的主导力量^[2]。这意味着,全球粮食系统必须开展系统性变革,以减少碳足迹并助力实现《巴黎气候变化协议》中的全球目标^[3-4]。立足国内,自中国2020年提出“双碳”战略的宏伟目标,到2022年和2023年分别发布的《农业农村减排固碳实施方案》《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》,均将种植业、农田、农机、可再生能源等作为落实农业“双碳”目标的重点领域。2024年7月召开的党的二十届三中全会进一步强调“确保粮食、能源资源、重要产业链供应链安全”和“健全提升产业链供应链韧性与安全水平”等战略要求。这意味着,以粮食供应链为核心的系统性变革在农业现代化建设中处于重中之重地位。在农业面临保供给保安

收稿日期:2024-10-01

基金项目:浙江农林大学科研发展基金人才启动项目“中国农业绿色低碳发展问题研究”(2023FR015);浙江省社会科学基金重大项目“中国农业产业绿色转型与发展研究”(2024YJRC09ZD);湖北农业装备制造产业发展研究中心课题“数字农业与双碳战略融合发展研究”(CAEMI-2024M1)

作者简介:张俊飏,男,浙江农林大学经济管理学院教授、博士生导师,浙江农林大学浙江省乡村振兴研究院首席专家;程琳琳(通信作者),男,湖北工业大学经济与管理学院讲师、硕士生导师,湖北农业装备制造产业发展研究中心特聘研究员。

全强大压力与资源环境巨大约束及促减排等诸多困难挑战下,如何在粮食全产业链内实现碳足迹的准确追踪与有效管理,不仅是确保粮食生产可持续性的关键,更是推动中国农业低碳转型与现代化发展的重要命题。

粮食系统低碳转型问题受到社会各界的广泛关注,学术界围绕该问题已进行了诸多探索,并在粮食碳足迹水平与结构分析、驱动因素、减排策略等方面形成了较多研究成果。从粮食碳足迹现状来看,针对稻田、小麦、玉米等主粮作物的研究相对丰富,且普遍发现土地利用和氮肥施用是温室气体排放的主要来源^[5-6],而中国食物系统已于2018年实现自身的碳中和,其中食物消费碳足迹中以粮食消费排放为主^[7]。就国际广泛认可的粮食碳足迹形成结构来看,从最初的生产投入到最终的消费,土地利用变化、生产、运输、包装、零售、损失都应基于数据的可得性被纳入碳足迹的分析框架^[8]。从驱动因素来看,农业劳动力非农化、作物生产机械化、经济发展水平、人口结构及粮食消费模式等均是主要推动因素^[9-11]。从减排策略来看,已有发达国家通过量化食物链中电力、燃料、运输、进出口各环节的碳排放,发现电力脱碳对食物链的碳减排贡献最大,在未来实现食物系统碳减排上,除提高农业生产力与进行土地管理外,推动运输与用能环节脱碳仍是主要的碳减排举措^[12]。随着研究的不断深入,碳减排综合策略与如何平衡利益主体的策略成为相关领域最为关切的话题^[3],但在这一过程中仍需综合考虑诸如人类营养、生物多样性、动物福利等方面的目标^[13]。既有研究普遍认为,尚无法通过任何单一举措将粮食碳足迹保持在限定范围内,多种策略的协同组合或许更为有效^[14]。毋庸置疑,已有研究成果不仅为识别粮食供应链碳足迹及明确低碳转型路径奠定了基础,而且为推进粮食系统碳减排进程提供了思路借鉴。

本文的边际贡献在于:一是既有研究对粮食供应链碳减排的必要性与紧迫性已形成共识,但对其碳足迹管理的内在逻辑仍缺乏相对系统且深入的研究。本文从全链条的角度探讨推动粮食供应链低碳化管理的基本逻辑,以更加清晰地认识和厘清粮食供应链碳足迹管理问题并提供理论依据。二是对粮食供应链碳足迹管理可能面临的主要挑战及未来可能的路径选择进行了较为系统的探讨,为更科学地推动粮食供应链碳足迹管理提供了经验参考。鉴于此,本文在明确粮食供应链碳足迹管理的基本逻辑后,结合中国现实场景,揭示对其实施管理过程中所面临的主要挑战,并据此提出推动粮食供应链碳足迹研究的未来前瞻及管理实践策略,以期为我国粮食供应链碳足迹管理体系构建与绿色低碳发展提供理论参考与实践指导。

二、粮食供应链碳足迹管理的理论逻辑

(一) 粮食供应链碳足迹概念及其主要内容

在国际上,粮食通常包括稻谷、小麦、玉米和其他粗粮。在该基础上,国内对于粮食的统计还包括豆类与薯类,用途主要涉及口粮、饲料用粮、种子用粮、工业用粮及粮食损耗等。与之相对应,粮食供应链多指粮食从生产到消费的全过程,涉及粮食种植、加工、运输、储藏、分销、消费、废弃处置等一系列活动,涵盖粮食生产主体、收储企业、加工企业、经销商、物流服务商、消费者等相关主体^[15]。碳足迹概念源自生态足迹,是指某一特定活动或产品(服务)在其全生命周期内累积的各种温室气体排放总量,通常以二氧化碳当量衡量。作为人类活动对环境的影响和压力程度的衡量指标,碳足迹能够较为客观地呈现全生命周期内因化石燃料燃烧产生的直接碳排放,亦能较为全面地评估生产或服务过程中投入品所引致的间接碳排放^[16]。通常而言,碳足迹可分为个人碳足迹与企业碳足迹^[17]、产品碳足迹^[18]、区域碳足迹^[19]等,本文着重从供应链维度探讨粮食(产品)碳足迹。结合学术界对农业碳足迹的表

述,本文认为粮食供应链碳足迹可理解为从粮食种植、加工、储藏、运输、消费、废弃全过程计算得到的碳排放量。

结合前文所述,粮食供应链边界应包括生产、收储、物流、加工、销售及废弃,主体涉及生产者、批发商、加工商、销售商等。综上,本文界定的粮食供应链碳足迹包括以下方面:(1)农用物资投入。包括合成肥料和农药等农资的生产加工与施用过程中排放的温室气体,尤其是氮肥生产^①与施用过程中的排放^[20]。(2)粮食田间生产。主要包括粮食种植过程,水稻种植产生的甲烷(CH₄),小麦和玉米旱地种植过程中硝化与反硝化作用产生的氧化亚氮(N₂O)的排放^[21],以及在粮食作物灌溉、翻耕与收获期间灌溉电力消耗、农用机械柴油使用引致的碳排放。此外,该部分还包括与粮食生产活动相关的土地利用及其变化、作物秸秆(残渣)及其燃烧、施入土壤的粪肥等^②引致的碳排放^[22]。(3)粮食加工、包装与运输。粮食收获后的加工、包装和运输过程中的能源消耗,如柴油、电能等,产生一定量的碳排放^③。该环节在以往研究中容易被忽略,但实际上其碳排放占据了相当的比例^[23]。(4)分销和销售。主要由粮食销售与运输过程中使用能源而产生的碳排放等。(5)粮食消费与废弃。消费过程中因烹饪消耗化石能源而引致的碳排放。需要提及的是,在粮食生产前后端中,粮食损失与浪费亦是学界关注的重点,其中粮食损失通常是指粮食供应链中从收获到零售阶段的所有损失,粮食浪费则是零售和终端消费过程中产生的浪费量^[1]。

(二) 粮食供应链碳足迹管理的理论逻辑

推进粮食供应链碳足迹管理,不仅是守牢粮食安全战略底线的内在要求,更是全面践行“双碳”战略与推进农业绿色低碳转型及农业现代化建设的基本要义。而要实现上述目标,需要首先厘清粮食供应链开展碳足迹管理必要性的理论根源。

1. 粮食供应链碳足迹管理是更高层次的粮食安全,为守牢安全底线奠定基础

农业生产是全球碳排放(各类温室气体的统称)的重要来源,粮食生产过程中化肥农药等农用物资的使用、水稻种植与灌溉、耕地利用方式变更以及各类能源的使用等均会产生碳排放,尤其是甲烷与氧化亚氮,其全球增温潜势(GWP)较二氧化碳更为明显^④。一方面,在技术不变的情况下,粮食的增产往往意味着耕地规模扩张、农用物资投入增加、机械等能源使用量增长,由此带来碳排放的增加及其与粮食生产的战略权衡。另一方面,气候变暖特别是极端天气会反过来影响粮食生产及其供应链的正常维系,造成粮食产量的不稳定、价格的异常波动及粮食安全风险增加。而在粮食收益并无大幅上涨的情况下,推进低碳实践或实施碳排放交易政策等则意味着更高的生产成本和减排成本,危及粮食安全之底线。故而,兼顾粮食安全与碳减排不仅是世界各国的战略性选择,更是全球面临的共同挑战与普遍难题。

作为贯穿粮食生产、流通与消费的完整链条,粮食供应链包括从粮食生产布局到加工仓储、交易流通,并延伸至粮食销售(成品粮)与废弃等环节。这不仅是一条基于市场需求的粮

① Cheng 等^[20]研究发现,每生产与使用 1t 氮肥则会产生 13.5tCO₂,仅氮肥制造过程中所引致的碳排放就占到小麦和玉米等旱地作物生产过程中碳足迹的 50% 以上。

② 从大食物观而言,FAO 农业与食物系统该部分的排放涉及 Crop Residues、Burning-crop Residues、Enteric Fermentation、Manure Management、Manure Left on Pasture、Manure Applied to Soils、Drained Organic Soils、On-farm Energy Use、Savanna Fires、Fires in Organic Soils 等。农业、林业与其他土地利用引致的碳排放占总量的 22% 左右,其中一半来自农场内的 CH₄ 和 N₂O 的直接排放,另一半则来自因农业扩张导致的耕地面积增加、土地利用变化及林业产生间接碳排放。

③ 根据 FAO 的数据,由食物加工与运输环节所引致的碳排放为 16%~26%。而 IPCC 相关数据显示,该部分排放占比约为 5%~10%。

④ IPCC 等全球权威机构的相关数据显示,1t CH₄ 和 N₂O 分别相当于 25t 和 298t CO₂;而由中国生态环境部于 2023 年 12 月发布的《中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告》显示,1t 的 CH₄ 和 N₂O 增温潜势分别为 21t 和 310t 的 CO₂。

食供需链,也是一条集信息流、资金流与物流于一体的多主体协作的粮食企业链与时空链,更是一条强调多方利益增值的粮食价值链。这意味着,现代化的粮食供应链是一个集合产加销储运等多主体、多环节、多区域的大系统,它不仅包括粮食产量与质量,还涉及纵向的供应可持续性 & 横向的多功能性等^[24]。由此,粮食供应链碳足迹管理不仅是有效破解粮食安全面临的效益困境、要素困境、生态困境、质量困境的重要手段,更是一种多元、系统、全面、综合、高层次的粮食安全^[15]。

2. 碳足迹管理是提升粮食供应链韧性的关键抓手,为现代农业发展形塑绿色生产力

粮食供应链韧性可理解为粮食供应链应对内外部冲击与风险的能力,具体是指粮食供应链在遭受国内外市场与环境等冲击或扰动时所具备的能够维持链条稳定、防止断裂、调试恢复、调整适应恢复到受冲击前的运行状态,甚至化危为安,实现链条升级的能力,它通常包含抵抗能力、恢复能力与变革能力^[25]。极端气候变化对粮食供应链韧性构成了巨大冲击,加剧了粮食供应链的不稳定性,而碳足迹管理则有助于缓解这一负面影响。具体体现在如下方面:

一是碳足迹管理涉及粮食从生产到消费全过程核算,其有利于识别减排潜力、优化生产流程与供应链管理,从而推动粮食供应链在面对气候变化等外部冲击时能够较快作出调整,减少断链风险,增强自身的适应性。二是建立粮食供应链碳足迹管理体系,有助于摸清各环节的碳排放“家底”,推动供应链全链条碳减排。推进粮食供应链全链条管理,不仅能够促进粮食供应链各环节资源优化配置与效率提升,亦能增强供应链在遭受冲击后的恢复能力,强化其抗逆性。更为重要的是,粮食供应链碳足迹追踪管理常以碳标签等标识形式向消费端展示,在强化产品品牌价值的同时,也能够增进消费者对低碳产品的认知和接受能力,助力低碳消费习惯的形成,进而引导整个供应链向更加绿色和可持续的方向发展。三是碳足迹管理的开展将推动粮食供应链条上的生产者、经营者与管理者等不断改进与创新组织结构和业务流程、开展技术革新,以此提升外部风险预警和应对处置能力,适应不断变化的市场需求和外部环境。这种多维度的革新是供应链变革能力的重要组成部分,更是绿色生产力的全新体现。

3. 粮食供应链碳足迹管理是农业碳减排的重要内容,为达成“双碳”目标提供条件

碳足迹管理体系的建立,旨在形成绿色低碳供应链和生产生活方式,降低整个供应链的碳排放,助力实现碳达峰、碳中和目标。粮食供应链是农业碳排放的主要来源之一,对其开展碳足迹管理不仅可以为推进农业碳减排提供方向性指引,而且拓展了农业在应对气候变化、降低碳排放方面的政策空间与路径选择领域。

就生产角度而言,碳足迹管理涉及对粮食供应链全过程的碳排放量化、评估与管理,涵盖粮食种植、加工、储运等环节。通过推动粮食供应链碳足迹管理,帮助农业生产者、加工企业、运输企业有效识别碳源结构与减排潜力,并通过采用低碳生产方式、技术改进、储藏设施与条件改善、运输设施能效提高以及碳市场交易等方式,尽可能降低碳排放,增加绿色产品供给,助力农业全行业减排增效。从消费角度来讲,一方面,粮食供应链碳足迹管理倡导简约适度、绿色低碳的生活理念与消费方式,并通过碳标识认证制度等培育低碳意识与绿色消费行为,推动形成全社会减碳的良好氛围。另一方面,规范的粮食供应链碳足迹追踪管理体系有利于高质量信息披露与沟通,压实粮食供应链企业及利益相关者的减排责任。这不仅是我国粮食相关企业树立良好形象、吸引 ESG 投资的重要方式,也对构建具有中国特色和国际影响的碳足迹管理体系以及以中国实践引领全球气候治理新格局大有裨益。

三、粮食供应链碳足迹管理的现实基础

(一) 粮食供应链碳足迹管理的政策实践

自 2020 年“双碳”战略目标提出以来,中国政府高度重视粮食供应链的碳足迹管理与低碳转型,通过一系列政策文件和行动方案,积极推动农业和粮食产业的低碳发展。

2021 年 2 月,国务院发布《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》,强调通过加快农业绿色发展、构建绿色供应链、倡导绿色低碳生活方式等举措,初步形成绿色低碳循环发展的生产体系、流通体系、消费体系。2021 年 11 月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《粮食节约行动方案》,对如何推动粮食产业链减损增效作出全面部署。在此基础上,2022 年 3 月农业农村部进一步确定了 24 个小麦和稻谷加工环节减损增效典型案例,为推动粮食供应链减损减碳提供可行范例。2022 年 5 月,《农业农村减排固碳实施方案》明确了种植业节能减排等六大任务,以及稻田甲烷减排等十项行动,并强调通过探索低碳农产品、节能农产品的认证与管理,逐步建立健全农产品碳足迹追溯体系,壮大新型产业增长动能。2023 年 11 月,国家发展改革委等部门出台《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》,旨在推进产品碳足迹核算标准体系与背景数据库建设。2024 年 6 月,生态环境部等部门研制并印发了《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》,进一步明确了我国今后一段时期内产品碳足迹体系建设的“任务书”与“施工图”。2024 年 7 月,中共中央、国务院《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》再次强调要构建产品碳足迹管理体系与产品碳标识认证制度,加快建立绿色供应链以带动产品上下游实现协同低碳转型。2024 年 10 月,国家发展改革委等部门推出《完善碳排放统计核算体系工作方案》,明确建立健全碳排放统计核算制度、因子数据库及碳足迹管理体系等重点任务。

综上可知,得益于以往的诸多努力,中国关于粮食供应链碳足迹的各项政策与行动方案正逐步实现系统性与具体化,更具有现实针对性。具体来看,从关注粮食生产端转向包含流通、加工、消费的全产业链管理,从重视种植业碳排放转向涵盖农田固碳扩容、农机节能减排等碳排放系统化管理,从关注单一产品技术规范或局部减排转向重视核算标准体系、碳足迹背景数据库建设、低碳产品认证与国际互认等综合能力建设。这些转变体现了中国在粮食供应链碳足迹管理方面从局部到整体、从短期到长期、从国内到国际的全面战略布局,旨在通过政策引导和可行方案实施,推动涵盖粮食供应链在内的碳足迹管理体系构建,助力实现碳达峰、碳中和目标。

(二) 粮食供应链碳足迹现状分析

1. 粮食供应链碳足迹增长趋势分析

考虑到数据的可获得性,本文使用 FAO 相关数据对中国粮食供应链碳足迹展开分析。结果显示,2010—2021 年中国粮食供应链碳排放总量由 2060 Mt 逐步增至 2272 Mt,11 年间增长约 10.31%^①,其增长趋势较为明显。从粮食供应链碳足迹的构成来看,主要以 CO₂ 为主,CH₄ 和 N₂O 次之,F-gases(氟化气体)较少的基本结构形态(图 1)。在结构演变轨迹上,CO₂ 的排放量不断增加,由 1074 Mt 逐渐增加到 1280 Mt,所占比重由 52.12% 持续提高至 56.31%;CH₄ 和 N₂O 的排放总量与占比均不断下降,占比分别由 28.65% 和 17.47% 逐步降低

^① 由于国内相关专业性数据库的缺失,在此借助 FAO 数据库展开分析。FAO 统计数据中,农作物主要包括大麦、豆类、玉米、甘蔗、粟、燕麦、马铃薯、稻米、黑麦、高粱、黄豆、小麦。

到 25.22% 和 13.98%。

根据中国政府官方发布的农业活动的碳排放情况来看,2014 年和 2018 年中国农业活动碳排放分别为 830 Mt 和 793 Mt CO_{2e}^①。这意味着中国农业生产环节碳排放初步出现达峰的迹象,农业生产环节碳减排已取得显著成效,相关学者^[26]的研究亦予以证实。然而,就农业与食物整个系统而言,暂不考虑畜禽养殖等排放问题,我国粮食供应链碳足迹不断增长的趋势依然存在,亟待从全链条环节推进碳足迹管理,以应对日益增长的碳排放压力。

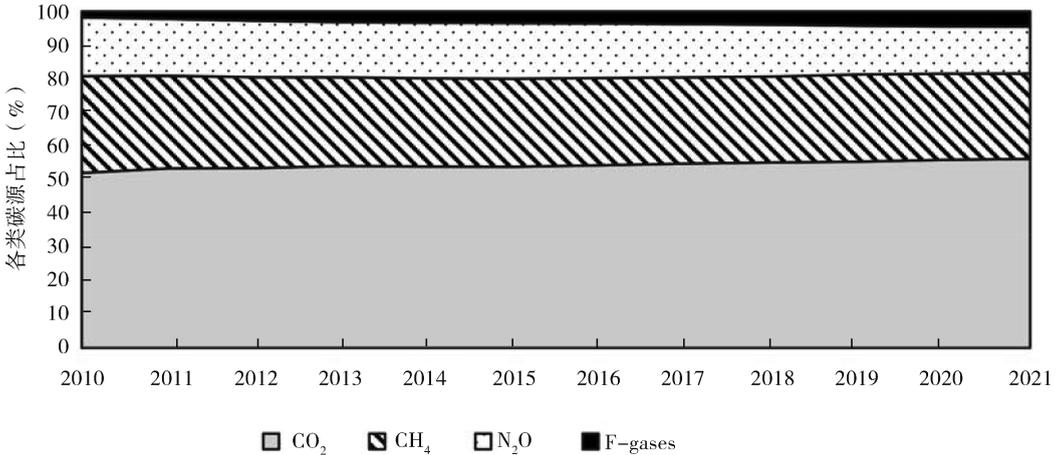


图 1 2010—2021 年中国粮食供应链系统碳排放结构

数据来源: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/GT>, 由作者整理而得。

2. 粮食供应链碳排放的结构性特征与复杂性分析

(1) 生产前后端日益成为中国粮食供应链碳足迹的主要来源。在 2010—2021 年的粮食供应链中,以粮食生产的前端与后端碳排放为最多,从 1110 Mt 逐步攀升至 1355 Mt^②,11 年间增长了近 22%;所占比例也由 53.97% 提高至 59.63%,占据粮食供应链碳足迹总量的近六成(图 2)。相比之下,粮食生产环节的碳排放则呈现较为明显的下降之势,由 948 Mt 缩减至 917 Mt。这与上文提及的我国政府公布的数据趋势较为一致。综合来看,中国农业生产环节的碳足迹已有了明显的下降态势,未来粮食供应链的碳减排重点可能会发生结构性转变,亟待从单纯关注粮食生产环节碳减排转向粮食产前、产中、产后全链条的协同减排。

(2) 家庭粮食消费碳足迹成为生产前后端碳足迹的主要来源。在粮食生产前后端的碳排放中,家庭消费引致的碳排放占比最高,其次为食物系统废物处理、食物加工、食物包装、食物零售和化肥制造环节,而粮食生产前的农药制造及粮食运输等环节整体偏低。具体来看,2010—2021 年,中国家庭食物消费碳排放量由 251.75 Mt 持续增长至 467.94 Mt,增长幅度高达 85.88%。相比之下,食物系统废物处理环节引致的碳排放虽然在数量上相对稳定,但份额占比下降幅度较为明显,由 18.36% 逐步降至 15.44%,并自 2020 年开始成为当前粮食生产前后端碳排放的第二大碳源。食物加工产生的碳排放总量不断缩减,11 年间下降幅度高达 27.65%,2021 年仅为 13.83%。而食物包装碳排放总量则由 150.78Mt 波动增长到 175.43Mt,但其在粮食生产前后端总量中的占比稳中有降,2021 年为 12.95%,与 2010 年的 13.56% 相差不大。

① 可参阅 2023 年和 2018 年分别发布的《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》和《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》,该部分含畜禽养殖等排放。

② FAO 依据《IPCC 第五次评估报告》(AR5) 体系及系数等进行的核算。

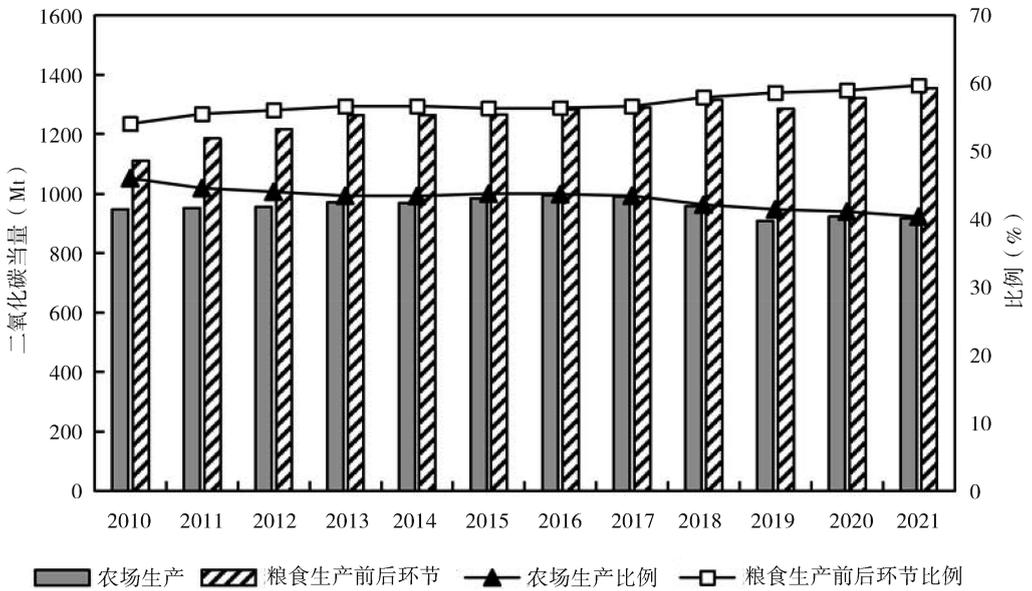


图 2 2010—2021 年中国粮食供应链主要环节碳足迹演变情况

粮食生产前的投入品化肥制造产生的碳排放尽管整体上相对平稳,并无剧烈波动,但下降之势较为明显,2021 年其占比已低于 10%。与之不同的是,食物零售环节的碳排放则增长较为迅猛,其比重也由 4.86% 持续提高至 9.54%,与化肥制造引致的碳排放总量大致相当。食物运输碳足迹整体上规模并不大。粮食生产前端的农药制造不仅排放总量缩减明显,且其占比也最小,仅为 0.5% 左右,详见图 3。

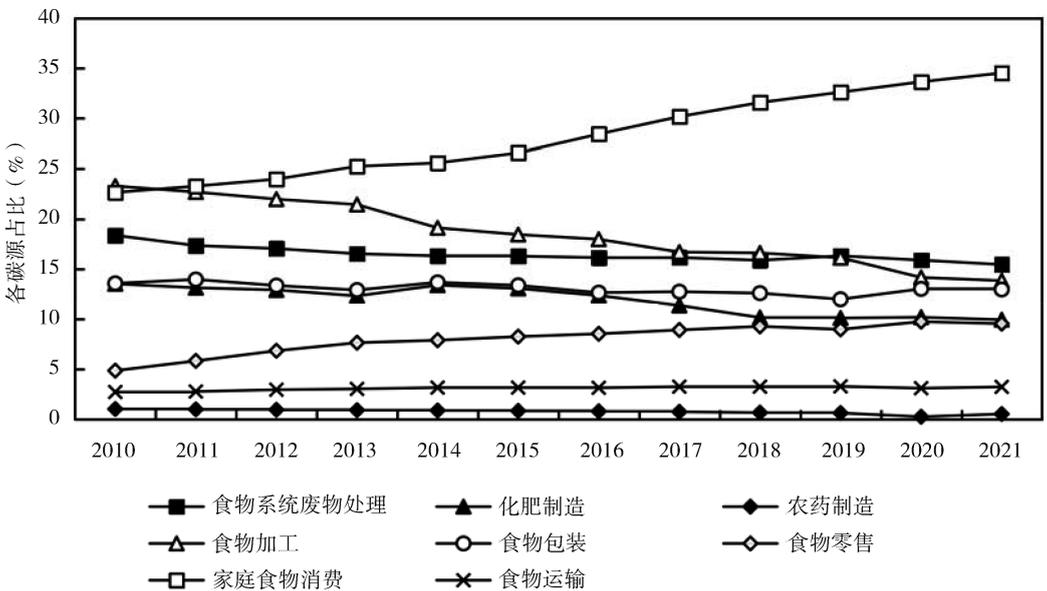


图 3 粮食生产前后后端碳源及其占比情况

数据来源: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/GT>, 由作者整理而得。

综上,在我国农业生产碳足迹得到有效控制的基础上,粮食供应链碳足迹呈现较为明显的结构性转变,家庭食物消费已成为粮食生产前后端的主要碳源。换言之,尽管我国粮食生产环节减排已取得显著成效,但其他环节不断增长的态势并没有形成对粮食供应链碳足迹增长的有效抑制。若仍仅关注生产环节,则未来粮食供应链乃至农业碳减排或将面临更大压力。

四、粮食供应链碳足迹管理面临的主要挑战

(一) 标准规范适用性与数据可得性的挑战

在推进粮食供应链碳足迹管理的进程中,标准体系的不完善和技术规范的不适应性不仅会限制碳足迹数据的可得性、准确性和可比性,也影响供应链各环节对碳足迹管理措施实施落地的接受度与执行力。

1. 碳足迹核算监测核查标准的不完善与不统一

粮食供应链碳足迹标准体系的健全程度较低,主要体现在核算规则标准与监测、报告和核查(MRV)体系的不完善^[27]。一是粮食供应链碳足迹核算规则标准与技术规范不完善。当前中国官方公布的农业活动碳排放主要涉及水稻种植、畜禽养殖、秸秆田间焚烧、农用地等^①,仍主要集中于粮食生产环节,而从产业链维度或全生命周期角度确定的碳足迹标准体系尚不完善,这使得粮食碳足迹核算边界、核算方法、数据质量要求等方面仍面临诸多障碍。尽管诸如北京质量技术监督局和市场监督管理局已分别发布《农业企业(组织)温室气体排放核算和报告通则》《农产品温室气体排放核算通则》等,之后农业农村部也出台了《农业行业标准水稻碳足迹评价技术指南》等,然而,即使不考虑地域差异性,相较于其他行业或重点产品而言,农业及粮食供应链的碳足迹标准体系建设发展仍相对滞后。二是监测、报告和核查(MRV)标准体系有待完善。MRV是粮食供应链碳足迹核算的基础,但因缺乏统一的核算标准和清单体系^②,不同地区和国家在碳足迹的监测和报告方面也存在显著差异,由此增大了彼此间协调合作的难度。更为重要的是,这也导致跨区域或全球范围内的数据比较和分析变得复杂甚至不可信,如欧洲国家可能采用更为严格的碳排放报告标准,而发展中国家由于资源限制、技术制约及人才短缺等原因,难以准确监测和记录碳排放数据,导致其核算报告不够详细、准确和科学。现阶段,中国大多数农户不具备监测化肥使用效率与碳排放量的技术手段和设施装备,或因传统观念和生产习惯的影响,在实际操作中并不关注碳排放^[28],这无疑会增加未来农业碳减排的压力。

2. 数据收集与处理的复杂性

粮食供应链的复杂性往往涉及错综交织的数据关联,这无形中增加了数据收集、处理与共享的障碍。一是粮食供应链碳足迹数据收集困难。粮食从田间到餐桌的过程涉及众多环节,包括种植、收获、加工、包装、运输、储存、零售和废弃等。每个环节均会产生碳排放,但这些排放数据往往分散在不同参与者中,而且数据记录不完整或缺失情况严重。例如,农民可能缺乏记录化肥使用和机械作业排放的系统,而物流公司可能只关注运输过程中的能耗,数据的碎片化与不透明导致供应链整体碳足迹数据难以有效收集。更为重要的是,现阶段粮食供应链中许多环节相关数据难以获取,例如省际粮食贸易量和交易品种等,这将阻碍产品碳足迹或跨区域碳足迹的科学核算。二是数据的准确性与可验证性、共享性有待增强。粮食供应链碳源与排放因子本身的不确定性、测量误差、报告体系不规范、标准不统一等,使得粮食供应链的碳足迹评估结果差异较大,亟需有效的验证机制与第三方评估审核机构确保相关数据的准确性与有效性。与此同时,粮食供应链碳足迹数据需要定期更新以反映最新的生产和消费模式,但供应链本身的复杂性致使数据的实时性与更新频率受限,这对数据质量本身与

① 可参阅《中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告》。

② 包括对粮食供应链碳足迹核算范围及碳源的差异,如部分学者将牲畜养殖等碳排放包括在内。核算标准与体系的不统一及其他不确定因素,导致不同研究结果差异相对较大。

收集系统等提出了更高的要求^[29]。此外,现实中已有部分企业、机构或学者通过大模型、构建数据库等方式收集并测算得到数据,如粮通链^①、农业区块链平台公司 Covantis^②、ChinaLCA可信碳足迹管理系统^③,但因涉及商业机密、行业隐私、政策限制、学术研究保密性等,无法公开访问以实现数据的共享与充分利用。

(二) 多方利益平衡与协调的挑战

在粮食供应链碳足迹管理的实践中,各参与主体的目标与动机呈现多维度的显著差异,并由此带来利益平衡与协调的诸多挑战。

1. 供应链各主体目标与动机差异

粮食供应链主要参与者包括农资供应商、农民、加工商、分销商、零售商等,各主体追求经济效益的同时也面临环境保护的压力,但各主体的目标与动机差异直接导致粮食供应链各参与主体对碳足迹管理的资源分配优先序与行动不一致。一方面,粮食供应链各参与主体的目标差异使整体协同难度增大。农民多关注生产成本与产量,分销商和零售商更关注物流效率和成本,而消费者则更关心产品的环保属性与健康影响,导致各主体在碳足迹管理应对上的行动存在优先序差异,增加了粮食供应链碳足迹管理的复杂性。另一方面,各主体参与碳足迹管理的动机不同,形成其差异化的角色与行为策略。农民因政策补贴或市场需求而采取低碳农业生产实践,加工商和分销商出于法规要求或品牌形象考虑而减少碳排放,零售商考虑消费者偏好而提供绿色低碳产品。因缺乏统一的协调机制,各参与者在开展碳足迹管理与实施碳减排措施上存在诸多分歧,尤其是在价格信号不明确、碳标签产品溢价与竞争优势难以体现的现实情境下^[30],上述目标与动机的差异将导致各主体在资源分配、技术创新和政策响应等行动方面的不一致性,从而进一步加剧了粮食供应链低碳转型目标实现的难度。

2. 国际粮食贸易碳壁垒等多重因素影响

国际上针对粮食产品碳足迹贸易政策的频现,对我国粮食及相关产品的出口与竞争力带来较大冲击,也对中国粮食供应链碳足迹管理带来诸多挑战,突出体现在国际认可度和影响力不足、背景数据库的缺乏以及对跨学科核算的复杂性与科学性认识不足。

一是国际认可度与影响力不足。尽管我国近期已发布《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》等政策文件,但当前在产品碳足迹管理体系的建设上,我国仍处于起步发展阶段,面临核算规则标准体系不完整等挑战。尽管北京等地在农业碳足迹核算与管理方面作出了有益探索,但仍缺少从粮食供应链与产品全生命周期角度确立的碳足迹通用标准、行业标准与产品标准。同时,我国在碳足迹的核算规则、标准体系等主要面向国内企业,使得其国际认可度与竞争力不足,亟需加快更新我国粮食产品碳足迹因子、核算评价和认证标准,并推进与国际社会的互通互认。

二是缺乏国际互认的背景数据库。长期以来,我国因缺乏国际社会广泛认可的粮食供应链碳足迹权威数据库,国内企业在开展国际贸易业务时均采用国外数据库核算产品碳足迹,

① 澎湃:《国内首个!“区块链+粮食产业”项目“粮通链”在桂城发布!》, https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_4758744。

② 该平台是由路易达孚(LDC)、ADM、邦吉(Bunge)、嘉吉(Cargill)、中粮(COFCO)和维特拉(Viterra)共同成立的农业区块链技术平台,主要通过利用区块链技术更好地连接航商、贸易商和租船商,以实现传统农产品贸易的现代化。

③ 国际科技创新中心:《区块链技术精确计算农产品碳排放》, https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/ztd/kjxxghst/stzl/202212/t20221226_105343.html。

如德国的 GaBi 数据库^①、瑞士的 Ecoinvent 数据库^②等,然而,此类数据库中关于中国相关产业的数据却无法真实准确地表征我国生产技术、产业信息并确保数据来源清晰与客观可信。加之核算范围与尺度相对模糊(多集中于全国水平),缺乏本土针对性与地域差异性,间接加剧了我国粮食产品在国际竞争格局中的劣势地位。而小型企业与其他参与者并不具备精确核算碳足迹追踪所需的技术和资源,这不仅限制了他们参与更广泛减排的能力,更使得粮食供应链数据比较和协作变得困难而影响碳足迹的透明度与可比性。

三是跨学科核算复杂性的障碍。由于粮食供应链碳足迹核算需要专业人员具备广泛的知识储备与专业技能,并投入充足的时间与资源来进行数据收集、模型建立、计算核对等,具有跨学科的复杂性,因此增加了碳足迹核算的技术难度和成本。如前所述,现阶段中国尚未形成统一的核算标准和科学共识,加之在人才培育与能力建设方面相对薄弱,对粮食供应链及其产品碳足迹的科学认识不足、相关国际规则理解不深,导致对内难以统一要求、对外无法实现互通互认的普遍问题,使得相关主体的利益平衡与协调更加复杂困难。

(三) 投资成本与收益回报相权衡的难度挑战

在粮食供应链碳足迹管理的实践中,企业不仅要权衡初期的高成本投入对短期财务的影响,还要面对市场机制不完善、信息不对称以及政策法规不健全所带来的私人收益与社会收益的不对等。这些因素共同构成了企业在碳足迹管理中投资成本与收益回报权衡的挑战,影响企业的积极性、合规性以及碳足迹管理的公平性、有效性与持续性。

1. 长期投入与短期利益的权衡

在粮食供应链中,碳足迹核算的经济成本是重要的影响因素。准确核算碳足迹本身是一个复杂且昂贵的过程,对于诸多从事粮食交易的企业而言,会因测量技术与指标体系的不同而使碳足迹无法“同频”比较。引入新技术或改进现有技术以提高碳足迹核算准确度和实时性又涉及高昂的额外成本,企业不仅需要准确评估这些技术的投资回报率,而且需要寻找平衡成本效益的解决方案。

一是初期投资的高成本影响短期收益。实施粮食供应链碳足迹管理需要投入较大的财务资源,包括购买硬件设备、开发软件系统、培训员工等。这些初始投资会对企业短期财务状况产生负面影响,尤其对中小型企业而言,高昂的初始投资会更大程度上成为开展碳足迹管理的主要障碍。二是收益不确定性导致潜在风险增加。在既有粮食价格体系及产品标识制度下,市场对低碳粮食产品的认知与接受程度仍不及普通粮食产品。市场对低碳产品的需求增长速度可能不如预期,开展碳足迹管理的经济效益无法立即显现,企业难以预测投资收益回报,由此产生的不确定性将导致企业对粮食供应链碳足迹管理的消极应对与抵触情绪。此外,粮食碳足迹管理需要长期运营和维护,包括系统升级、技术支持、数据管理与更新等,这些持续性的投入将增加各参与主体的长期成本,产生潜在的负面效应。

2. 个人收益与社会收益的权衡

粮食供应链碳足迹管理过程中,个人收益与社会收益的不对等及权衡问题同样不容忽视。这些问题涉及市场机制、信息不对称、政策法规等多个方面,直接关乎粮食供应链碳足迹管理的公平性、有效性与持续性。

^① 该数据库始于1989年,自2013年起每年更新一次,并在年中发布一次临时版本。该数据库通过使用参数化数据集和模型对生产(从摇篮到大门)和运输(从大门到大门)的碳足迹进行核算。<https://www.gabi-software.com/>。

^② 该数据库的第一个版本于2003年发布,后于2007年和2013年分别更新第二版和第三版。当前为每年更新一次,主要包含新的和改进的数据以及技术改进等内容。其中,Ecoinvent v3.10包括新的影响评估方法和分类,涉及行业为农业、建筑、化工、电力、林业和木材、燃料、金属、包装、纸浆和造纸以及废物。详见<https://ecoinvent.org/>。

首先,因市场机制不完善,粮食供应链相关主体参与碳足迹管理的负责任形象与实际收入存在偏差。合理的市场激励机制是推动粮食供应链相关主体积极参与碳足迹管理的内在动力,但因缺乏有效的碳定价机制与碳标识制度,企业降低碳足迹付出的努力及树立的负责任品牌形象和社会声誉未必能在市场上获得相应的回报。而整个社会则从低碳产品与碳足迹管理实践中获得环境改善与健康效益,且这些收益是长期并广泛地分散在社会各个层面,尚难以量化并反馈至实施粮食供应链碳足迹管理的具体企业或相关利益主体。

其次,因信息不对称,粮食供应链相关主体在碳足迹管理中的决策与行动受限。透明的信息流通是确保各参与方有效协作并实现碳减排目标的关键因素。然而,因缺乏关于碳足迹数据的准确、全面和及时的信息,企业在制定和实施减排策略时可能无法作出最佳决策。这种信息的不透明不仅阻碍企业对碳足迹管理的深度参与,也影响消费者和其他利益相关者对企业碳足迹管理成效的准确评估,甚至造成信任危机。由此,企业在碳足迹管理上的投入可能无法得到应有的认可和支持,而社会整体则错失了通过优化供应链管理来提高资源效率和减少环境影响的机会。这些效益的流失不仅影响了企业的经济利益,也削弱了粮食供应链对农业低碳转型的整体推动力。

最后,因法规政策不完善,粮食供应链相关主体在碳足迹管理上的积极性与合规性面临挑战。明确的法规政策是引导和规范粮食企业行为、确保粮食供应链碳足迹管理有效性的基础。然而,由于缺乏规范的减排法规约束或有利的政策支持,粮食供应链相关主体在推进碳足迹管理时或因缺乏明确的指导和激励,在减排行动上的积极性不高,合规性也难以得到保证。由此,企业将忽视长期的碳足迹影响,而社会则无法有效从企业的碳足迹管理中获得预期的环境和健康效益。这些效益的流失不仅制约粮食企业的可持续发展,也将削弱社会对粮食供应链低碳经济转型的整体信心和内在驱动。

五、系统推进粮食供应链碳足迹管理的路径选择

(一) 建立健全碳足迹核算监测核查标准,增强数据准确性与可验证性

1. 完善粮食供应链碳足迹核算标准,确保数据的可得性与准确性

基于《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》《农业行业标准水稻碳足迹评价技术指南》,引导龙头企业围绕三大主粮、产业链条等重点领域,加快制定粮食供应链碳足迹的通用国家标准、行业标准与产品标准,明确粮食碳足迹核算边界、基本原则、量化方法、数据质量要求等,增强数据的合规性与一致性。依托国家温室气体排放因子数据库,优先聚焦三大主粮、大宗粮食商品及原材料、半成品和交通运输等重点领域发布产品碳足迹因子,建立国家粮食产品碳足迹因子数据库,增强数据的准确性。

2. 建立粮食供应链碳足迹监测核查报告体系,保障数据可验证性

建立健全粮食供应链监测核查报告体系,推动碳足迹数据量化可测,保证粮食供应链碳足迹数据质量,增强粮食供应链碳足迹的可验证性与可比较性。鼓励引导粮食行业龙头企业、社会团体参与碳足迹管理,试点推动粮食种植、食物消费等重点环节减排,逐步形成粮食供应链统一的 MRV 标准与指南,增强粮食供应链碳足迹管理的公信力。

(二) 构建跨部门的合作机制,促进粮食供应链主体多方协作

1. 建立碳足迹背景数据库与认证制度,推进碳足迹量化管理透明化

优先试点和倡导建立水稻行业碳足迹背景数据库,为粮食供应链各环节企业及相关主体开展碳足迹核算提供科学、规范的核算方法和数据支持。鼓励中粮等大型企业探索开展全行

业商品碳标识认证,重点围绕适用范围、认证流程、标识式样等,加快形成粮食产品碳标识认证管理办法,推动建立全国层面的粮食产品碳标识统一认证制度,增强市场协作与信任,共同确保粮食供应链碳足迹量化管理的标准化与透明化。

2. 加强能力建设,提升碳足迹管理的有效性

考虑可行能力差异,重点关注和探索小农户融入粮食低碳产业链的可行路径,通过培训与教育,提高供应链各方对数据收集和报告重要性的认识,并不断加强相关领域人才培养与队伍建设,提升粮食供应链参与主体与从业人员专业能力,提高碳足迹管理的专业性和有效性。加强国际粮食碳足迹方法学研究,积极参与国际粮食碳足迹标准规则修订,增强对粮食供应链碳足迹管理的科学认识与理解,结合中国国情与农业实践,推动构建与国际接轨的粮食供应链碳足迹核算通则标准、因子数据库、碳标识认证与分级管理制度,以此提升我国在全球粮食供应链中的竞争力。

3. 加强国际合作,推进相关标准的国际互认互通

积极响应共建绿色粮食供应链合作生态圈的倡议,加强与国际组织和其他国家合作、与国际标准接轨,在确保本土特色与代表性的同时,通过共享实践做法和典型经验,推动中国粮食供应链碳足迹标准和规则的国际认可与互信共享^[31]。积极研判欧盟、美国等国际涉碳粮食贸易政策,通过双边多渠道方式加强产品碳足迹等重点问题对话磋商。加强与国际标准组织、世界贸易组织、共建“一带一路”友好国家碳足迹规则交流互认,以此降低粮食贸易碳足迹计量成本,提升交易效率,进而维护我国粮食供应链的稳定与可持续发展。

(三) 优化成本分担和投资回报机制,强化激励约束作用

1. 创新补贴支持的政策法规,强化激励约束作用

通过政府补贴、税收优惠和低息贷款等财政措施,鼓励支持粮食供应链各主体不断丰富粮食碳足迹应用场景,降低其参与碳足迹管理的实施成本与潜在收益风险,帮助相关主体在长期内通过技术创新、提高能效和减少资源浪费等实现成本节约与收益质量提升。同时,应加强碳足迹管理政策法规的制定与完善,重点围绕将粮食碳足迹纳入绿色供应链与低碳产品评价指标等,形成行业规范与外部约束,进而调动相关主体以粮食碳足迹履行减排责任、倒逼技术进步与优化资源配置的积极性。此外,政府还应加强绿色低碳技术与产品碳足迹管理领域的知识产权保护,通过完善低碳技术与产品检测、评估与认证体系,鼓励创新并确保相关参与主体能够获得正常的收益回报,推动粮食供应链低碳转型。

2. 完善市场机制,降低信息不对称

考虑到市场是提高生产力最佳激励的基本原则,应通过建立粮食供应链碳排放交易、碳标签产品等市场化机制^[32-34],设立碳基金、碳信托或绿色信贷等模式,确保碳足迹管理及其减排项目能够获得必要的市场认可与投融资支持。同时,探索建立粮食供应链碳足迹信息披露机制,鼓励粮食企业重点围绕绿色供应链表现,分地区分步骤以自愿评价认证、碳排放信息披露等方式发布粮食产品碳足迹核算结果与相关报告,逐步完善分级管理体系,压实粮食供应链各利益相关方的碳足迹管理责任,增强各环节对碳足迹管理的参与能力,形成分工明确、利益合理的粮食碳足迹管理格局。

参考文献:

- [1] Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, et al. Food Systems are Responsible for a Third of Global Anthropogenic GHG[J]. Nature Food, 2021, 2(3): 198-209.
- [2] Tubiello F, Karl K, Flammini A, et al. Pre- and Post-production Processes Increasingly Dominate Greenhouse

- Gas Emissions from Agri-food Systems[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(4): 1795–1809.
- [3] Clark M, Domingo N, Colgan K, et al. Global Food System Emissions could Preclude Achieving the 1.5° and 2°C Climate Change Targets[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 705–708.
- [4] Zurek M, Hebinck A, Selomane O. Climate Change and the Urgency to Transform Food Systems[J]. *Science*, 2022, 376(6600): 1416–1421.
- [5] 严燕, 季国军, 胡乃娟, 等. 长江下游稻田不同种植制度的碳足迹分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(7): 1462–1473.
- [6] 李亚宁, 吴秀芹. 中国三大粮食作物耕地生态系统碳足迹分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(3): 575–584.
- [7] 陈志钢, 徐孟. 大食物观引领下低碳减排与粮食安全的协同发展: 现状、挑战与对策[J]. *农业经济问题*, 2023, 44(6): 77–85.
- [8] Poore J, Nemecek T. Reducing Food's Environmental Impacts through Producers and Consumers[J]. *Science*, 2018, 360(6392): 987–992.
- [9] 程琳琳, 张俊飏, 何可. 多尺度城镇化对农业碳生产率的影响及其区域分异特征研究——基于 SFA、E 指数与 SDM 的实证[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2018, 24(5): 107–116.
- [10] 何可, 张俊飏. “双碳”目标下的乡村生态建设: 现实基础、主要问题与实现路径[J]. *世界农业*, 2024(4): 38–49.
- [11] Zhang X, Wang J J, Tan F L, et al. The Potential Impact of Increased Whole Grain Consumption among Chinese Adults on Reducing Healthcare Costs and Carbon Footprint[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(8): 2842–2852.
- [12] WRAP. UK Food System GHG Emissions[R]. Banbury, 2021: 8–11.
- [13] 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: S23–S32.
- [14] Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, et al. Options for Keeping the Food System within Environmental Limits[J]. *Nature*, 2018, 562: 519–525.
- [15] 陈明星. 粮食供应链安全: 一个新的粮食安全视角——兼论粮食生产核心产区发展思路创新[J]. *调研世界*, 2011(3): 40–43.
- [16] Druckman A, Jackson T. The Carbon Footprint of UK Households 1990–2004: A Socio-economically Disaggregated, Quasi-multi-regional Input-output Model [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 2066–2077.
- [17] 樊杰, 李平星, 梁育填. 个人终端消费导向的碳足迹研究框架——支撑我国环境外交的碳排放研究新思路[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(1): 61–68.
- [18] 张雄智, 王岩, 魏辉煌, 等. 特定农产品碳足迹评价及碳标签制定的探索[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(1): 188–196.
- [19] 黄祖辉, 米松华. 农业碳足迹研究——以浙江省为例[J]. *农业经济问题*, 2011, 32(11): 40–47.
- [20] Cheng K, Yan M, Nayak D, et al. Carbon Footprint of Crop Production in China: An Analysis of National Statistics Data[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(3): 422–431.
- [21] Shakoor A, Shakoor S, Rehman A, et al. Effect of Animal Manure, Crop Type, Climate Zone, and Soil Attributes on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils: A Global Meta-analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 124019.
- [22] OECD and FAO. OECD-FAO Agricultural Outlook 2024–2033[R]. Paris and Rome, 2024: 42.
- [23] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The Future of Food and Agriculture: Alternative Pathways to 2050[R]. Rome, 2018: 56–57.
- [24] 何可, 宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全: 内涵、挑战与政策取向[J]. *南京农业大学学报(社会科学)*

学版),2021,21(3):45-57.

- [25] 马俊凯,李光泗,韩冬.数字经济赋能粮食供应链韧性:作用路径和政策取向[J].新疆社会科学,2023(1):46-54.
- [26] 金书秦,林煜,牛坤玉.以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J].改革,2021(5):29-37.
- [27] 张卫建,尚子吟,张俊,等.农业温室气体排放统计核算体系的规范化建设[J].中国农业科学,2023,56(22):4467-4477.
- [28] 高晶晶,彭超,史清华.中国化肥高用量与小农户的施肥行为研究——基于1995—2016年全国农村固定观察点数据的发现[J].管理世界,2019,35(10):120-132.
- [29] He K, Li F L, Wang H, et al. A Low-carbon Future for China's Tech Industry[J]. Science, 2022, 377: 1498-1499.
- [30] 金书秦,丁斐,胡钰.农产品碳标识赋能农业生态价值实现:机理与建议[J].改革,2022(8):57-66.
- [31] Fan S G, Zhu Y C, Fang X M. Big Food Vision and Food Security in China[J]. Agricultural & Rural Studies, 2023, 1(1):1.
- [32] 田云,陈池波.市场与政府结合视角下的中国农业碳减排补偿机制研究[J].农业经济问题,2021(5):120-136.
- [33] 何可,汪昊,张俊飏.“双碳”目标下的农业转型路径:从市场中来到“市场”中去[J].华中农业大学学报(社会科学版),2022(1):1-9.
- [34] 何可,朱信凯,李凡略.聚“碳”成“能”:碳交易政策如何缓解农村能源贫困?[J].管理世界,2023,39(12):122-144.

(责任编辑:刘浩)

The Theoretical Logic, Realistic Dilemmas, and Promoting Pathways of Carbon Footprint Management in the Food Supply Chain

ZHANG Junbiao CHENG Linlin

Abstract: In light of global climate change, and considering the high carbon footprint of China's food supply chain, it is essential to implement and enhance carbon footprint management within this chain to foster sustainable agricultural development and meet carbon reduction goals. The study reveals that the primary carbon sources in the food supply chain are household food consumption, food system waste disposal, and food processing and packaging. However, there are numerous challenges and obstacles in systematically advancing carbon footprint management in the food supply chain, such as the suitability and accessibility of standards and normative systems, the balance and harmony of diverse interests, and the cost-benefit dynamics. Drawing on a deep understanding of the national agricultural “dual carbon” strategy, this paper suggests the establishment of a comprehensive carbon footprint accounting, monitoring, and verification standard system. It also recommends building an inter-departmental cooperation mechanism and optimizing the cost allocation and return on investment framework to facilitate effective carbon footprint management in the food supply chain. These proposals aim to provide theoretical support and practical guidance for China's transition towards a green and low-carbon agricultural sector.

Keywords: Grain Supply Chain; Grain Carbon Footprint; Carbon Footprint Management; Agricultural Low-carbon Transformation