

多目标协同的中国农业食物系统减排与 可持续转型

汪笑溪 蔡浩 宣佳琦 林斌 杜瑞莹

(浙江大学 中国农村发展研究院/公共管理学院, 浙江 杭州 310058)

[摘要] 农业食物系统温室气体减排对我国实现碳中和与高质量发展至关重要。现有研究虽然在农业食物系统温室气体排放核算、减排措施有效性以及农业食物系统可持续转型路径等方面进行了有益探索,但大多围绕单一目标或措施,尚未形成系统性理论框架和研究方法。未来研究应完善农业食物系统温室气体排放量的全链条估计方法,并在综合评估模型的基础上,结合微观大样本数据,借助机器学习、人工智能模型和计量经济学方法,完善多目标协同的农业食物系统优化决策模型,同时加强在空间区域、农产品和消费人群层面上的差异性分析,以更好地服务高质量发展相关的研究和政策制定。

[关键词] 农业食物系统;温室气体减排;可持续转型;多目标协同;综合评估建模

一、引言

气候变化已成为当前人类社会面临的重大挑战之一。中国的农业食物系统温室气体排放量约占全国总排放量的19%^[1],是仅次于化石燃料的第二大人为温室气体排放源。具体而言,农业活动与土地利用是农业食物系统温室气体排放的重要来源,其直接排放量占全国总排放量的7%。其中,农业源甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放量分别占该类别全国直接排放总量的40%和60%。此外,农业生产所使用的化肥、农药和能源产生的二氧化碳(CO₂)间接排放量约为直接排放量的1—1.5倍^[2]。为有效应对气候变化并在全球温室气体减排进程中发挥积极作用,中国于2020年9月22日承诺力争在2060年实现碳中和,并将这一目标纳入最新的《国家自主贡献》。在此背景下,农业食物系统既是碳源也是碳汇,对实现碳中和目标至关重要。

农业食物系统涵盖了农业生产、加工、运输、销售和废弃物管理等活动及其所产生的社会经济

[收稿日期] 2024-08-19

[在线优先出版日期] 2025-02-18

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(72273126);科技部重点研发资助项目(2020YFA0608604);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(S20230139)

[本刊网址·在线杂志] <http://www.zjujournals.com/soc>

[网络连续型出版物号] CN 33-6000/C

[作者简介] 1.汪笑溪(<https://orcid.org/0000-0003-2678-9217>),男,浙江大学中国农村发展研究院、公共管理学院百人计划研究员,博士生导师,农业经济学博士,主要从事农业与资源经济学、农业食物系统转型、综合评估建模、气候变化适应和减排相关研究;2.蔡浩(<https://orcid.org/0000-0002-8048-9146>),男,浙江大学公共管理学院博士研究生,主要从事农业食物系统转型相关研究;3.宣佳琦(<https://orcid.org/0000-0002-8497-9054>),女,浙江大学公共管理学院博士研究生,主要从事食物消费相关研究;4.林斌(<https://orcid.org/0000-0003-0074-2330>),女,浙江大学公共管理学院博士后研究人员,主要从事农业污染治理和农业可持续发展相关研究;5.杜瑞莹(<https://orcid.org/0000-0002-8517-2252>),女,浙江大学公共管理学院博士研究生,主要从事农业技术变迁、农业劳动力相关研究。

和环境影响^[3]。该系统不仅包含农业生产和食品加工部门,还涵盖物流运输、批发零售、废弃物处置以及能源、化肥、农药和农膜生产等工业部门^[4]。其概念与当前国际学界广泛使用的食物系统(food system)概念基本一致,但在中文语境下更突出和强调农业部门的重要角色。农业食物系统不仅与温室气体排放密切相关,还对乡村振兴、粮食安全、农业绿色发展以及居民营养健康等多个社会发展目标产生重要影响。因此,有必要深入探讨政策措施的减排效果及其在健康、经济和环境等多目标中的作用。一方面,农业食物系统作为乡村振兴的“压舱石”、保障就业的“蓄水池”和促进国民经济发展的“战略后院”,在保障粮食安全和经济社会稳定方面发挥着重要作用。当前,中国仍面临保障粮食安全和主要农产品供给的重大任务,而农业食物系统温室气体减排可能会给国家粮食安全带来压力。研究表明,大规模植树造林虽能有效降低温室气体排放,却也可能导致粮食供给短缺和价格上涨,从而威胁粮食安全^[5]。另一方面,农业食物系统温室气体减排与国民营养健康和生态环境平衡密切相关。随着我国人均收入水平的提高,居民膳食结构逐渐由以谷物和淀粉类食物为主转变为以肉类和奶制品为主^[6]。这一变化在一定程度上提高了慢性疾病的发病率。同时,饲料粮需求的快速增长^[7]与食物浪费的增加^[8],进一步加剧了温室气体减排和资源环境的压力。因此,在满足粮食安全和国民营养健康需求的同时,实现碳中和与生态环境平衡,并推动可持续发展和高质量发展,已成为亟待解决的重要问题。

构建一个绿色低碳、健康且可持续的农业食物系统是实现高质量发展的必要条件之一。由于农业食物系统是一个复杂且庞大的系统,其温室气体减排与可持续转型之间可能同时存在协同效应和矛盾冲突,因此相关研究需要结合跨学科知识开展多尺度的系统性分析。目前,关于中国农业食物系统的研究往往聚焦温室气体减排或少数几个可持续转型目标,而未充分考虑中国在资源禀赋、国内外形势、经济发展阶段等方面的独特性。深入理解中国特色对设计适合中国国情的农业食物系统转型路径至关重要。基于此,本文从农业食物系统温室气体减排、可持续转型及其相互影响的角度梳理相关研究,以期优化和调控中国农业食物系统提供科学的决策支持和理论依据。

此外,本文进一步总结了农业食物系统温室气体减排和可持续转型的研究方法动态,为研究协同路径提供实践思路(图1)。

二、农业食物系统温室气体排放

(一)农业食物系统温室气体排放现状

农业食物系统是温室气体的主要排放源之一。现有文献已对农业食物系统的温室气体排放进行了深入研究,这些研究涵盖了不同的地理区域、排放环节和产品类别。全球农业食物系统的温室气体排放约占全球总排放量的34%,约为180亿吨CO₂^[1]。其中,约57%来自肉类、禽类和蛋类等动物性食物,29%来自植物性食物,14%来自其他食物类型^[9]。2015年,各国农业食物系统的温室气体排放量占其国家总排放量的14%至92%,而中国农业食物系统的温室气体排放量占全国温室气体排放量的19%^[1],主要排放环节包括:(1)农业生产活动,如水稻种植、反刍动物肠道发酵、畜禽粪便管理、化肥施用、秸秆焚烧和土地翻耕等;(2)土地利用和土地变化,包括森林和自然植被退化导致的碳损失、湿地碳循环和森林碳汇等;(3)农业投入品,如化肥、农药、农膜和能源等的生产;(4)产后环节,如食品加工、仓储运输、零售、消费以及食物垃圾处理。

农业生产活动是农业食物系统中温室气体排放的主要来源,主要涉及CH₄、CO₂和N₂O等温室气体^[10]。已有研究对中国农业生产活动中CH₄、CO₂和N₂O排放量进行了估计(图2)^[11-22]。其中,CH₄排放量占比最大,平均约占农业源温室气体排放的58%。稻田土壤和水稻根系中的甲烷菌会生成CH₄,并通过水体和植物体排放。水田漫灌导致的土壤湿度增加也会加剧CH₄排放。在畜牧业

中,反刍动物瘤胃内的甲烷菌在分解饲料时会产生大量CH₄。此外,畜禽粪便的厌氧发酵也是CH₄的主要排放源之一。N₂O是农业生产中的第二大温室气体,主要来自化肥施用导致的氮挥发、秸秆还田和焚烧,以及畜禽粪便的贮存和管理,其平均排放量约占农业源温室气体排放总量的26%。相比之下,农业生产中的CO₂排放量较少,其主要来源于农机消耗的化石燃料。然而,值得注意的是农业生产对土地的需求会引起土地利用变化,这不仅涉及土地利用和土地利用变化(land use and land-use change, LULUC)对碳汇的影响,也包括因森林和自然植被破坏导致的碳排放。碳汇的净变化,即损失和增加的总和,反映了LULUC过程中的碳排放情况。

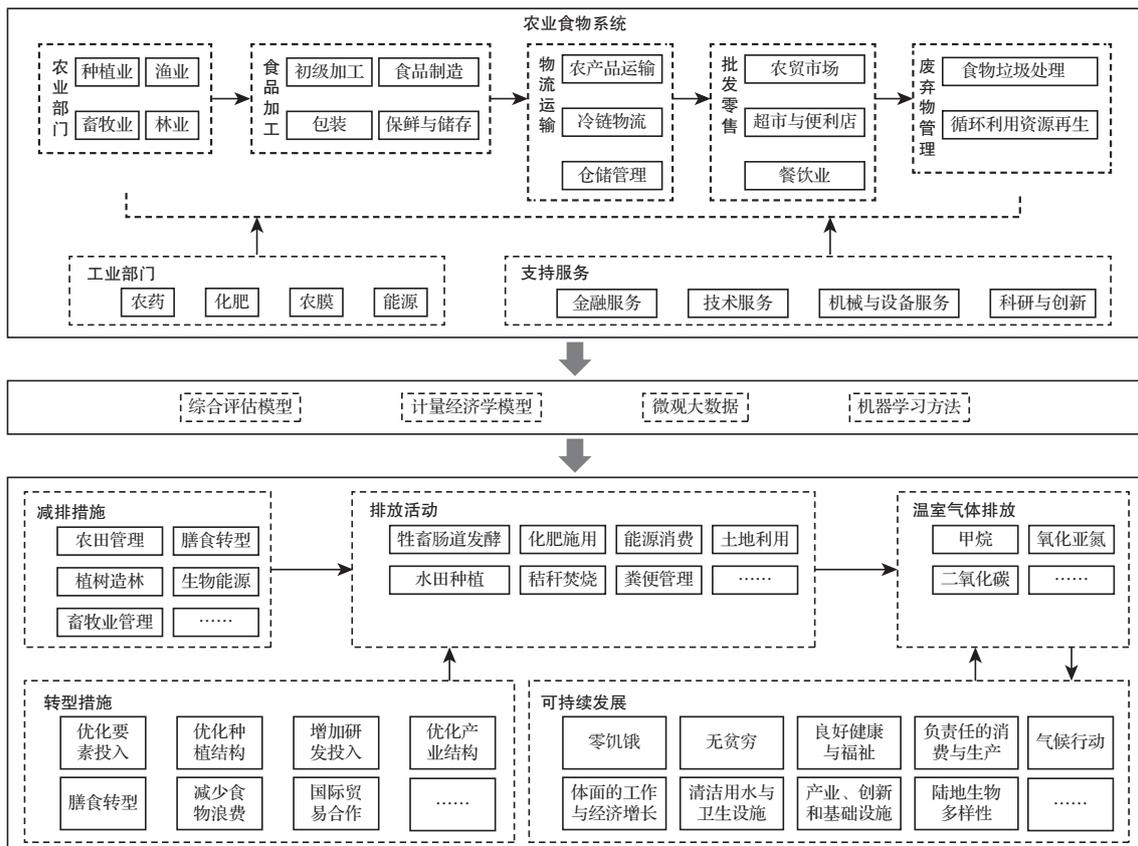


图1 多目标协同的农业食物系统研究框架

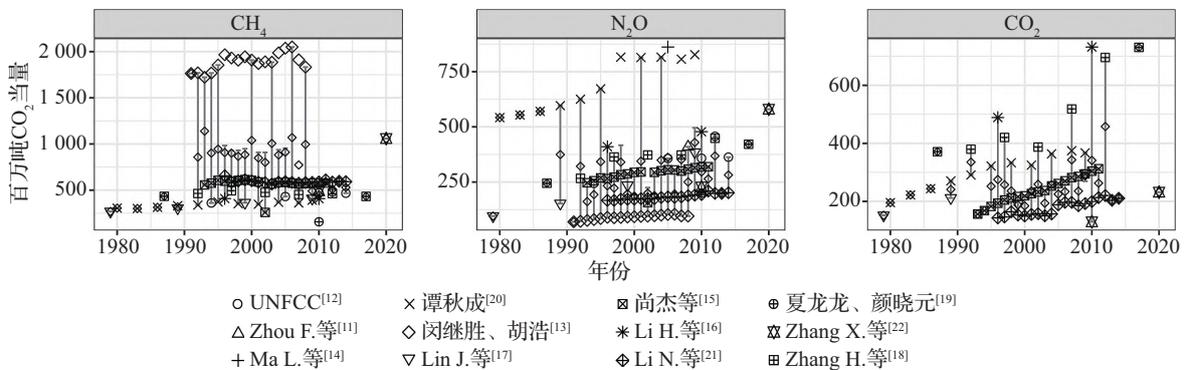


图2 已有研究对中国农业生产活动中CH₄、N₂O和CO₂排放量的估计结果^①

① 竖线为文献核算当年该排放去除异常值后的上下限范围,竖线以外为异常值,无竖线表示该年份只有一个观测值。图3同。

国内外学者已对中国农业食物系统各环节的温室气体排放进行了核算(图3)^[1,12-13,15-28],但现有研究的核算结果差异较大。1995—2019年,中国农业生产环节的温室气体排放估计量为936.14百万吨至1 694.77百万吨CO₂当量^[1,12-13,15-16,18-19,23-24,27]。当前,关于中国农业食物系统产前投入品生产所导致的间接温室气体排放的研究较为缺乏。化肥、农药、农膜和燃料等农业投入品的生产属于高耗能行业,其过程中产生的碳排放被称为间接温室气体排放。已有研究显示,1979—2017年,中国农业产前投入环节的温室气体间接排放量为152.61百万吨至617百万吨CO₂当量^[15,18,20]。近年来,中国农业食物系统在产后环节的温室气体排放量增长迅速,但由于跨部门数据统计口径不一致,核算难度较大。1990—2019年,不同研究测算的中国农业食物系统产后环节排放量存在显著差异^[1,16,18,23,26],其原因可能在于所使用的国际数据库和温室气体排放系数与中国实际情况存在偏差。综上,当前中国农业食物系统温室气体排放研究存在以下不足:(1)不同环节的温室气体排放核算结果差异较大,尤其是产前和产后环节,不同研究的核算结果可能相差数十倍;(2)针对中国农业食物系统全链条温室气体排放的研究相对较少,而覆盖全面且时间跨度较长的研究多使用国际通用系数,缺乏对中国农业食物系统温室气体排放核算的本地化研究,难以反映中国农业食物系统排放结构和变化趋势。国外学者使用的农业食物系统相关数据主要来源于国际数据库和科研机构,如联合国粮农组织数据库(FAOSTAT)、欧盟统计局数据库(Eurostat)、美国能源信息管理局(EIA)等,同时采用的核算方法和排放系数通常为国际通用方法和默认系数,这可能与中国的实际排放情况存在偏差。

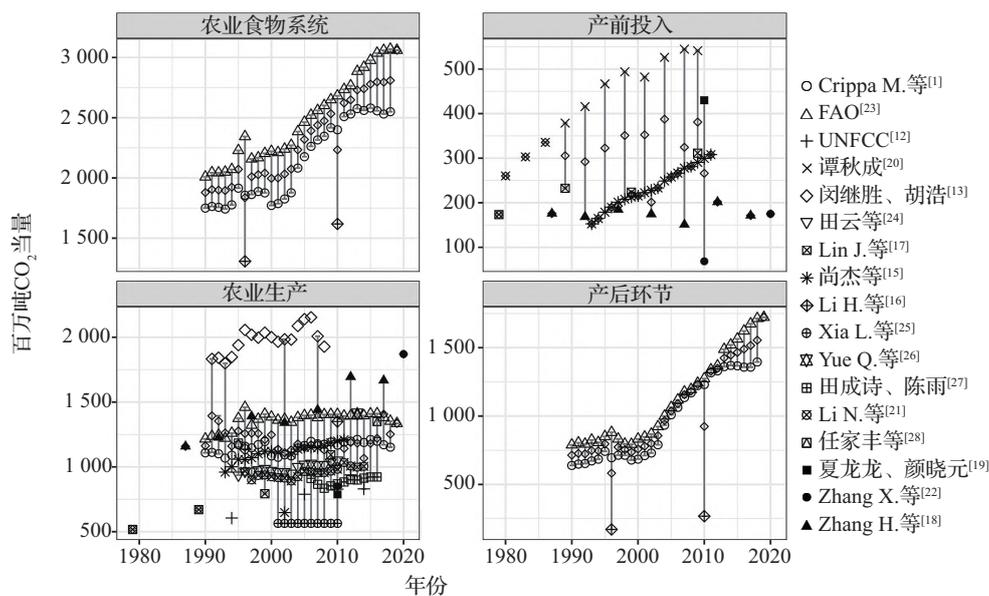


图3 已有研究对中国农业食物系统温室气体排放总量和分环节排放量的估计结果

(二) 农业食物系统温室气体减排措施

农业食物系统因其同时具有碳汇与碳源的双重属性,在实现碳中和过程中发挥着关键作用。现有研究主要从土地利用、农业生产和食物消费三个方面探讨农业食物系统的温室气体减排路径,具体措施及效果如表1所示。土地利用相关的减排措施在减少CO₂排放方面表现出显著效果,主要包括以下三类:(1)植树造林和防止土壤退化。植树造林被认为是一种有效的碳移除策略,研究发现,通过植树造林,全球在21世纪有望移除至少7 000亿吨CO₂^[5]。(2)生物能源与碳捕获和存储技术。大规模推广生物能源与碳捕获技术也显示出巨大潜力,预计在21世纪内可实现5 900亿吨以上的碳移除^[5]。(3)湿地保护。国外学者研究表明,通过保护湿地和植被再生,全球陆地系统有望在

2075年实现净碳汇增加^[29]。

农业生产减排措施主要集中于农田管理和畜牧业管理。在农田管理方面,化肥减量和畜粪还田可以通过提高氮肥利用效率减少温室气体排放,尤其是降低 N_2O 和 CH_4 排放^[30]。现有研究发现,不仅可以通过实施监管政策和推广农业技术等手段影响氮肥使用效率^[31],还可通过调整种植结构^[32]、调整农业投入要素价格^[33]和改进畜禽粪便管理^[34]来提高氮肥利用效率。然而,由于作物种类、土壤和气候的区域差异,改进农田管理措施对温室气体减排的效果在不同区域存在较大差异^[35]。在畜牧业管理方面,通过优化畜禽粪便和废弃物管理、改良饲料、添加甲烷抑制剂和调整养殖密度等措施,可以显著减少 N_2O 和 CH_4 排放^[36]。

食物消费方面的减排措施主要包括调整膳食结构、减少食物浪费和改变烹饪方式。研究显示,降低动物性食物消费和减少家庭食物浪费能够显著降低温室气体排放总量,尤其是 N_2O 和 CH_4 排放^[34]。在中国,每年的食物浪费比例约为27%^[8],若能将食物浪费和动物性食物的占比减少10%,预计到2030年将减少约12%的粮食生产相关 N_2O 排放^[37]。此外,烹饪过程产生的温室气体排放占各类食物温室气体排放量的6%—61%以上^[38]。通过采用节能烹饪设备及改变烹饪方式,可以进一步减少温室气体排放。

关于农业食物系统温室气体减排的研究已在全球、国家和区域层面进行了有益探索。然而,现有研究仍主要集中在宏观层面,或仅关注少数主粮作物,缺乏对不同区域及农产品层面减排措施影响的异质性分析。深入研究这一问题对制定有效的减排策略至关重要。

表1 农业食物系统的温室气体减排措施及效果

措施类别	具体措施	效果
土地利用	植树造林和防止土壤退化	全球在21世纪有望移除至少7 000亿吨 CO_2
	生物能源与碳捕获和存储技术	全球在21世纪可实现5 900亿吨以上的碳移除
	湿地保护	全球陆地系统有望在2075年实现净碳汇增加
农业生产	农田管理	化肥减量、畜粪还田、调整种植结构、调整农业投入要素价格和改进畜禽粪便管理以提高氮肥利用效率,减少温室气体排放
	畜牧业管理	通过优化畜禽粪便和废弃物管理、改良饲料、添加甲烷抑制剂和调整养殖密度等措施,可以显著减少 N_2O 和 CH_4 排放
食物消费	调整膳食结构	通过将食物浪费和动物性食物的占比减少10%,预计到2030年将减少约12%的中国粮食生产相关的 N_2O 排放
	减少食物浪费	减少约12%的中国粮食生产相关的 N_2O 排放
	改变烹饪方式	减少温室气体排放

三、农业食物系统可持续转型

(一)农业食物系统转型对温室气体减排的影响

当前,如何通过农业食物系统的转型实现全球气候目标,并识别关键的减排路径,已成为学术界和政策制定领域的关注重点。根据现有趋势,全球农业食物系统的温室气体排放量预计将继续增长,这将对《巴黎协定》中设定的1.5℃温控目标构成严峻挑战^[39]。人口增长和人均食物需求的持续增加,是推动全球农业食物系统温室气体排放量上升的关键因素^[40]。为应对这一挑战,现有研究对农业食物系统各环节的转型措施及其减排效果进行了深入探索,涵盖生产、消费、加工、零售和贸易等多个方面。

农业食物系统转型在温室气体减排方面发挥着积极作用。研究表明,通过提升农作物单产、推

动膳食结构转型、减少食物损失和浪费,以及提高农业系统的排放效率等措施,预计在2020—2100年,全球累计温室气体排放量可减少14%—48%^[39]。这些措施的综合实施将有助于实现农业食物系统的净零排放目标。在膳食结构转型中,推广植物性膳食和星球健康饮食被视为关键举措,这不仅有助于改善膳食质量和降低疾病风险,还能通过减少牲畜产品消费有效减少温室气体排放。此外,研究显示,向植物性膳食转变还能够将牧场和饲草种植用地恢复为自然植被,从而提供丰富的碳汇^[41]。与此同时,低碳农业生产实践展现出良好的减排潜力。通过改进农田管理、粪污管理和提高化肥施用效率等措施,有望在2050年前减少91亿吨至132亿吨CO₂当量的温室气体排放^[42]。然而,在具体措施层面,仍可能面临此消彼长的权衡。例如,提高农业生产率虽然有助于减少耕地占用和化肥施用,从而降低土地利用相关的温室气体排放^[43-44]。但是一些提高生产率的措施,如农业机械化和大规模灌溉设施建设,可能会增加能源消耗,带来温室气体排放增加的风险^[45-46]。因此,在推进农业食物系统转型的过程中需要谨慎整合与协调各项措施,以实现最大的减排效果。

中国农业食物系统亟须响应全球转型的需求,实现绿色低碳和高质量发展。当前,主要受经济增长、消费支出增加和膳食结构转变的影响,中国农业食物系统的温室气体排放总量持续上升^[1,23]。一些针对中国的国别研究显示,通过膳食转型、减少食物损失和浪费、改善农业生产实践以及环境保护措施,能够有效降低中国农业食物系统的温室气体排放,其中需求侧措施的减排效果尤为明显^[47]。减少红肉摄入,增加植物蛋白(如大豆)摄入,预计可以降低约30%的食品生产排放^[48],同时能够节约水资源、改善中国居民健康并减少空气污染导致的过早死亡。在生产端,通过征收排放税和提升氮素利用效率能够降低氮素盈余,缓解农业面源污染,减少30%的累积N₂O排放^[49]。

综上,当前关于农业食物系统转型对温室气体减排的研究仍有拓展空间。在全球尺度上,需要更多从地区、国家、区域到全球的自下而上的研究。同时,由于数据和方法的限制,现有研究结果缺乏精细的空间分辨率和区域异质性分析。在国家层面,目前关于中国农业食物系统转型路径和减排仍缺乏覆盖全环节、多部门及多种温室气体的综合性研究。未来研究有必要基于微观大样本数据,借助机器学习和人工智能模型,采用综合评估模型,结合计量经济学方法,构建和完善农业食物系统转型模型。

(二)农业食物系统转型对可持续发展目标的影响

可持续发展旨在满足当代需求的同时,确保不损害后代满足其需求的能力。为了评估和监测全球可持续发展进程,解决经济、社会和环境问题,联合国制定了全球可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)。SDGs包含17个目标,涵盖人类、地球、繁荣、和平与伙伴关系五个维度,提供了实现全球可持续发展的框架^[50],并为农业食物系统可持续转型设定了具体目标。

可持续转型是一种有意识且可控的环境和社会系统性变革,旨在推动可持续发展。这种转型包括为实现可持续发展目标而采取的一系列变革措施和具体行动,是实现可持续发展的前提和关键步骤。对可持续转型的研究主要通过定性和定量方法评估其现有及潜在影响,为政策制定提供参考和建议。在农业食物系统中,推动可持续转型是实现可持续发展目标的关键途径。研究可从SDGs的5个维度和17个目标出发,具体分析环境、经济、健康和包容性等方面。在环境维度上,重点研究减少农业活动对自然资源的过度消耗及其对环境的影响;在经济维度上,探索如何提高农业生产的经济效益;在健康维度上,研究农业生产和食物消费对人类健康的影响;在包容性维度上,则需考虑如何通过公平的资源分配和政策支持,提升农业从业者的社会地位和福利水平。通过系统化的转型措施,农业食物系统可以更好地适应并推动全球可持续发展。

农业食物系统转型不仅可以积极贡献于温室气体减排,也能够为可持续发展目标的实现提供有力支持。现有文献关于农业食物系统转型对可持续发展目标影响的研究主要集中在农业生产和

食物消费两方面(表2)。一些学者从农业生产的角度提出了农业食物系统可持续转型的路径。一方面,优化要素投入可以显著降低农业食物系统的环境负外部性,提升其环境可持续性,从而有助于实现SDG 6(清洁水和卫生设施)、SDG 12(负责任的消费与生产)、SDG 13(气候行动)和SDG 15(陆地生物多样性)。例如,过度使用农药化肥和低效处理畜禽粪便的粗放农业对资源环境造成了严重破坏^[51-52]。采用有机肥替代合成肥料、提高土壤氮素利用率、循环利用畜禽粪污以及取消化肥生产补贴等措施,可以有效减少氮肥使用^[49,53],从而缓解因化肥过度施用造成的土壤、水体和大气污染以及生物多样性退化等问题^[51]。另一方面,优化种植结构不仅可以节约农业用水和减少化肥农药投入,还能改善环境可持续性,同时保障粮食供给并促进农民增收^[32],这有利于实现SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)和SDG 3(良好健康与福祉)。

一些学者从食物消费的角度研究了膳食结构优化和减少食物浪费的经济、健康和环境协同效应,并提出了包括EAT-Lancet膳食模式在内的一系列膳食指南^[54]。优化膳食结构不仅可以降低慢性疾病的发病率和死亡风险^[55],还可减少农业食物系统的温室气体排放和农药化肥使用^[56],缓解土地和水资源的稀缺并保护生物多样性^[57]。这些措施推动了SDG 3(良好健康与福祉)、SDG 6(清洁水和卫生设施)、SDG 13(气候行动)和SDG 15(陆地生物多样性)的实现。此外,减少食物浪费也有助于改善营养和健康食物的可得性和可负担性^[58],降低营养不良的发病率^[59],并减少耕地和农业用水需求^[60],支持实现SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)、SDG 3(良好健康与福祉)和SDG 12(负责任的消费与生产)。因此,通过调整食物消费结构和模式,能够促进多维度可持续发展目标的实现。

农业食物系统的可持续转型具有经济、健康和环境的协同效应。已有文献在这一领域进行了有益的探索,从单一关注增产或减排目标拓展到对营养健康、生态保护、资源循环、贫困消除和社会公平等多个可持续发展目标的研究^[6]。然而,由于模型方法和数据可得性的限制,现有研究仍缺乏对环境、健康和经济三者之间协同效应的系统性定量分析,且对不同空间尺度、农产品层面和人群层面的异质性影响的分析不足。

表2 农业食物系统的转型措施与SDGs的关系

措施类别	措施	有助于实现的SDGs子目标	有助于实现SDGs子目标的途径
	优化要素投入	SDG 6(清洁水和卫生设施)、SDG 12(负责任的消费与生产)、SDG 13(气候行动)、SDG 15(陆地生物多样性)	改善化肥、农药、农膜、农机等投入可以显著降低农业食物系统的环境负外部性,提升农业食物系统的环境可持续性 ^[49,53] 优化种植结构可以节约农业用水和减少
	优化种植结构	SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)、SDG 3(良好健康与福祉)	化肥农药的投入,改善环境维度的可持续发展目标,同时保障粮食供给并促进农民增收 ^[32]
农业生产	提高农业研发投入	SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)、SDG 3(良好健康与福祉)、SDG 6(清洁水和卫生设施)、SDG 8(体面工作和经济增长)、SDG 12(负责任的消费与生产)、SDG 13(气候行动)、SDG 15(陆地生物多样性)	增加农业研发投入能够提高农业单产,降低土地、劳动力和要素投入,从而改善农业的环境负外部性,并可能促进农民增收和保障粮食安全 ^[61]
	优化产业结构	SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)、SDG 8(体面工作和经济增长)、SDG 9(产业、创新和基础设施)	培育非农产业发展有助于扩大非农就业、促进产业结构升级;培育新型农业经营主体有助于提升农民收入

续表 2

措施类别	措施	有助于实现的 SDGs 子目标	有助于实现 SDGs 子目标的途径
食物消费	推动膳食转型	SDG 3(良好健康与福祉)、SDG 6(清洁水和卫生设施)、SDG 13(气候行动)、SDG 15(陆地生物多样性)	有助于降低慢性疾病的发病率和死亡风险,减少农业食物系统的温室气体排放和农药化肥的使用,缓解土地和水资源的稀缺并保护生物多样性
	减少食物浪费	SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)、SDG 3(良好健康与福祉)、SDG 12(负责任的消费与生产)、SDG 13(气候行动)、SDG 15(陆地生物多样性)	有助于改善营养和健康食物的可得性和可负担性 ^[58] ,降低营养不良的发病率 ^[59] ,并减少对耕地和农业用水需求 ^[60]
	营养膳食补贴	SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)、SDG 3(良好健康与福祉)	通过财政转移支付为低收入和弱势群体提供营养膳食补贴,从而缓解营养不良和饥饿所导致的贫穷 ^[62]
食品加工与零售	保障食品安全	SDG 3(良好健康与福祉)、SDG 12(负责任的消费与生产)	通过对食品生产全链条追踪,保障消费者食品安全
	完善食品标签和认证体系	SDG 3(良好健康与福祉)、SDG 12(负责任的消费与生产)	增加消费者对健康、环保和可持续食品的支持意愿 ^[63]
	减少食物损失	SDG 1(无贫穷)、SDG 2(零饥饿)、SDG 3(良好健康与福祉)、SDG 12(负责任的消费与生产)	保障粮食安全,稳定粮食价格,保障营养和健康食物的可得性和可负担性
贸易政策	建立地区和国家间食品贸易合作	SDG 2(零饥饿)、SDG 17(促进目标实现的伙伴关系)	通过农产品和食品进出口贸易合作协议,保障食品国内供给和扩大农产品出口市场,保障粮食安全和提升农民收入 ^[64]

四、农业食物系统温室气体减排与转型路径研究方法

综合评估模型是研究农业食物系统温室气体减排与可持续发展相互作用机理的主流方法,其主要优势包括:(1)综合评估模型能够整合生态环境系统与人类活动的信息,准确反映二者的相互作用关系。(2)综合评估模型可以考察农业生产要素之间的相互作用对温室气体排放和可持续发展目标的影响以及不同政策措施的减排效果,包括减排技术、碳税激励机制和政策目标(如植树造林政策)的成效。例如,Wu等^[65]和Duan等^[66]基于自然与人类系统综合评估模型(CHANS)的研究发现,调整土地规模可以有效降低氮损失和N₂O排放。(3)综合评估模型可以辨析多目标的协同作用。研究表明,提高农田养分效率对温室气体减排和可持续发展目标具有协同效应^[67]。

当前主流的综合评估模型主要包括德国波茨坦气候影响研究所(PIK)的MAGPIE模型^[68]、全球变化联合研究所(JGCRI)的GCAM模型^[69]、国际应用系统分析研究所(IIASA)的GLOBIOM模型、普渡大学全球贸易分析项目中心的GTAP模型^[70]、国际粮食政策研究所(IFPRI)的IMPACT模型^[71]、北京大学中国农业政策研究中心的CAPSiM模型^[72]和中国人民大学的CHINARGO模型^[67]。这些模型存在较大差异,主要体现在三个方面:(1)生产要素配置和土地利用机制的模拟精细程度^[73]。这是研究要素配置和种植结构对温室气体排放、环境与经济方面可持续发展目标发挥影响的关键。(2)空间特征的明确性^[44,68]。空间特征决定了模型能否考察农业温室气体排放和环境可持续发展目标在空间区域上的差异^[44,68,74]。(3)耦合集成能力,即农业经济模型与植被生态作物模型、气

候模型和健康风险模型的集成程度。这决定了模型能否阐明农业食物系统减排与可持续性发展的相互影响关系^[75],对多目标优化决策研究至关重要。上述综合评估模型方法在全球和国家层面分析农业食物系统温室气体排放和可持续转型中具有显著优势(表3)。同时,部分学者开展了主流国际模型的中国本地化研究,例如,目前MAgPIE、GCAM和GLOBIOM模型已开发中国版本MAgPIE-China^[47,49,76]、GCAM-China^[77]和GLOBIOM-China^[78]。通过进一步完善本地化模型的关键参数设置,可有效提升政策情景模拟的精度,从而深化对空间区域、农产品和人群层面影响差异的相关研究^[34]。在此基础上,推进多模型耦合技术的系统集成将为中国农业食物系统分析提供更全面的方法支撑,有助于实现对相关减排和转型政策的系统评估。值得注意的是,部分学者通过整合微观调研数据与国内政策背景,在跨尺度建模领域取得了突破^[47,49,76]。其中,以MAgPIE-China为核心构建的首个中国农业食物系统综合评估模型,系统量化并揭示多政策协同对实现可持续发展的关键作用^[47]。

一些学者从微观农户层面出发,采用计量经济学模型实证研究影响农户低碳生产行为的因素。化肥使用作为农业食物系统中N₂O的主要来源,备受关注。研究发现,农户的受教育程度和风险偏好是影响其化肥施用的主要因素,农业技术培训可以提高农户的技术采纳,显著降低化肥用量^[30]。另有学者从要素配置角度考察了农户施肥行为,发现土地所有权、土地规模与细碎化程度对化肥用量存在显著影响^[79]。研究显示,在相同土地规模条件下,土地细碎化程度越高,农户化肥施用强度越大。此外,学者们还实证研究了农业食物系统中农业生产和食物消费的经济和社会效益,从农业生产成本、市场需求和价格波动等角度探讨了可持续农业模式的经济可行性^[80]。例如,发展有机农业、采用新型种植技术和育种技术、改革化肥政策、提高化肥施用效率及应用小规模灌溉技术等措施,有助于节约土地资源和保障粮食安全^[81]。还有一部分研究从农业食物系统的包容性角度,考察了农业技术采纳和种植结构优化对农民福祉、经济增长和贫困减少的影响^[82]。微观层面的研究为改进综合评估模型的参数和评估指标体系提供了重要参考。

一些研究基于微观层面数据,采用自下而上的方式评估农业食物系统转型的环境影响。例如,Yang等基于80余万份餐饮行业菜品消费数据,估算了中国各省农业食物系统的温室气体排放,并提出低碳膳食转型可减少38%—69%的温室气体排放^[83]。Feng等人基于全球29个国家的校园食物浪费数据,估算了相关的土地使用和温室气体排放,并强调了加强可持续食物教育的重要性^[84]。此外,在考虑气候变化等未来不确定性时,一些研究采用机器学习方法整合气候变化、土壤特性和农业管理措施,以提升预测精度及重要参数估计的准确性。例如,深度神经网络可预测气候变化对作物产量的负面影响^[85],这些产量预测数据可进一步应用于农业经济部门的综合评估模型。同样,基于对气候数据的模拟训练,机器学习方法可用于气候变化模型的长期趋势预测^[86]、高精度网格数据生成^[87]及极端气候事件预测^[88],进而增强农业食物系统减排与转型研究对气候变化不确定性的研判。

综上所述,计量经济学模型、机器学习方法、微观行业 and 农户数据与综合评估模型在研究农业食物系统温室气体减排与可持续转型的协同路径中相辅相成。由于农业食物系统的可持续转型涉及经济、健康和生态环境等多个维度,相关研究需全面考察相应的成本和收益。因此,耦合农业、经济、环境和健康的农业食物系统综合评估模型不可或缺。计量经济学模型能够识别农业食物系统减排和可持续转型的机制及影响差异,为综合评估模型提供更准确的参数估计和完善的评估指标体系。微观数据包含多个维度,涉及个体或群体的行为和特征,有助于提供对特定研究对象的精准洞见,进而提出更具针对性的政策建议。机器学习方法则能有效解决农业食物系统相关研究面临的数据缺失、数据处理量巨大以及预测精度不足等问题,进一步增强了研究的科学性和实用性。

表 3 全球和国内部分农业食物系统相关综合评估模型概述

模型	模型特点				
	类型	开发机构	空间精度	耦合性能	部门
农业生产及其环境影响模型(MAgPIE)	局部均衡	德国波茨坦气候变化影响研究所(PIK)	0.5°×0.5° 格点, 200个空间聚类, 12个国家和地区	生物物理模型、农作物模型、健康风险评估模型、能源经济模型、气候变化模型	农业、林业、畜牧业、生物能源
全球粮食和水资源政策分析模型(IMPACT)	局部均衡	国际食物政策研究所(IFPRI)	320个生产单元、159个国家、8个区域	生物物理模型、健康风险评估模型、气候变化模型	农业、畜牧业
全球生物圈管理模型(GLOBIOM)	局部均衡	国际应用系统分析研究所(IIASA)	5"–30" 之间格点, 37个国家和地区	作物模型、气候变化模型、水资源模型	农业、畜牧业、林业、生物能源
全球变化评估模型(GCAM)	局部均衡	全球变化联合研究所(JGCRI)	384个次级国家和地区, 32个一级国家和地区	气候变化模型、陆地系统模型	农业、畜牧业、林业、能源
全球贸易分析计划模型(GTAP)	可计算一般均衡	普渡大学全球贸易分析项目中心(GTAP)	144个国家、19个区域	农业生态模型、土地利用部门模型	全部门
中国农业政策模拟模型(CAPSiM)	局部均衡	北京大学中国农业政策研究中心(CCAP)	中国 1/12° 格点精度	作物模型、可计算一般均衡模型	农业、畜牧业
中国农业可持续发展决策支持系统(CHINARGO)	局部均衡	中国人民大学	中国县级精度	农业生态模型	农业、畜牧业

注: 模型空间精度根据模型官方文档和公开文献总结, 部分模型空间精度可在标准精度基础上进一步提升。模型耦合性能基于已发表研究论文得出, 并不完全代表该模型耦合能力。

五、研究展望

已有研究在农业食物系统温室气体减排与转型领域取得了显著进展, 为后续研究提供了重要参考。基于上述分析, 本文为未来中国农业食物系统减排和转型提出研究展望。

第一, 基于微观大样本数据, 结合计量经济学模型和机器学习方法, 提高综合评估模型的准确性。综合评估模型是研究农业食物系统温室气体减排与可持续发展相互作用机理的主流方法, 但为提高模型结果可靠性, 仍需改进关键参数的准确性。未来研究可以基于微观观测大样本数据、利用计量经济学模型构造实证策略, 识别农业食物系统温室气体减排与生产要素配置和农业生产的因果关系, 并将实证分析结果与综合评估模型相结合, 优化模型参数设置, 以提升模型模拟的准确性。同时, 可以通过机器学习方法, 利用历史数据进行训练, 为长期模拟提供坚实的数据基础。

第二, 结合生命周期核算方法与综合评估模型, 完善全链条温室气体排放核算。现有研究多聚焦减排政策对农业生产及土地利用直接温室气体排放的影响, 忽略了对农业食物系统全链条温室气体排放影响的科学估计, 难以为决策者提供准确的评估依据。将生命周期核算方法与综合评估模型结合, 有助于克服生命周期核算方法无法考虑农业生产要素互动机制的局限性, 从而提供更全面的减排潜力评估。

第三,整合跨学科数据并耦合不同模型系统,构建多目标优化的模型系统。由于研究方法与跨学科数据的匮乏,现有文献对农业食物系统减排与可持续发展关联的系统定量研究较少。农业食物系统温室气体减排与可持续发展是生态系统与人类活动相互作用的结果。因此,有必要耦合农业经济模型、植被作物模型、健康风险模型和气候模型,整合跨学科数据,构建全面的综合评估模型,以分析农业食物系统温室气体排放与可持续发展目标的相互作用,揭示农业食物系统温室气体减排政策措施在经济、健康和环境方面的潜在影响,以及农业食物系统温室气体减排与可持续发展目标实现的协同路径。

第四,拓展空间区域、农产品和人群层面研究,阐明农业食物系统减排和可持续转型的影响差异。尽管已有文献在国家层面取得了进展,但对于特定区域、主要农产品和脆弱人群的深入分析仍然不足。因此,有必要考察农业食物系统温室气体减排对可持续发展的影响差异,阐明其在空间区域、农产品层面和人群层面的异质性,为协同政策的制定提供科学依据。

第五,基于大规模数据,嵌入人工智能模型以提升决策效率。当前,尽管人工智能技术快速发展,但在农业食物系统研究中的应用仍然有限。人工智能模型强大的文本检索和归纳能力,在构建农业食物系统的减排和转型路径及情景分析方面存在巨大潜力。此外,通过整合现有主流综合评估模型,构建情景模拟与转型路径数据库,可以为人工智能算法提供训练数据,从而建立适用于中国农业食物系统的人工智能模型,以显著提升决策效率并支撑重大决策。

[参 考 文 献]

- [1] Crippa M., Solazzo E. & Guizzardi D. et al., "Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions," *Nature Food*, Vol. 2, No. 3 (2021), pp. 198-209.
- [2] Poore J. & Nemecek T., "Reducing food's environmental impacts through producers and consumers," *Science*, Vol. 360, No. 6392 (2018), pp. 987-992.
- [3] FAO, *The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.
- [4] FAO, *The State of Food and Agriculture 2021: Making Agrifood Systems More Resilient to Shocks and Stresses*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.
- [5] Humpenöder F., Popp A. & Dietrich J. P. et al., "Investigating afforestation and bioenergy CCS as climate change mitigation strategies," *Environmental Research Letters*, Vol. 9, No. 6 (2014), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064029>.
- [6] Wang X., Bodirsky B. L. & Müller C. et al., "The triple benefits of slimming and greening the Chinese food system," *Nature Food*, Vol. 3 (2022), pp. 1-8.
- [7] 孟祥海、程国强、张俊飏等:《中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析》,《中国环境科学》2014年第8期,第2167-2176页。
- [8] Xue L., Liu X. & Lu S. et al., "China's food loss and waste embodies increasing environmental impacts," *Nature Food*, Vol. 2, No. 7 (2021), pp. 519-528.
- [9] Xu X., Sharma P. & Shu S. et al., "Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods," *Nature Food*, Vol. 2, No. 9 (2021), pp. 724-732.
- [10] 田云、张俊飏:《农业碳排放国内外研究进展》,《中国农业大学学报》2013年第3期,第203-208页。
- [11] Zhou F., Shang Z. & Ciais P. et al., "A new high-resolution N₂O emission inventory for China in 2008," *Environmental Science & Technology*, Vol. 48, No. 15 (2014), pp. 8538-8547.
- [12] UNFCCC, "Greenhouse gas inventory data: time series—Annex I," https://di.unfccc.int/time_series, 2024-08-15.

- [13] 闵继胜、胡浩:《中国农业生产温室气体排放量的测算》,《中国人口·资源与环境》2012年第7期,第21-27页。
- [14] Ma L., Ma W. Q. & Velthof G. L. et al., "Modeling nutrient flows in the food chain of China," *Journal of Environmental Quality*, Vol. 39, No. 4 (2010), pp. 1279-1289.
- [15] 尚杰、杨果、于法稳:《中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究》,《中国生态农业学报》2015年第3期,第354-364页。
- [16] Li H., Wu T. & Wang X. et al., "The greenhouse gas footprint of China's food system: an analysis of recent trends and future scenarios," *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 20, No. 4 (2016), pp. 803-817.
- [17] Lin J., Hu Y. & Cui S. et al., "Carbon footprints of food production in China (1979-2009)," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 90 (2015), pp. 97-103.
- [18] Zhang H., Xu Y. & Lahr M. L., "The greenhouse gas footprints of China's food production and consumption (1987-2017)," *Journal of Environmental Management*, Vol. 301 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113934>.
- [19] 夏龙龙、颜晓元:《中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望》,《农业环境科学学报》2020年第4期,第665-672页。
- [20] 谭秋成:《中国农业温室气体排放:现状及挑战》,《中国人口·资源与环境》2011年第10期,第69-75页。
- [21] Li N., Shang L. & Yu Z. et al., "Estimation of agricultural greenhouse gases emission in interprovincial regions of China during 1996-2014," *Natural Hazards*, Vol. 100 (2020), pp. 1037-1058.
- [22] Zhang X., Wu L. & Ma X. et al., "Dynamic computable general equilibrium simulation of agricultural greenhouse gas emissions in China," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 345 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131122>.
- [23] FAO, "FAO: FAOSTAT emissions shares," 2023-11-09, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/EM>, 2024-08-15.
- [24] 田云、张俊飏、李波:《中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应》,《资源科学》2012年第11期,第2097-2105页。
- [25] Xia L., Ti C. & Li B. et al., "Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential," *Science of The Total Environment*, Vol. 556 (2016), pp. 116-125.
- [26] Yue Q., Xu X. & Hillier J. et al., "Mitigating greenhouse gas emissions in agriculture: from farm production to food consumption," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 149 (2017), pp. 1011-1019.
- [27] 田成诗、陈雨:《中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价——基于衍生指标与TOPSIS法的运用》,《自然资源学报》2021年第2期,第395-410页。
- [28] 任家丰、党馨逸、姚柯渝等:《中国食物生产消费系统碳素动态变化及其环境负荷》,《中国环境科学》2020年第8期,第3693-3702页。
- [29] Humpenöder F., Karstens K. & Lotze-Campen H. et al., "Peatland protection and restoration are key for climate change mitigation," *Environmental Research Letters*, Vol. 15, No. 10 (2020), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abae2a>.
- [30] Cui Z., Zhang H. & Chen X. et al., "Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers," *Nature*, Vol. 555, No. 7696 (2018), pp. 363-366.
- [31] Zhang W., Cao G. & Li X. et al., "Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers," *Nature*, Vol. 537, No. 7622 (2016), pp. 671-674.
- [32] Xie W., Zhu A. & Ali T. et al., "Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China," *Nature*, Vol. 616 (2023), pp. 300-305.
- [33] Zhang X., Davidson E. A. & Mauzerall D. L. et al., "Managing nitrogen for sustainable development," *Nature*, Vol. 528 (2015), pp. 51-59.
- [34] Bodirsky B. L., Popp A. & Lotze-Campen H. et al., "Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution," *Nature Communications*, Vol. 5 (2014), <https://doi.org/10.1038/ncomms4858>.
- [35] Vleeshouwers L. M. & Verhagen A., "Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study

- for Europe,” *Global Change Biology*, Vol. 8, No. 6 (2002), pp. 519–530.
- [36] Herrero M., Henderson B. & Havlik P. et al., “Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector,” *Nature Climate Change*, Vol. 6, No. 5 (2016), pp. 452–461.
- [37] Hu Y., Su M. & Wang Y. et al., “Food production in China requires intensified measures to be consistent with national and provincial environmental boundaries,” *Nature Food*, Vol. 1, No. 9 (2020), pp. 572–582.
- [38] Frankowska A., Rivera X. S. & Bridle S. et al., “Impacts of home cooking methods and appliances on the GHG emissions of food,” *Nature Food*, Vol. 1, No. 12 (2020), pp. 787–791.
- [39] Clark M. A., Domingo N. G. G. & Colgan K. et al., “Global food system emissions could preclude achieving the 1.5 ° and 2 °C climate change targets,” *Science*, Vol. 370, No. 6517 (2020), pp. 705–708.
- [40] Li Y., Zhong H. & Shan Y. et al., “Changes in global food consumption increase GHG emissions despite efficiency gains along global supply chains,” *Nature Food*, Vol. 4, No. 6 (2023), pp. 483–495.
- [41] Hayek M. N., Harwatt H. & Ripple W. J. et al., “The carbon opportunity cost of animal-sourced food production on land,” *Nature Sustainability*, Vol. 4, No. 1 (2021), pp. 21–24.
- [42] Costa C., Wollenberg E. & Benitez M. et al., “Roadmap for achieving net-zero emissions in global food systems by 2050,” *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1 (2022), <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18601-1>.
- [43] Wang X., Dietrich J. P. & Lotze-Campen H. et al., “Beyond land-use intensity: assessing future global crop productivity growth under different socioeconomic pathways,” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 160 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120208>.
- [44] Wang X., Biewald A. & Dietrich J. P. et al., “Taking account of governance: implications for land-use dynamics, food prices, and trade patterns,” *Ecological Economics*, Vol. 122 (2016), pp. 12–24.
- [45] 王翌秋、徐丽、曹蕾:《“双碳”目标下农业机械化与农业绿色发展——基于绿色全要素生产率的视角》,《华中农业大学学报(社会科学版)》2023年第6期,第56–69页。
- [46] Qin J., Duan W. & Zou S. et al., “Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture,” *Nature Communications*, Vol. 15, No. 1 (2024), <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47383-5>.
- [47] Wang X., Cai H. & Xuan J. et al., “Bundled measures for China’s food system transformation reveal social and environmental co-benefits,” *Nature Food*, Vol. 6 (2025), pp. 72–84.
- [48] Guo Y., He P. & Searchinger T. D. et al., “Environmental and human health trade-offs in potential Chinese dietary shifts,” *One Earth*, Vol. 5, No. 3 (2022), pp. 268–282.
- [49] Wang X., Xu M. & Lin B. et al., “Reforming China’s fertilizer policies: implications for nitrogen pollution reduction and food security,” *Sustainability Science*, Vol. 18 (2023), pp. 407–420.
- [50] United Nations, *The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals: An Opportunity for Latin America and the Caribbean*, https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/2030_agenda_and_the_sdgs_an_opportunity_for_latin_america_and_the_caribbean.pdf, 2024–08–12.
- [51] Galloway J. N., Townsend A. R. & Erisman J. W. et al., “Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions,” *Science*, Vol. 320, No. 5878 (2008), pp. 889–892.
- [52] West P. C., Gerber J. S. & Engstrom P. M. et al., “Leverage points for improving global food security and the environment,” *Science*, Vol. 345, No. 6194 (2014), pp. 325–328.
- [53] 林斌、徐孟、汪笑溪:《中国农业碳减排政策、研究现状及展望》,《中国生态农业学报(中英文)》2022年第4期,第500–515页。
- [54] Willett W., Rockström J. & Loken B. et al., “Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems,” *The Lancet*, Vol. 393, No. 10170 (2019), pp. 447–492.
- [55] Chen H., Shen J. & Xuan J. et al., “Plant-based dietary patterns in relation to mortality among older adults in China,” *Nature Aging*, Vol. 2, No. 3 (2022), pp. 224–230.
- [56] Bajželj B., Richards K. S. & Allwood J. M. et al., “Importance of food-demand management for climate mitigation,” *Nature Climate Change*, Vol. 4, No. 10 (2014), pp. 924–929.

- [57] Springmann M., Godfray H. C. J. & Rayner M. et al., "Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 113, No. 15 (2016), pp. 4146-4151.
- [58] Philippidis G., Sartori M. & Ferrari E. et al., "Waste not, want not: a bio-economic impact assessment of household food waste reductions in the EU," *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 146 (2019), pp. 514-522.
- [59] Barrera E. L. & Hertel T., "Global food waste across the income spectrum: implications for food prices, production and resource use," *Food Policy*, Vol. 98 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101874>.
- [60] 胡越、周应恒、韩一军等:《减少食物浪费的资源及经济效应分析》,《中国人口·资源与环境》2013年第12期,第150-155页。
- [61] Ruane J. & Ramasamy S., "Global investments in agricultural research: where are we and where are we going?" <https://doi.org/10.4060/cc6971en>, 2024-08-12.
- [62] Miller C. M., Tsoka M. & Reichert K., "The impact of the Social Cash Transfer Scheme on food security in Malawi," *Food Policy*, Vol. 36, No. 2 (2011), pp. 230-238.
- [63] Duckworth J. J., Randle M. & McGale L. S. et al., "Do front-of-pack 'green labels' increase sustainable food choice and willingness-to-pay in U.K. consumers?" *Journal of Cleaner Production*, Vol. 371 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133466>.
- [64] Smith V. H. & Glauber J. W., "Trade, policy, and food security," *Agricultural Economics*, Vol. 51, No. 1 (2020), pp. 159-171.
- [65] Wu Y., Xi X. & Tang X. et al., "Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 115, No. 27 (2018), pp. 7010-7015.
- [66] Duan J., Ren C. & Wang S. et al., "Consolidation of agricultural land can contribute to agricultural sustainability in China," *Nature Food*, Vol. 2, No. 12 (2021), pp. 1014-1022.
- [67] van Wesenbeeck C. F. A., Keyzer M. A. & van Veen W. C. M. et al., "Can China's overuse of fertilizer be reduced without threatening food security and farm incomes?" *Agricultural Systems*, Vol. 190 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103093>.
- [68] Lotze-Campen H., Müller C. & Bondeau A. et al., "Global food demand, productivity growth, and the scarcity of land and water resources: a spatially explicit mathematical programming approach," *Agricultural Economics*, Vol. 39, No. 3 (2008), pp. 325-338.
- [69] Muratori M., Calvin K. & Wise M. et al., "Global economic consequences of deploying bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)," *Environmental Research Letters*, Vol. 11, No. 9 (2016), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/095004>.
- [70] Liu J. Y., Fujimori S. & Takahashi K. et al., "Identifying trade-offs and co-benefits of climate policies in China to align policies with SDGs and achieve the 2 °C goal," *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 12 (2019), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab59c4>.
- [71] Springmann M., Clark M. & Mason-D'Croz D. et al., "Options for keeping the food system within environmental limits," *Nature*, Vol. 562, No. 7728 (2018), pp. 519-525.
- [72] Xie W., Huang J. & Wang J. et al., "Climate change impacts on China's agriculture: the responses from market and trade," *China Economic Review*, Vol. 62 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2018.11.007>.
- [73] Müller C. & Robertson R. D., "Projecting future crop productivity for global economic modeling," *Agricultural Economics*, Vol. 45, No. 1 (2014), pp. 37-50.
- [74] Popp A., Humpenöder F. & Weindl I. et al., "Land-use protection for climate change mitigation," *Nature Climate Change*, Vol. 4, No. 12 (2014), pp. 1095-1098.
- [75] Soergel B., Kriegler E. & Weindl I. et al., "A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda," *Nature Climate Change*, Vol. 11, No. 8 (2021), pp. 656-664.
- [76] Wang X., Du R. & Cai H. et al., "Assessing the impacts of technological change on food security and climate

- change mitigation in China's agriculture and land-use sectors," *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 107 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107550>.
- [77] Tong D., Cheng J. & Liu Y. et al., "Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015–2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios," *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 20, No. 9 (2020), pp. 5729–5757.
- [78] Ren M., Huang C. & Wu Y. et al., "Enhanced food system efficiency is the key to China's 2060 carbon neutrality target," *Nature Food*, Vol. 4, No. 7 (2023), pp. 552–564.
- [79] 史常亮、张益、郭焱等：《耕地细碎化对农户化肥使用效率的影响》，《自然资源学报》2019年第12期，第2687–2700页。
- [80] Cassman K. G. & Grassini P., "A global perspective on sustainable intensification research," *Nature Sustainability*, Vol. 3, No. 4 (2020), pp. 262–268.
- [81] Grovermann C., Quiédeville S. & Muller A. et al., "Does organic certification make economic sense for dairy farmers in Europe?—a latent class counterfactual analysis," *Agricultural Economics*, Vol. 52, No. 6 (2021), pp. 1001–1012.
- [82] Moschini G., Lapan H. & Kim H., "The renewable fuel standard in competitive equilibrium: market and welfare effects," *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 99, No. 5 (2017), pp. 1117–1142.
- [83] Yang X., Gao Q. & Duan H. et al., "GHG mitigation strategies on China's diverse dish consumption are key to meet the Paris Agreement targets," *Nature Food*, Vol. 5, No. 5 (2024), pp. 365–377.
- [84] Feng L., Luo R. & Liu X. et al., "Global school plate waste estimates highlight the need for building a sustainable food education system," *Nature Food*, Vol. 5, No. 10 (2024), pp. 860–868.
- [85] Crane-Droesch A., "Machine learning methods for crop yield prediction and climate change impact assessment in agriculture," *Environmental Research Letters*, Vol. 13, No. 11 (2018), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae159>.
- [86] Liu L., Zhou W. & Guan K. et al., "Knowledge-guided machine learning can improve carbon cycle quantification in agroecosystems," *Nature Communications*, Vol. 15, No. 1 (2024), <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43860-5>.
- [87] Xu P., Li G. & Zheng Y. et al., "Fertilizer management for global ammonia emission reduction," *Nature*, Vol. 626, No. 8000 (2024), pp. 792–798.
- [88] Eyring V., Collins W. D. & Gentine P. et al., "Pushing the frontiers in climate modelling and analysis with machine learning," *Nature Climate Change*, Vol. 14, No. 9 (2024), pp. 916–928.

Transformation of the Chinese Food System Towards Sustainable Development Goals and Climate Mitigation

Wang Xiaoxi Cai Hao Xuan Jiaqi Lin Bin Du Ruiying

(China Academy for Rural Development / School of Public Affairs, Zhejiang University,
Hangzhou 310058, China)

Abstract: Promoting greenhouse gas (GHG) emission reduction within China's food system through a multi-objective synergistic approach is crucial for China to achieve carbon neutrality targets and sustainable development goals. Climate change has become one of the major challenges facing human society, requiring coordinated global actions to mitigate its impacts. To effectively address climate change and play an active role in the global actions of GHG reduction, China pledged in 2020 to achieve carbon neutrality by 2060, and incorporated this commitment into its Nationally Determined Contributions (NDCs). In this context, the agricultural food system, as both an emission source and a carbon sink, plays a crucial role in achieving carbon neutrality.

The Chinese agricultural food system contributes to GHG emissions through land-use changes, agricultural production, input manufacturing, and post-production activities such as food processing, packaging, transportation, and consumption. It is the second-largest source of anthropogenic GHG emissions, surpassed only by fossil fuel combustion. Moreover, the food system also substantially impacts social and economic development goals, including rural development, food security, sustainable agricultural development, and public nutritional health. Therefore, it is critical to thoroughly explore the emission reduction effects of policy measures and their roles in achieving multiple objectives related to health, economic, and environmental outcomes.

This study systematically reviews the development of research methodologies in GHG emission reduction and agricultural food system transformation, in China and globally, with a particular focus on land use, agricultural production, and food consumption. We identify the contributions and limitations of integrated assessment models (IAMs), econometric approaches, bottom-up research based on micro-level data, and machine learning approaches. These tools enable researchers to evaluate the complex interactions between agricultural practices, environmental outcomes, and socioeconomic factors across various spatial and temporal scales.

Based on existing research, we outline future research agenda for GHG emission reduction and sustainable transformation of China's food system. While the existing literature provides valuable insights into GHG emissions accounting, emission reduction strategy evaluation, and food system transformation pathways, most of the research mainly focuses on a single objectives or measures. To address this, a more comprehensive research paradigm is proposed. First, given that accuracy in estimating key parameters of IAMs is often constrained by data limitations, future studies can leverage micro-level, large-sample data, machine learning, and econometric methods to optimize model parameterization, thereby supporting policy-making. Second, life-cycle estimation for food system GHG emissions should be prioritized, enabling a more comprehensive assessment of emission reduction potential. Third, integrating interdisciplinary data and coupling different model systems are essential to building multi-objective optimization frameworks. By combining agro-economic models, vegetation and crop models, health risk models, and climate models, comprehensive assessments can be conducted to reveal the health, economic, and environmental impacts of GHG emission reduction policies in the agricultural food systems and to identify synergies with sustainable development goals. Fourth, future research should delve into spatial and demographic heterogeneity in agricultural emissions and mitigation potential, with particular attention to underdeveloped regions, key agricultural products, and vulnerable populations. This focus could make policy-making more targeted and inclusive. Finally, by building scenario simulation and transition pathway databases, training data can be provided for artificial intelligence (AI) algorithms. This would facilitate the development of AI models tailored to China's food system, significantly improving decision-making efficiency and supporting major policy decisions.

Key words: food system; GHG emission reduction; sustainable transformation; multi-objective synergistic; IAMs

