全程耦合下食物系统的低碳转型：研究进展与理论框架*

王雅楠，李　梦，李　睿

（西北农林科技大学经济与管理学院，陕西　杨凌　712100）

摘　要：食物系统是联结营养健康与可持续发展的关键纽带，也是实现“双碳”目标的重要抓手。现有研究对于如何将食物系统低碳转型融入全程耦合框架尚无清晰的理论依据，且食物系统如何针对不同的耦合模式，从生产端、流通端到消费端设计差异化的低碳调控路径，目前尚未得出较明确的研究结果。基于此，文章在全程耦合视角下构建了城市食物系统低碳转型理论框架，分别从生产端、流通端和消费端提出低碳转型路径：生产端主要通过推动技术升级与资源循环利用，提高资源利用效率；流通端主要通过缩短供应链，减少中间损耗，降低流通成本；消费端主要通过提升食物可得性、调整膳食结构和转变消费者行为推动膳食多样化，倒逼企业低碳化生产。提出内部耦合系统要构建以县域为单元的城乡绿色生产闭环，建立“种植—养殖—废弃物—能源”区域循环体系；周边耦合系统要建设区域一体化的绿色流通网络；远程耦合系统要联合制定差异化膳食指南，推行食物碳标签制度，并建立跨区域生态补偿机制的政策建议。

关键词：全程耦合；食物系统；低碳转型

中图分类号：F326.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-9189(2025)06-0138-13

一、引　言

食物是连接可持续发展与人类营养健康的纽带。食物系统是人类赖以生存的根基，也是全球可持续发展的核心议题之一。中央农村工作会议和中央一号文件多次提出要树立大食物观，推动食物系统向高产高效、营养健康、绿色低碳、共同富裕和有韧性的方向转型。中国、美国、欧盟和巴西等161个国家和地区签署了《关于韧性粮食体系、可持续农业及气候行动的阿联酋宣言》，明确强调农业食物系统对于实现《巴黎协定》气候目标的重要性，并提出一系列目标和行动方案（樊胜根和张玉梅，2024）。目前，高投入驱动的农业与食物生产、流通和消费模式导致环境代价高昂，资源趋紧、环境退化和碳排放增加等问题日益严重。农业食物系统温室气体排放量约占全球排放总量的三分之一，如果不采取措施，未来30年食物系统排放量将增加60%~90%，对环境的影响会超过安全线。中国食物系统温室气体排放约占总排放量的37%（Yang et al.，2024），且明显呈现区域异质性。粮食主产区承担了最主要的排放压力，粮食产销平衡区排放水平次之，粮食主销区的碳排放量最低（Huan et al.，2025）。从食物类型来看，动物性食物的温室气体排放量远高于植物性食物，且这种差异在生产阶段尤为突出，动物性食物因肠道发酵、饲料生产及粪便管理等过程形成大量温室气体，其排放贡献可占食物系统总量

*项目来源：国家自然科学基金项目（42401374）；陕西省社会科学基金项目（2025D008）。

作者简介：王雅楠，女，博士，教授，研究方向：食物系统低碳转型。

的27%(Poore and Nemecek，2018)。在流通阶段，蔬菜、水果、谷物等高吨位运输或需温控运输的食物，在运输环节的排放强度显著上升，可占食物里程排放总量的36%(Li et al.，2022)。Lin et al.(2025)指出，蔬菜、家禽和水产品碳排放在流通过程中随本地化率提高而减少，牛肉和羊肉呈相反趋势，水果和猪肉则因城市而异。相较之下，批发与零售环节所产生的碳排放远低于生产与流通阶段。

随着城市化进程的加速，全球超过一半的人口居住在城市，并消耗了相当比重的全球作物产量。传统的食物生产方式往往伴随着高能耗、高排放的特征，给城市环境带来巨大压力。城市食物系统的低碳转型旨在通过减少温室气体排放、优化资源利用和提高能源效率，降低其对城市环境的影响。因此，城市食物系统被视为实现更可持续的资源利用和减缓气候变化的重要杠杆点，也是实现“双碳”目标的重要切入点。而现代城市的食物系统是一种更依赖于周边及远距离供给，并以大规模生产为基础的工业化食物供应链，其碳排放影响不局限于本地，更通过复杂的空间关联向周边及远程城市传导，形成跨区域、多环节的碳责任网络。如Liu et al.(2023)指出，中国因区域间贸易而产生的温室气体排放量占全国食物系统总排放量的30.5%。河南、河北等高食物输出区域为江苏、北京等食物输入区域承担了相应的环境与健康代价(Zheng et al.，2025)。食物系统碳排放在空间上存在显著的“责任—地理”错配，导致食物输入区域与本地生产区域的减排存在系统性差异。

全程耦合理论为分析跨地域关系提供了重要的理论视角，该理论着眼于阐释远距离耦合下人类与自然系统间的社会经济和环境相互作用，与食物系统多部门、跨区域特征高度契合(马恩朴等，2022)。然而，如何将食物系统低碳转型融入全程耦合框架尚无清晰的理论依据。食物系统低碳转型的实质是随着经济发展和物质需求变化，在政府引导、市场供需、资源约束等多重因素影响下，食物系统在生产、流通和消费环节，实现从高投入、高消耗、高排放向低投入、低消耗、低排放的转型。现有研究表明，实现这一转型需供给侧和需求侧相互配合、协同发力。然而，食物系统如何针对不同的耦合模式从生产端、流通端到消费端设计差异化的低碳调控路径，目前尚未得出较明确的研究结果。因此，本文在全程耦合视角下构建了城市食物系统低碳转型理论框架，分别从生产端、流通端和消费端提出低碳转型路径，能够从全局角度优化城市食物系统结构，促进食物系统形成可持续生产和消费模式，为各个城市食物系统之间统筹治理、分工协作实现食物系统低碳转型、协同增效提供科学依据，从而提升整个食物系统的转型效率和可持续水平。

二、食物系统低碳转型研究进展

(一) 食物系统的构成与分类

食物系统理论植根于欧美的“食物链”(Food Chain)概念及哈佛大学Trelogan et al.(1957)提出的“农业综合体”(Agribusiness)理论。根据马恩朴等(2020)的界定，该系统的核心内涵在于其作为食物生命周期中基于劳动地域分工而形成的“社会—经济—生态”复合子系统，涵盖了农业与食物价值链上的所有活动、要素及其交互关系。食物系统包含多个相互联系、相互作用的要素或部分，是具有一定结构和功能的有机整体，包括所有参与主体及其关联的增值活动。从食物供应链角度，食物系统通常分为六个主要阶段：生产(包括农业和渔业)、收获后处理和储存、加工、分销、零售和消费(包括家庭和家庭外)，具有多功能性、复杂性、耗散结构和多层次性等重要特征。食物系统类型的划分主要有两种视角，一类是按历史发展，分为传统、混合、现代食物系统；另一类是按空间尺度，分为全球、区域、城市、本地和家庭食物系统。这些不同尺度的食物系统相互交织、彼此关联，共同构建起全球食物系统。

(二) 食物系统低碳转型研究的主要进展

资源、气候、资本、技术和文化制度等因素共同塑造着食物系统，其各子系统内部、各子系统之间以及系统与外部环境之间，通过物质、能量、信息的流动与反馈机制紧密关联、相互作用，最终构

成一个动态统一的整体(周应恒等，2022)。因此，食物系统的转型也是多种因素相互作用、共同约束的结果。其中，消费需求拉动、技术创新驱动和政策支持推动是食物系统演化动因研究的主要关注方向，在不同程度上影响食物系统的变化。在经济社会持续发展的背景下，中国居民食物消费需求呈现显著升级态势，核心表现为从数量型消费向质量型消费转变。该需求升级构成了食物系统转型的根本性需求拉动力(陈忠明等，2018)。受人口结构、收入增长和饮食偏好的影响，未来十年中国食物需求将继续保持增长并呈现结构性变化(Chen et al.，2014)，对食物系统产生持续性、深远的影响。食品产业的技术进步是食物系统演化的主要供给动力，食品产业链不断延伸和复杂化推动食物系统持续升级，不仅促进食品生产的类别增加与质量提升，也有效应对生产中的不确定性。食品产业科技进步推动生产要素的流动与高效重新配置，成为农业生产方式转变的重要驱动力，为食品加工业和流通服务业的发展提供了技术支撑，推动了传统食品产业的现代化。国家政策支持与制度保障是食物系统转型的主要政策动力(周应恒等，2022)。合理有效的规制促进了食物系统的数量和质量提升，保障了中国粮食产量能够满足国内消费需要、增加农民收入、促进可持续发展和提高农业竞争力。中国食品产业政策逐渐向结构调整与行业规制优化转型，进一步推进中国食品产业向现代化与健康可持续方向发展。

面对新形势下食物安全、国民营养、生态平衡、市场有效及系统韧性的多重需求，加速推进中国食物系统向更健康、更可持续、更公平和更有韧性的方向转型迫在眉睫。“3060”目标是推动农业加速达到高质量发展拐点的契机(李劼和徐晋涛，2022)，与其他产业不同，农业兼具减排与增汇的双重属性，需坚持减排、增汇协同推进，积极探索契合自身特质的转型方向与发展策略。樊胜根等(2019)提出，未来中国食物系统转型应以实现高产高效、健康营养、可持续、韧性、包容性的协调发展为目标。树立和践行大食物观是人多地少的大国在食物转型后期应对和解决环境问题和挑战的必经路径。这需要将技术进步与社会文化、政策变化相结合，以应对气候变化、经济转型、环境恶化、健康问题以及社会可持续发展等多方面的严峻挑战。食物系统的转型以生产和消费为核心，可从社会文化、社会技术和管理体系三个维度进行驱动(黄秋怡等，2022)。在此过程中，政府的引导性政策与企业的技术创新同样重要，二者共同推动从生产、土地利用到消费与废弃物管理全链条的升级(Herrero et al.，2020)。此外，推动食物系统转型需要采取系统化策略，从食物系统的供给侧和需求侧持续发力。农户、政府和消费者协同行动，共同承担起转型责任，可从政策、技术、制度创新和国际合作等多个维度和途径加快推动农业食物系统低碳转型。同时，应借助机器学习、人工智能模型和计量经济学方法，构建多目标协同的农业食物系统优化决策模型以实现食物系统减排与可持续转型(汪笑溪等，2025)。

具体而言，供给侧的可行路径包括嵌入式推广绿色农业技术、多层次推进农业生产托管绿色化转型、全方位倡导绿色农产品生产(黄晓慧和聂凤英，2023)。以农业经济的低碳化为抓手，带动农业生产过程绿色化，提升废弃物高效转化能力，推广低碳农业技术，进而实现农产品的优质化(金书秦等，2021)。在此过程中，数字化与智能化突破了农户资本禀赋不足和信息闭塞的约束，驱动农户农业绿色低碳转型(黄晓慧和聂凤英，2023)。然而，在当前食物生产，特别是畜牧业生产增长情况下，通过供给侧改善食物系统的缓解效益可能被抵消，即使提高了效率，为满足不断增长的需求所带来的产量增加仍可能导致温室气体净排放上升。因此，单纯依靠供给侧结构性改革不足以实现系统减排，必须与需求侧协同发力。从需求侧来看，调整饮食结构是应对全球人口持续攀升、减轻食物系统对资源和环境造成压力的关键举措。通过优化膳食结构，并借助膳食指南等途径开展健康饮食的宣传教育与知识普及，可有效减轻食物需求压力，推动农业向绿色可持续方向转型。具体而言，减少动物性食物消费，增加植物性食物摄入，可减少温室气体排放、水和土地消耗，从而减少食物系统对环境的负面影

响。因此，在应对居民收入增长导致的食物系统碳排放增加的减排措施中，有必要制定引导居民饮食结构向果蔬等植物类食物及“低畜肉、高禽、蛋、奶和水产品”的动物类食物结构转变的政策指向措施（朱文博等，2023）。其中，食物碳标签的应用是促进绿色低碳消费、推动食物系统绿色低碳转型的有效手段（黄俊勇和刘世锦，2023）。马晓琴和张永生（2024）通过核算不同区域食物消费的环境足迹，进一步证实食物消费转型会带来巨大的环境改善效应。

（三）全程耦合理论及在农业领域研究中的主要进展

全程耦合理论是对人类与自然耦合系统、人类与环境耦合系统、社会与生态耦合系统研究的自然延伸。该理论涵盖了本地系统内部（内部耦合）、相邻系统之间（周边耦合）和遥远系统之间（远程耦合）人与自然的相互作用，为解释和内部化跨空间的社会经济与环境外部性提供了明确方法，有助于提高全球贸易、人口迁移、土地和生态系统管理等方面的政策有效性（Liu，2017）。全程耦合理论最初起源于远程耦合理论，后者的综合概念由刘建国等学者于2011年在美国科学进步协会“人与自然系统耦合”专题讨论会上提出，并在随后展开详细论述。在此基础上，Liu et al.（2023）进一步将理论所涵盖的空间尺度扩展到内部耦合和周边耦合，提出全程耦合框架。也有学者进一步对理论进行了拓展，方创琳等（2016）逐步凝练出了“近远程耦合”的理论模型。刘海猛等（2019）进行了“耦合魔方”的理论创新，将空间维度的近远程耦合、时间维度的近远期耦合、组织维度的组内间耦合和表象维度的显隐性耦合统一纳入“耦合魔方”理论框架。

目前全程耦合理论在概念层面和实证层面应用于各种社会经济和环境问题，包括土地利用、水资源、能源等方面。从土地利用领域的研究来看，全球化的快速推进促进了全球贸易关系网络的形成，商品需求的变化在一定程度上会引起远端地区生产与消费的改变，进而对土地利用模式造成影响。部分学者基于农产品贸易网络和可持续发展视角，从国家层面和城市层面利用远程耦合框架对土地利用的演化机理及其带来的社会经济影响和生态环境效应进行了深入探讨（Liu et al.，2023）。研究涉及的土地利用的类型包括农业用地、森林等多种类型。这些基于土地利用视角的研究为实现人类社会可持续发展，减轻全球气候变化以及保障粮食安全等提供了重要参考。从水资源领域的研究来看，耦合框架为评估水资源可持续性提供了标准、系统和灵活的工具，可量化虚拟水贸易中发送系统、接收系统以及外溢系统之间全程耦合强度与联系（孙才志等，2025）。Li et al.（2023）基于水资源贸易提出了“远程耦合取水”概念，以研究远距离消费对本地水资源的影响，深入探讨了其他地区远程消费对本地取水的驱动作用。冯德东等（2025）应用远程耦合理论来构建乡村振兴和城乡融合长效机制。从能源领域的研究来看，人地系统近远程耦合视角为解决能源在地理空间分布上的不均性与世界能源需求的错配关系提供了具有系统性和综合性的解决方案。例如，Fang et al.（2016）构建了能源远程耦合研究框架，并基于此提出了能源可持续分析方法，为深入研究能源可持续发展问题提供了全新的机会。

综上所述，全程耦合理论在多个领域的成功应用，为其拓展至食物系统研究提供了可能。现代食物供应链通过复杂的贸易网络，将遥远的生产区域与密集的消费城市紧密相连，这一过程不仅产生了社会经济影响，也导致了资源环境压力在空间上的转移与错配。这与全程耦合理论相匹配。因此，本文将食物系统低碳转型纳入全程耦合理论的分析框架，为推进食物系统可持续发展提供新的分析视角和理论支撑。

三、全程耦合下食物系统低碳转型的理论分析框架

（一）食物系统融入全程耦合框架的内在依据

首先，现代食物系统呈现出鲜明的“多部门、跨区域”复杂特征。一方面，随着区域连通性不断增强，大城市的食物供给高度依赖外部，形成了明显的跨区域调动网络。这意味着城市食物系统的低碳

转型不仅关乎本地，更与周边乃至遥远地区通过社会经济纽带相互影响，即存在“遥相关”效应。另一方面，食物系统涵盖了从生产、加工、流通到销售和消费的多个部门，其互动关系错综复杂；同时，它作为城乡融合与区域转型的关键杠杆，产生的社会经济与环境影响具有显著外溢性。这些特征共同决定了食物系统符合全程耦合分析框架(马恩朴等，2022)。因此，将食物系统纳入全程耦合理论框架，构建其低碳转型的理论基础，能为该领域提供一套规范、系统的评估方法。

其次，从食物系统低碳转型的必要性来看，新形势下食物系统面临多重挑战，如膳食结构不合理、资源短缺、营养健康问题。从外部来看，食物系统受到全球化、工业化、城镇化、信息化等因素影响；从内部来看，食物系统受到社会结构、发展阶段、文化传统、收入水平等因素影响。因此，亟须从全程耦合的角度构建一个系统性理论框架，为食物系统实现从高投入、高消耗、高排放向低投入、低消耗、低排放的低碳转型提供理论依据。食物系统作为连接城乡和工农产业链、价值链的核心纽带，成为深入揭示低碳转型中“遥相关”等全程耦合作用机制的关键切入点。运用全程耦合框架进行系统性分析，不仅是理解其复杂性的必要条件，更是推动城市食物系统实现可持续发展的理论基石。

(二) 全程耦合下食物系统低碳转型理论框架构建

1. 全程耦合系统边界界定与关联组件识别

全程耦合是在远程耦合的基础上增加内部耦合与周边耦合，可以综合反映人类、食物与自然在相邻和远程系统内以及跨相邻系统和远程系统的相互作用。以城市食物系统为例，确定以提质增效(生产端)、短链减损(流通端)、膳养均衡(消费端)为目标的低碳转型框架。将城市内部、农村与城市之间的资源要素流动界定为内部耦合系统，城市与相邻城市的资源要素流动视为周边耦合系统，城市与远途城市之间的资源要素流动归为远程耦合系统。将远程耦合框架的5个关联组件(系统、流、原因、路径、代理)和食物系统的各个环节(生产、流通、消费)对应起来，构建出一个以绿色低碳为转型目标，以城乡互动、工农互动和人地互动为转型基础，以食物系统各环节为转型过程的全程耦合下食物系统低碳转型理论框架(见图1)。构建过程如下：

(1)确定全程耦合下的城市食物系统。全程耦合系统主要包括内部耦合、周边耦合和远程耦合。远程耦合系统以非生态系统服务和远距离资源调度为基础，重点关注城市与远途城市之间的资源要素流动。

(2)确定流。各模式之间的资源要素流主要包括农产品流、人才流、市场信息流和资金流等，其中农产品物流作为这些要素流动的基本组成部分。

(3)确定影响食物系统低碳转型的因素。要素投入减量化、生产过程清洁化、废弃物资源化有助于食物在生产阶段减少排放，因此在生产环节选取生产要素绿色化作为影响食物系统低碳转型的因素。提高食物系统在流通过程中的能源效率也是驱动食物系统向低碳发展转型的关键因素。膳食结构不合理是导致营养不良问题产生的最主要因素，同时，这种不合理的膳食模式也给资源环境带来了较为严重的负面影响。调整现有的膳食结构为可持续健康膳食模式，是同时实现居民营养健康和食物低碳转型的有效“杠杆”。

(4)在影响因素的基础上确定具体的调控路径。以生产、流通和消费各个环节为抓手，生产环节主要通过农业生产方式优化路径，包括有机肥替代、化肥农药减量、废弃物资源化利用、智能化设备投入、农机共享平台建立；流通环节重点提升能源效率，如新能源设备使用、物流网络优化、推广冷链物流节能保鲜技术使用等；消费环节则通过可持续膳食指南、增收降价、低碳烹饪、碳标签产品等，并引入产品碳标签制度进行调控。

(5)确定食物系统低碳转型全程耦合中各环节的代理。生产环节的代理包括农户、家庭农场、农业企业和农民专业合作社；流通环节涉及农产品加工企业、仓储物流企业、农产品批发商和农产品零

售商；消费环节包括餐饮企业、酒店、城市家庭和餐馆。

2. 不同耦合模式下食物系统碳排放的机理分析

在全程耦合视角下，不同耦合模式通过其特定的“流”与“代理”交互过程，共同塑造了食物系统碳排放的生成机制及空间差异。碳排放并非单一环节的结果，而是多种物质、信息与资金流跨尺度作用的综合体现。

在内部耦合系统中，城市消费者与零售商对近郊农产品在数量、品质与时效性方面的高强度需求，直接驱动了包括农户、农业企业与农民专业合作社等在内的近郊农业生产者为满足市场要求，普遍采取依赖化肥、农药的集约化种植模式及能源密集型温室农业。这种生产方式的普遍化，与饲料与养殖错位、种养循环不足等结构性问题相互交织，共同推高了生产端的温室气体排放。与此同时，城乡间的人口流动不仅作为劳动力资源流调节生产能力，更成为消费偏好、市场信息与技术知识传播的重要载体，进一步强化了系统的高碳路径依赖。具体而言，其导致近郊农业出现“质量与结构性空心化”，剩余劳动力老龄化、技术水平偏低，生产者为维持产出水平，往往采取“资本替代劳动”的策略，即依赖农业机械、化肥与农药等要素投入。这种结构性替代虽在一定程度上弥补了劳动力短缺，但也显著提高了化石能源消耗与温室气体排放，从生产要素层面固化了系统的高碳特征。此外，进城务工后返乡的农民所带回的城市生产与管理理念具有显著的双重性：一方面可能引入提升资源效率的精细化管理方式，另一方面也易沿袭工业化体系中追求短期效益的思维定式，进而强化对能源与化学投入的依赖，加剧内部耦合系统的碳排放压力。总体而言，内部耦合系统的碳排放高度集中于农业生产环节，其本质是城市消费需求通过市场信号与要素流动对近郊农业生产方式形成的系统性塑造。要素投入减量化、生产过程清洁化、废弃物资源化（如城市厨余、有机废弃物通过生态系统服务流回农业体系）成为该模式下降碳的核心逻辑，有望在内部耦合系统内构建物质闭环，实现“高需求—低排放”的局域低碳转型路径。

在周边耦合系统中，城市间稳定且大规模农产品贸易流动形成了高度依赖公路货运与冷链技术的物流格局。物流企业作为流通端的关键代理，为保障跨区农产品的稳定供应与品质安全，构建以高能耗为特征的运输与冷链体系，直接导致持续的交通燃油消耗与制冷过程碳排放。具体而言，流通端的碳排放来源于多重结构性能耗环节：首先，在包装加工过程中，塑料、纸制品等包装材料的生产、使用与废弃处置均伴随显著的隐含碳排放；其次，在运输阶段，车辆燃油燃烧及冷链运输中制冷剂的泄漏构成主要排放源；再次，在仓储环节，冷库与分拣中心长期维持低温环境所需的高强度电力消耗进一步放大了系统碳足迹。此外，食材在运输、仓储与零售过程中的损耗，尤其是生鲜类产品腐损所产生的甲烷排放，进一步增加了整个系统的碳足迹。除上述物理性排放外，信息流的失真与不对称亦对系统碳强度产生放大效应。当市场信息传递滞后或存在扭曲时，批发商、零售商等中间代理易作出非最优决策，导致库存冗余、迂回运输及返程空载等问题，从而在运营层面造成资源浪费与碳排放叠加。因此，周边耦合系统的碳排放问题并非单一的技术或能耗结果，而是区域农产品流通体系在结构协同、能源效率与信息整合方面存在系统性约束的综合体现。为系统性降低该耦合模式下的碳排放强度，应以提升流通环节能源效率与信息透明度为核心导向，推动区域物流网络的优化与分工协同，通过新能源设备使用、绿色冷链技术普及与数字化信息平台构建等，实现运输、仓储与调度环节的系统性低碳化转型，从而推动周边耦合系统的食物供应链由“高能耗—高损耗”向“高效率—低排放”结构性升级。

在远程耦合系统中，城市之间的食物与资源要素流动呈现出典型的“责任分离—隐含碳转移”机制，其核心特征在于消费地与生产地的空间分离及环境责任的错位。该系统的碳排放主要由两部分构成：其一，远距离城市间的农产品贸易流在流通过程中因运输距离长、冷链依赖高而产生大量能源消耗与制冷剂排放；其二，更为关键的是通过远程贸易输入的“虚拟隐含碳流”，即上游城市在生产端为

满足下游消费需求所产生的温室气体排放。这一机制造成消费城市与生产城市之间的碳责任脱节，使得部分消费城市在表面上呈现“低排放”特征，实则通过商品流通“外包”了其生产端的碳排放压力。在该系统中，资金流与市场信息流成为驱动高碳路径延展的关键媒介。消费城市的高收入群体和零售企业通过价格信号与资本流向，引导上游城市扩大高能耗、高碳密度农产品(如肉类、乳制品、精加工食品)的生产规模，从而加剧了碳排放的空间外溢效应。与此同时，饮食偏好的信息流与文化扩散机制，通过贸易商、品牌企业与电商平台等代理主体在城市间传播，推动更多上游区域模仿消费中心的饮食结构与市场模式，进一步强化了生产端的能源与资源消耗。由此形成的“需求拉动—生产响应—碳外溢”传导链条，构成了远程耦合系统碳排放机制的本质特征。因此，远程耦合系统的低碳转型重点不在于直接干预生产端，而在于系统性地重塑消费城市的需求结构与责任链条。通过推动消费端的膳食结构优化、提升健康可持续食物的可得性、引入产品碳标签制度等路径，在需求侧抑制高碳农产品的市场驱动效应，进而构建远程耦合系统下的低碳流通格局，实现食物系统环境责任的再平衡。

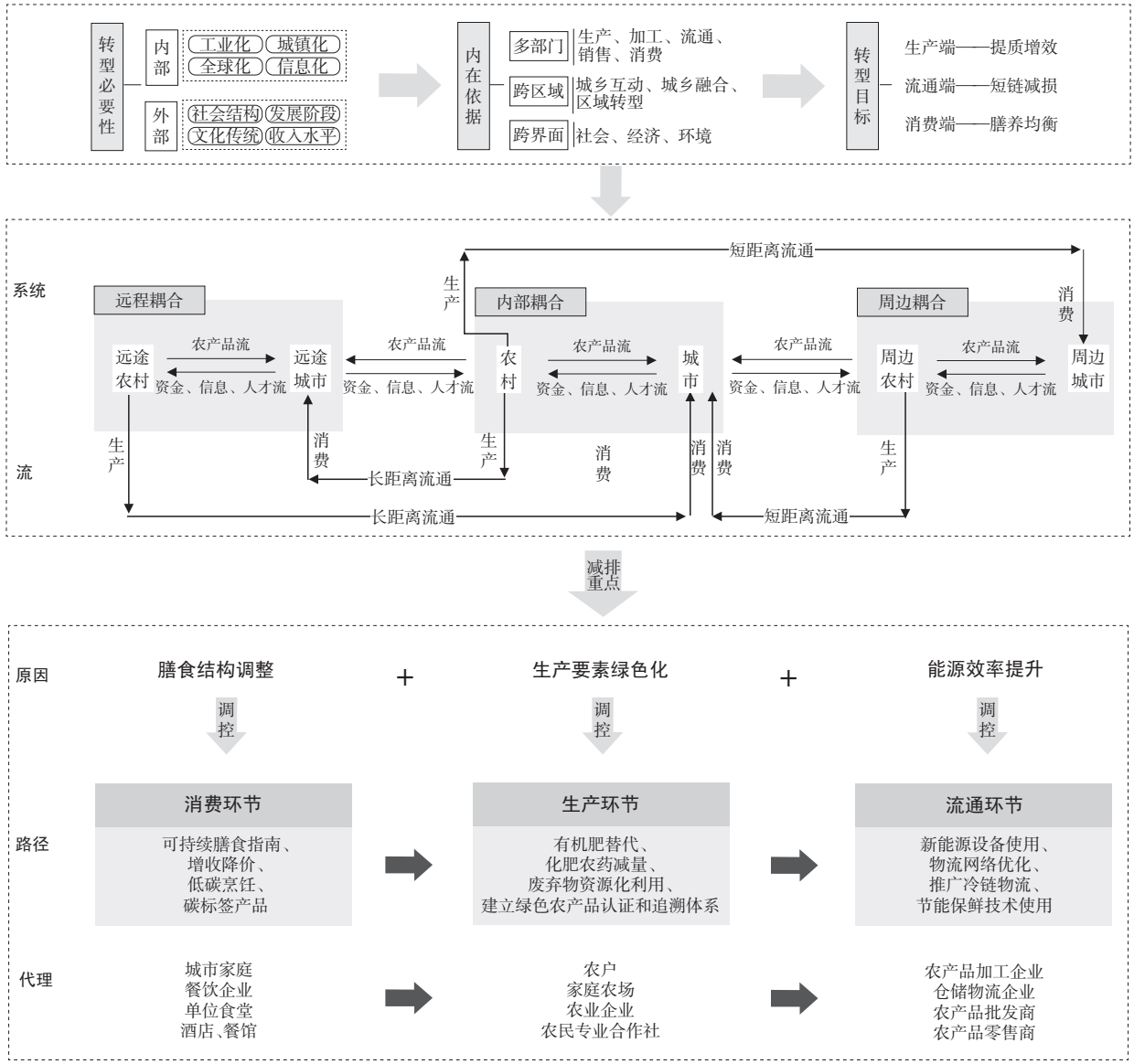


图1 全程耦合下食物系统低碳转型理论框架

四、全程耦合下食物系统低碳转型的实现路径

食物系统低碳转型的实质是资源环境约束下“人—食—地”关系的调整和优化，食物系统后端“人”的消费结构低碳化与前端“地”的种养结构低碳化相互作用、共同发力，促进食物系统低碳转型。由于资源环境承载力、生态系统功能、经济发展基础等因素差异，需要因地制宜构建食物系统低碳转型的调控路径。根据上文所构建的全程耦合下食物系统低碳转型理论框架，结合转型目标，分别从生产端、流通端和消费端提出低碳转型路径。生产端主要通过推动技术升级与资源循环利用，提高资源利用效率；流通端主要通过缩短供应链，减少中间损耗，降低流通成本；消费端主要通过提升食物可得性、膳食结构调整和转变消费者行为推动膳食多样化，倒逼企业低碳化生产。

（一）基于生产端的食物系统低碳转型实现路径

在内部耦合系统中，近郊农业存在秸秆资源化利用不足、畜禽粪便资源化利用率低、绿色生产要素覆盖率不高等种养循环不足的问题，导致在农业食物系统的生产端温室气体排放量居高不下，比如由于有机肥利用率低，多数地区仍以施用化学肥料为主；农业机械化作业的能源利用效率仍有较大提升空间。因此，需要合理优化农业生产资料配置，推进循环农业发展和农业生态化经营，降低内部耦合食物系统生产过程的环境影响。

首先，推动要素投入减量化，从源头控制排放强度。实施有机肥替代化肥，将畜禽粪便等农业废弃物转化为安全有机肥，直接替代部分化学肥料，从源头减少化肥生产及施用过程中产生的一氧化二氮排放；推行测土配方精准施肥，依托土壤养分检测与作物需肥规律，制定差异化施肥方案，实现氮、磷、钾等养分的按需供应，避免过量投入；建立病虫害绿色防控体系，综合运用抗病虫品种、天敌释放、生物农药和物理诱控等技术，显著降低化肥农药使用频次与剂量。通过水肥一体化、保护性耕作等农艺措施，提高水、肥、药等生产要素利用效率，实现单位产出资源消耗强度和排放强度“双下降”。

其次，加强农业废弃物资源化利用，构建循环利用体系。在粮食作物系统中，重点推进秸秆的饲料化与肥料化利用。例如，将玉米、水稻等秸秆加工为高蛋白饲料，替代粮食基饲料；同时，将秸秆直接还田或堆肥后作为有机肥使用，改善土壤固碳能力。在畜禽养殖系统中，实现粪便能源化与肥料化。通过推广规模化沼气工程，对畜禽粪便进行厌氧发酵，生产沼气与生物天然气，为养殖场提供清洁能源，替代化石燃料；发酵后的沼渣则可加工为优质有机肥，反哺周边蔬菜、水果等经济作物生产，替代部分化肥。在设施农业及食品加工系统中，着力于副产物的材料化与饲料化。例如，利用甘蔗渣、稻壳等富含纤维的废弃物制备可降解包装容器或栽培基质；将蔬菜尾菜、果品残次品等加工为青贮饲料，实现园区内物质循环利用。

最后，推广高效节能农机，提高农业生产能源利用效率。通过“技术革新+管理优化+能源替代+政策驱动”的组合策略，可显著降低农机作业能耗与碳排放。例如，可通过电动农机替代燃油农机，减少柴油消耗，直接降低碳排放；通过使用无人机、自动驾驶农机等智能化设备实现少耕、精播；政府通过建立区域农机共享平台实现科学调度，提高闲置农机利用率，避免重复购置。

（二）基于流通端的食物系统低碳转型实现路径

在周边耦合系统中，流通环节作为连接城市与相邻区域的核心纽带，其低碳化转型对降低区域食物系统碳足迹具有关键意义。该系统的碳排放主要源于运输过程中的车辆能耗和冷链运输制冷剂泄漏，仓储环节中冷库的能耗，包装过程中包装材料的生产等。而区域间信息不对称导致的迂回运输、返程空载及库存冗余则进一步放大碳足迹。针对周边耦合空间关系特征，需构建以区域协同为核心的流通端减排路径。

运输环节，推广绿色冷链技术，通过优化制冷系统与使用环保制冷剂，直接降低肉类、乳制品及高档果蔬在冷链运输中的能耗与制冷剂泄漏排放；针对谷物、豆类等大宗耐储运品类运输总量大的特点，应大力发展散粮铁路专线运输，提升铁路运输比例；针对信息不对称问题，应通过建设区域性农产品物流枢纽，优化运输网络拓扑，减少不必要的中转与长途迂回。同时，构建共享物流网络，整合不同品类、不同方向的货运需求，有效匹配返程运力，重点解决蔬菜、水果等高频次、轻量化品类的返程空载问题，全面提升物流效率。

仓储环节，配套应用产地预冷技术，从源头延长水果、蔬菜等易腐品的保鲜期，降低后续仓储与运输过程中的损耗率。在主要粮仓推广智能化粮情监测系统，精准调控仓储环境，降低通风、除湿等能源消耗；借助区块链溯源技术实现从产地到销地的全链条信息透明化，精准对接供需，避免因信息扭曲导致的库存积压与无效调运，该技术对牛羊肉等高价值产品库存管理效益显著。

包装环节，大力推广生物基包装材料，逐步替代传统塑料包装。如对于水果、蔬菜及初级加工食品，可优先采用以竹纤维、蘑菇菌丝体及海藻薄膜等为原料的天然可降解包装。针对肉类、乳制品等高价值温控品类，则需着力开发功能性生物基包装，如富含天然抗菌剂的聚乳酸(PLA)保鲜膜、具备三重响应释放机制的可降解活性包装等，其在维持产品品质、延长货架期的同时，能显著降低包装全生命周期的碳足迹。此外，可食用膜在方便食品内包装中的应用，以及智能指示标签在实时监控产品新鲜度方面的作用，进一步拓展了低碳包装的边界。

(三) 基于消费端的食物系统低碳转型实现路径

在远程耦合系统中，城市间的食物供应链呈现出典型的“责任分离—隐含碳转移”特征，其碳排放主要源于消费端对远端高碳产品的需求拉动。这一机制使得消费城市得以通过商品流通将生产端的碳排放“外包”给上游区域，导致碳责任在地理空间上出现错配。因此，需从消费端调整消费结构，转变消费行为，削弱对远端高碳生产模式的驱动，实现食物系统环境责任的再平衡。

1. 基于可持续食物可得性提升的食物系统低碳转型路径

食物的可得性用于描述人们对食物的获取、使用和消费的能力。主要包括食物的经济可得性和地理可得性两方面。经济可得性指食物的可负担性，即消费者购买食物的经济能力。中国居民膳食指南的制定正从注重温饱向注重营养均衡转变，这符合中国居民膳食结构多样化的趋势。然而，与EAT-Lancet膳食相比，中国居民膳食指南的肉类推荐摄入量更高，不仅可能加剧环境压力，也提高了膳食的经济成本，使其在环境可持续性与居民负担能力两方面均面临挑战。实现更加营养与更多样化食物结构的前提，是能够有效应对食物负担能力方面的限制。因此，制定膳食指南必须考虑食物价格和健康饮食的最低成本。应在指南中明确列出价格适中、营养丰富的食物组合，帮助低收入居民在有限的预算内实现营养平衡。此外，应针对不同地区、不同经济水平的居民制定地区膳食指南。要结合当地的食物价格、饮食习惯和营养需求，使指南更有针对性和实用性。地理可得性是食物可及性。可及性是一个多维度的概念，涵盖人口需求、目的地吸引力、消费者偏好、出行距离或成本，以及这些因素之间的空间交互作用等多个方面。个人饮食选择和饮食习惯深受周围食物来源的显著影响。一个更健康的餐饮环境，如更方便地获取水果和蔬菜，有助于提升城市居民的健康状况。然而，食物供应在数量与类型上的空间分布并不均衡。不同社区与健康食物店铺之间的距离差异，导致购买健康食物的出行距离各不相同，进而影响与之相关的交通碳排放。因此，提高居民获取健康食物的便利性，不仅有助于提升其健康与福祉，也具有积极的环境效益。政府有必要通过规划引导居民调整出行模式，将健康食物店铺优先布局于公共交通站点周边以缩短出行距离，或者配备充足的自行车停车设施、推广共享经济模式与集中配送体系以降低物流成本与相关碳排放。

2. 基于膳食结构调整的食物系统低碳转型路径

膳食指南是各国家和地区为向民众提供营养建议而采用的重要政策工具。合理的膳食指南不仅能引导居民实现均衡饮食，更对达成营养、健康与低碳排放等多重目标具有战略意义。通过引导城乡居民构建低碳、健康的饮食结构，不仅能够培育理性的食物消费行为，更能通过市场信号对供给端产生正向激励，从而加速整个食物系统的低碳转型。因此，将现有膳食结构转向可持续的健康模式，是协同推动居民营养改善与食物系统低碳转型的有效杠杆。然而，传统膳食指南多聚焦于营养建议，未能充分整合环境可持续性与社会经济可行性，导致其在实践中推广效果受限。理想的膳食指南所推荐的食物，除需具备经济性、吸引力与营养价值外，还应将环境影响作为核心考量，清晰揭示营养需求与可持续农业之间的内在关联。为此，膳食指南的制定应在保障食物可及性的基础上，系统纳入环境影响指标，实现从“吃什么”到“为什么这样吃更环保、更经济”的升级。具体而言，可从以下四个方面推进：首先，推动指南落地化与可视化。推出基于指南的“每周可持续膳食食谱”，并清晰标注每餐的人均碳排放量与预估成本，使低碳健康饮食变得可衡量、可感知。其次，增强指南的精准性与包容性。针对不同收入群体和地区，实施分级推荐策略。设立“核心推荐”，确保在最低成本下满足基本营养需求；提供“优化推荐”，在经济允许范围内，引导消费者选择环境效益更优的食物来源。再次，开展多渠道宣传与教育。通过线上线下多种平台普及可持续饮食理念，并在社区广泛开展“区内居家”等教育活动，对指南的核心信息与知识要点进行深入解读与技能培训。最后，建立试点示范区并评估效果。遴选部分地区作为试点，全面推行新一代膳食指南及配套措施。定期追踪示范区的食物消费、居民健康及相关环境排放数据，为后续的大规模推广积累实证经验。

3. 基于食物消费者行为转变的食物系统低碳转型路径

转变消费行为对食物系统低碳转型具有显著推动作用，具体体现在以下方面：首先，消费者主动选择购买低碳食物时，这些食物通常采用天然有机材料，避免使用化学添加剂和人工合成色素等物质，从而在源头上减少了碳排放。此外，消费者减少一次性用品(如餐具、塑料袋)的使用频率，也有助于控制垃圾产生及相关碳排放。其次，消费者行为向低碳转变会推动食物生产商采取更加环保的生产方式。为满足消费者对低碳食物的需求，生产商需要改进生产工艺，减少能源消耗和废弃物排放。消费者的绿色偏好还会鼓励生产商采用“可持续包装”和“绿色包装”，以减少包装废弃物对环境的污染。再次，提高消费者环保意识。当公众意识到个人消费与碳排放之间的关联时，更有可能采取积极减排行动，如优先选择公共交通、减少私家车使用等。最后，推动政策制定。消费者行为的转变还会影响政府的政策制定。随着越来越多的人关注环保问题，政府可能会出台更加严格的环保法规和标准，以推动整个社会的低碳转型。基于此，推动消费者行为转变具体措施如下。

首先，政府应制定并不断完善低碳消费的指导方针和规范，通过立法和政策引导，推广低碳生活方式，提高公众对低碳食物的认同感和责任感。利用官方媒体和社交平台，普及低碳农产品消费的概念，提高公众对高排放农产品对环境影响的认识，增强环保意识。借助互联网平台，通过图文、视频等形式，直观展示碳排放的危害和低碳生活的好处，激发公众参与碳减排的内在动力。其次，考虑将低碳标准纳入现有认证体系，如绿色食品认证，推动低碳产品的发展和市场认可。鼓励餐饮业采用低碳食材，为优先执行低碳环保要求的餐饮企业提供税收减免或其他激励措施。农业企业应开发多样化的碳标签食物，满足不同消费者需求，并建立统一的技术标准和认证体系，提高产品的市场竞争力。再次，通过营销活动和公关策略，塑造绿色品牌形象，增强消费者对碳标签食物的认知和信任。采用多渠道营销策略，包括线上电商平台和线下超市，扩大碳标签食物的市场覆盖，提高消费者的购买便利性。最后，通过产品标签、包装说明等方式，向消费者传递碳标签食物的环保价值和健康益处，引导消费者形成绿色消费习惯。

五、结论与政策建议

（一）结论

食物系统低碳转型是践行“大食物观”、保障国家食物安全与实现“双碳”目标的重要路径，也是应对气候变化和环境问题的迫切需求。基于全程耦合视角，本文系统梳理了城市食物系统在内部耦合、周边耦合与远程耦合三种空间关联模式下的碳排放生成机制与低碳转型逻辑。研究表明，不同耦合模式下食物系统碳排放的主导环节与关键驱动因素存在显著差异：在内部耦合系统中，城市消费需求通过要素流与信息流直接塑造近郊农业生产方式，碳排放高度集中于生产端，其减排关键在于生产要素绿色化、投入减量化与种养循环体系构建；在周边耦合系统中，区域分工与农产品贸易强化了对高能耗物流与冷链体系的依赖，流通环节成为碳排放的主要来源，提升区域物流协同水平与能源效率是实现低碳转型的核心路径；在远程耦合系统中，城市对远距离农产品的消费通过贸易机制引发隐含碳转移，形成消费责任与生产排放的空间分离，消费端结构性需求成为驱动高碳排放的重要根源。因此，生产要素绿色化、流通环节能源效率提升与膳食结构调整并非在不同耦合模式下均等发挥作用，而是呈现出明显的情景依赖性与路径侧重性，城市食物系统低碳转型不能采取“一刀切”的治理策略。

（二）政策建议

构建可持续食物系统低碳转型路径需针对不同空间耦合系统，统筹生产、流通与消费全链条，设计差异化路径，形成精准化、协同化的治理体系。

首先，在内部耦合系统中，应以县域为基本单元构建城乡协同的绿色生产闭环，重点推动种养结构调整与城乡资源互补，降低农业生产对化肥、农药和化石能源的依赖。具体而言，可依托近郊农业集中区，配套建设畜禽粪污处理站、有机肥加工中心和秸秆综合利用设施，引导农户、家庭农场与农业企业形成“种植—养殖—废弃物—能源”的区域循环体系，从源头降低生产端碳排放强度，推动近郊农业向生态化转型，实现城乡资源的优化配置与高效循环。

其次，在周边耦合系统中，重点建设区域一体化的绿色流通网络，建立跨城市物流协同机制，通过统一冷链技术标准、包装规范和运输组织方式，降低重复运输和无效冷链带来的排放损失。在城际交界处布局现代化物流枢纽，发展“干线运输+城市共同配送”的集约化运输体系，同时，针对畜禽产品与易腐农产品，应优先引导其在更短空间尺度内实现供给，降低长距离冷链运输所放大的碳排放风险。此外，推动建立区域农产品碳足迹数据库，实现相邻城市间碳足迹互认与追溯，为流通端精准减排提供数据支撑。

再次，在远程耦合系统中，建立消费端责任引导机制。联合卫生健康、教育等部门制定差异化膳食指南，引导居民减少高排放食物的过度消费，提升植物性食物和低排放蛋白的消费比例，建立覆盖主要农产品的碳标签制度，将生产与流通阶段的碳足迹信息传递至消费端，增强消费者对食物隐含排放的认知，引导低碳消费。此外，建立跨区域生态补偿机制，将消费城市的部分减排责任以资金、技术或政策支持形式反馈至主产区，促进区域间低碳转型的协同推进。

最后，构建跨系统、多主体的协同治理体系。内部、周边与远程三大耦合系统，并非彼此孤立，而是共同构成了一个层级清晰、功能互补的现代食物系统网络。它们之间存在着深刻的“空间分工—功能互补—责任联动”逻辑。因此，政府应主导建立“农业—交通—环境”多部门协同平台，构建基于人才流、信息流、资金流的大数据平台，建立“区域生态补偿与碳核算”联盟。农业经营主体需要联合消费者共同构建食物全生命周期碳足迹评价体系，全过程制定减量增效、高效流通和节约减损策略。消费者则通过碳账户等激励机制参与低碳饮食转型，打通促进低碳转型的“最后一公里”，助力食物系统实现绿色低碳的转型目标。

参考文献

[1] 樊胜根, 张玉梅. 中国农业食物系统低碳转型战略思考[J]. 农业经济问题, 2024(12): 15-23.

[2] 马恩朴, 叶玮怡, 廖柳文, 等. 城市食物系统演化的人地耦合启示及驱动力——以北京食物系统为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(10): 2617-2635.

[3] 马恩朴, 蔡建明, 韩燕, 等. 人地系统远程耦合的研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 310-326.

[4] 周应恒, 王善高, 严斌剑. 中国食物系统的结构、演化与展望[J]. 农业经济问题, 2022, 505(1): 100-113.

[5] 陈忠明, 郭庆海, 姜会明. 居民食物消费升级与中国农业转型[J]. 现代经济探讨, 2018(12): 120-126.

[6] 李劼, 徐晋涛. 我国农业低碳技术的减排潜力分析[J]. 农业经济问题, 2022(3): 117-135.

[7] 樊胜根, 张玉梅, 陈志钢, 等. 逆全球化和全球粮食安全思考[J]. 农业经济问题, 2019(3): 4-10.

[8] 黄秋怡, 郑小平, 王瑞梅. 可持续食物系统实现路径与演化博弈研究[J]. 农业展望, 2022, 18(5): 54-62.

[9] 汪笑溪, 蔡浩, 宣佳琦, 等. 多目标协同的中国农业食物系统减排与可持续转型[J]. 浙江大学学报(人文社会科学版), 2025, 55(3): 27-42.

[10] 黄晓慧, 聂凤英. 数字化驱动农户农业绿色低碳转型的机制研究[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2023, 23(1): 30-37.

[11] 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.

[12] 朱文博, 李国景, 陈永福, 等. 收入增长、饮食结构转变与食物系统碳排放——来自中国6省住户调查数据的证据[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(7): 66-81.

[13] 黄俊勇, 刘世锦. 碳标签推广应用的国际经验与中国策略[J]. 改革, 2023(2): 62-74.

[14] 马晓琴, 张永生. 中国食物消费可持续转型的方向与潜力——分析框架及其测度[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(12): 116-131.

[15] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径[J]. 地理学报, 2016, 71(4): 531-550.

[16] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 1-19.

[17] 孙才志, 胡淼, 郑靖伟. 全程耦合框架下中国虚拟水贸易[J]. 地理学报, 2025, 80(1): 81-100.

[18] 冯德东, 龙花楼, 张聪, 等. 远程耦合视角下拓展脱贫攻坚成果同乡村振兴有效衔接的逻辑机理与关键维度[J]. 经济地理, 2025, 45(1): 153-165.

[19] Chen X, Cui Z, Fan M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.

[20] Fang B, Tan Y, Li C, et al. Energy sustainability under the framework of telecoupling[J]. Energy, 2016, 106: 253-259.

[21] Herrero M, Thornton P K, Mason-D′Croz D, et al. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system[J]. Nature Food, 2020, 1(5): 266-272.

[22] Huan H, Wang L, Zhang Y. Regional differences, convergence characteristics, and carbon peaking prediction of agricultural carbon emissions in China[J]. Environmental Pollution, 2025, 366: 125477.

[23] Li J, Huang K, Yu Y, et al. Telecoupling China's city-level water withdrawal with distant consumption[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(10): 4332-4341.

[24] Li M, Jia N, Lenzen M, et al. Global food-miles account for nearly 20% of total food-systems emissions[J]. Nature Food, 2022, 3(6): 445-453.

[25] Lin X, Qian J, Chen J, et al. Potential decarbonization for balancing local and non-local perishable food supply in megacities[J]. Resources, Environment and Sustainability, 2025, 20: 100206.

[26] Liu G, Zhang F, Deng X. Half of the greenhouse gas emissions from China's food system occur during food production[J]. Communications Earth & Environment, 2023, 4(1): 161.

[27] Liu J. Integration across a metacoupled world[J]. Ecology and Society, 2017, 22(4): 29.

[28] Liu M, Xiong Y, Zhang A. Multi-scale telecoupling effects of land use change on ecosystem services in urban agglomerations—A case study

in the middle reaches of Yangtze River urban agglomerations[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415(Aug. 20): 137871-137878.

[29] Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. Science, 2018, 360(6392): 987-992.

[30] Trelogan H C, Davis J H, Goldberg R A. A concept of agribusiness[J]. Journal of Marketing, 1957, 22(2): 221-222.

[31] Yang X, Gao Q, Duan H B, et al. GHG mitigation strategies on China's diverse dish consumption are key to meet the Paris Agreement targets[J]. Nature Food, 2024, 5(5): 365-377.

[32] Zheng L, Adalibieke W, Zhou F, et al. Indirect emissions contribute a quarter of air pollution-related health burden of food systems in China[J]. Nature Food, 2025, 6(8): 766-776.

（责任编辑：肖舒苑）

Low-carbon Transformation of Food Systems within a Metacoupling Framework: Research Progress and Theoretical Model

WANG Ya'nan, LI Meng, LI Rui

(College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The food system is a crucial nexus linking nutritional health and sustainable development, and serves as an important lever for achieving China's dual carbon goals. However, current research lacks a clear theoretical basis for integrating the low-carbon transition of food systems into the metacoupling framework. Moreover, how to design differentiated low-carbon regulation pathways across production, distribution, and consumption stages under varying coupling patterns remains underexplored. In response, this study constructs a theoretical framework for the low-carbon transition of urban food systems from the perspective of metacoupling. Specifically, it proposes targeted strategies for each stage: at the production end, upgrading technological and improving resource-use efficiency; at the distribution end, shortening supply chains, minimizing intermediary losses, and lowering circulation costs; and at the consumption end, enhancing food availability, adjusting dietary structures, and shifting consumer behavior to promote dietary diversity, which in turn compels producers toward low-carbon practices. Specifically, intracoupling systems require establishing county-level, urban-rural green production loops via regional crop-livestock-waste-energy cycling systems. Pericoupling systems necessitate developing regionally integrated green circulation networks with standardized logistics protocols. Telecoupling systems demand coordinated implementation of differentiated dietary guidelines, food carbon labeling schemes, and cross-regional ecological compensation mechanisms to address transboundary environmental impacts.

Key words: metacoupling; food system; low-carbon transition