



耕地利用转型对农业减污降碳协同的影响机制

崔家兴^{1,2,3}, 孙华清¹, 彭雅雯¹, 卢雨昂¹, 蒋子龙^{1,2,3}

1. 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

3. 湖北省发展和改革委员会/华中师范大学 武汉城市圈研究院, 湖北 武汉 430079

摘要 耕地利用转型不仅能够提高土地资源利用效率,而且在推动农业减污降碳协同、促进绿色发展与生态文明建设中具有关键作用。以2000—2023年中国31个省/直辖市(不含港澳台)为研究对象,在构建耕地利用转型指标体系及农业减污降碳协同水平指数(APCR)模型的基础上,探讨了二者的空间分布特征,并通过实证方法检验了耕地利用转型的减污降碳协同效应。研究表明:①从空间格局看,耕地利用转型呈现东中西梯度推进特征,农业减污降碳协同水平呈现出由“差异分明”格局向趋于均衡演化;②耕地利用转型显著促进了农业减污降碳协同,一系列稳健性检验和工具变量估计均佐证研究结果的稳健性;③机制检验表明,耕地利用转型通过农业绿色技术创新和人力资本水平等机制促进农业减污降碳协同;④环境治理强度与政府财政支持在耕地利用转型促进农业减污降碳协同过程中发挥正向调节作用;⑤异质性分析表明,第一、第三阶梯显著,第二阶梯不显著,胡焕庸线以东强于以西,黄河流域显著,长江流域不显著。需要在保证粮食安全的基础上,因地制宜地推动耕地利用转型,促进农业减污降碳协同增效。

关键词 耕地利用转型;农业减污降碳协同;中介效应;调节效应;中国

中图分类号: F323; X22 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-04-015

The impact mechanism of cultivated land use transformation on the synergy of agricultural pollution reduction and carbon abatement

Cui Jiaking^{1,2,3}, Sun Huaqing¹, Peng Yawen¹, Lu Yuang¹, Jiang Zilong^{1,2,3}

1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation of Hubei Province,
Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

3. Academy of Wuhan Metropolitan Area, Hubei Development and Reform Commission & Central
China Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract Cultivated land use transformation not only enhances the efficiency of land resource utilization but also serves as a critical driver of agricultural pollution reduction and carbon abatement, thereby supporting green development and ecological civilization construction. Drawing on panel data for 31 provinces in China

收稿日期: 2025-10-25 修回日期: 2025-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(41901201); 教育部人文社会科学研究项目(24YJC630028); 中央高校基本科研业务费专项资金(XJ2025001801)。

第一作者: 崔家兴, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事乡村地理与土地利用研究, cuijiaking@ccnu.edu.cn。

通信作者: 蒋子龙, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事经济地理与区域可持续发展研究, jiangzilong1986@163.com。

(excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan) from 2000 to 2023, this study constructs an integrated index system for cultivated land use transformation and an Agricultural Pollution and Carbon Reduction Synergy Index (APCR), identifies their spatial patterns, and empirically assesses the synergistic effects of cultivated land use transformation on pollution reduction and carbon abatement. The research has 5 results. ① Spatially, cultivated land use transformation exhibits a pronounced east-central-west gradient, while APCR levels have shifted from marked regional disparities toward a progressively more balanced pattern. ② Cultivated land use transformation exerts a significant positive effect on agricultural pollution-carbon reduction synergy, which is consistently supported by robustness tests and instrumental variable estimations. ③ Mechanism analysis reveals that cultivated land use transformation promotes APCR primarily through agricultural green technological innovation and enhancements in human capital. ④ Environmental governance intensity and government fiscal support strengthen the synergistic effect of cultivated land use transformation on agricultural pollution reduction and carbon abatement. ⑤ Heterogeneity analysis indicates that the effects are significant in the first and third topographic step but not in the second; stronger east of the Hu Huanyong Line than west; and significant in the Yellow River Basin but insignificant in the Yangtze River Basin. Overall, advancing cultivated land use transformation in a region-specific and security-oriented manner is essential for effectively coordinating the relationship between land use restructuring and agricultural pollution-carbon reduction synergy.

Keywords cultivated land use transformation; agricultural pollution reduction and carbon abatement synergy; mediation effect; moderation effect; China

土地是农业生产与社会经济活动的空间载体,耕地利用则是人地关系最直接的体现^[1]。当前,随着城乡要素快速流动与乡村产业转型,单一增产导向的传统耕地利用方式已难以兼顾耕地供给趋紧与农产品需求增长^[2]。长期以来,为提高作物生产效率与产量而依赖高强度化学品投入,使灌溉水体中的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)、氨氮等指标超标,诱发土壤环境质量恶化^[3],土壤中汞、铬、镉等重金属超标,所产生的“三致效应”(致畸、致癌、致突变)导致部分农村地区相关疾病风险上升^[4]。近年来,在面临城镇空间扩展、产业结构升级与粮食保质增产等多重压力下,为解决当下农业生产和耕地高效利用等问题,耕地利用加速转型:地块规模化、经营集约化以及精准施肥、绿色防控、节水灌溉等为代表的农业技术迅速涌现^[5]。

2022年党的二十大报告明确提出“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”的战略要求^[6],不仅进一步明确了国家环境治理与“双碳”目标的战略决心,也凸显了农业减污降碳协同治理的紧迫性与关键地位,亟须将耕地利用转型作为核心抓手,在农业非点源污染负荷削减与碳排放强度降低之间实现路径整合与政策协同^[7]。在粮食安全与生态文明建设双重目标的驱动下,耕地利用转型正

面临复杂的挑战。一方面,传统粗放型农业依赖化肥、农药和农膜等高强度投入,不仅造成面源污染扩散,还加剧了土壤退化与水体污染,使农村生态环境承受较大压力;另一方面,若缺乏能效提升与能源结构优化,能源消耗与秸秆不当处置将推高排放^[8]。在此背景下,耕地利用转型通过结构与方式的优化,有助于缓解传统粗放投入所带来的环境压力,并推动农业生产向绿色、低碳与可持续发展方向。

现有文献针对耕地利用转型与农业减污降碳协同两个领域均有较多研究。其中,在耕地利用转型方面,国内外学者主要从农地撂荒的驱动机制^[9]、中国耕地利用转型的阶段划分^[10]、区域尺度的时空差异、人均耕地视角下的演变特征^[10],以及耕地利用转型与乡村转型关系、转型理论等角度展开讨论^[1,11-12]。在农业减污降碳方面,相关研究则强调绿色生产技术对碳排放强度的调节作用^[13],探讨减污与降碳之间的耦合与脱钩现象^[14],分析工业化进程、绿色技术创新对农业生态环境的影响机制^[15-16],宏观讨论农业减污降碳协同的协同机制^[17-18],并关注粮食主产区政策^[7]、建设用地集聚^[19]、数字经济与产业转型^[20-21]等多重因素在推动农业减污降碳协同效应中的作用。

总体来看,现有文献多以单一视角切入,对耕

地利用转型和农业减污降碳协同两者之间的关联分析与互动研究较为薄弱,缺乏系统地剖析耕地利用转型对农业减污降碳协同的影响作用。因此,本文以全国31个省/直辖市(不含港澳台)为研究对象,尝试从农业绿色技术创新和人力资本水平等角度切入,分析耕地利用转型对农业减污降碳协同的潜在的中介路径,讨论环境治理强度与政府财政支持作为调节因素在此过程中发挥的调节作用。并进一步以中国一、二、三阶梯分界线、胡焕庸线、长江、黄河流域等地理分界线进行空间异质性分析。研究成果能够为中国农业低碳发展及实现“碳达峰”“碳中和”提供经验借鉴。

1 理论分析与研究假设

1.1 理论分析

在“双碳”目标与粮食安全双重约束下,中国农业发展正承受着效率提升与环境治理的双重压力^[22]。耕地作为最核心的生产要素,其利用方式、空间结构乃至功能定位的变动,不仅直接关系粮食安全的稳定供给,也在较大程度上塑造了农业污染物与碳排放的空间格局与强度水平^[23]。

耕地利用转型并非单纯的土地再配置,而是一种内含要素重构、结构优化与功能转变的系统演进过程。其核心在于农业生产方式由“资源消耗型”向“效率导向型”与“可持续导向型”转变。耕地利用方式的变革重塑了农业空间的组织逻辑,使土地利用从数量扩张迈向质量提升,资源配置的优化带动了投入结构、能源使用与生态绩效的协同改善。换言之,耕地利用过程的演化不仅推动了农业生产方式的集约化与清洁化,而且通过土地配置、种植结构与投入方式的系统重构,促进了能量循环与生态功能的深度融合。耕地利用转型过程中,耕地经营规模的扩大、空间布局的优化以及投入结构的调整,推动了土地、劳动力与资本等要素的重新组合。耕地规模化与集约化转型,促进机械化与标准化管理水平提升,减少单位面积资源浪费,水肥投入更趋精准。耕地用途由粗放型扩张向集约化利用转变,化肥与农药施用强度显著下降,秸秆还田、有机肥替代和水肥一体化等循环性措施逐步普及,农业系统的物质与能量流动由单向消耗转为闭环再生^[24]。同时,生态功能区划与高标准农田建设强化了耕地的生态承载功能,使农业生产在保持产能的同时具备一定

的环境自我修复能力。这种由结构优化与技术渗透共同驱动的过程,实质上实现了生产系统与生态系统的协同耦合,在“资源节约-排放减量-效率提升”的作用链条中,生产效率与环境改善相互促进,形成投入、环境与产出之间的正向反馈机制,为农业减污降碳协同提供了稳定而持续的结构支撑。

这种协同效应的形成有赖于具体的作用通道,随着绿色技术研发能力提升,清洁生产工具、节能型投入品与精准化管理手段持续渗透于农业体系,为农业绿色生产提供了更先进的技术支持与更稳定的制度保障。绿色生产技术(如测土配方施肥、节水灌溉、秸秆还田、绿色防控与清洁能源替代)的推广进一步降低化学投入与能源消耗,同时改善土壤质量与生态承载力。人力资本水平的提升强化了技术吸收、制度执行与绿色生产实践,使耕地利用转型更容易转化为效率提升与环境改善的协同效应。同时,环境治理强度与政府财政支持为耕地利用转型释放环境效益提供了必要的生态支撑与资金保证。一方面,较高的治理投入改善了农业生产所依赖的生态条件,减少外部环境对耕地利用调整的干扰,使绿色生产方式更易稳定实施,从而强化耕地利用结构优化所带来的减污降碳效应;另一方面,政府财政支持的增强改善了农业生产所依赖的资源条件,提高了农业主体采纳清洁生产措施和绿色投入的能力,使耕地利用转型在节能、减排和提升资源利用效率方面的作用更加突出。同时,长期的环境治理与政府财政支持促进了价值体系的演变,使绿色生产由外在约束转向内生动力,碳交易、生态补偿与绿色信贷等制度创新通过调整收益形成机制,将环境绩效纳入农业经济收益体系。碳交易机制赋予减排行为以市场化价值,使节能减排不再只是成本控制而成为可变现的资产收益。生态补偿政策通过政府支付与生态绩效挂钩,使生态保护行为获得持续的经济回报。绿色信贷在融资环节降低了绿色投资的资金门槛,使农户在生产决策中更倾向于采用清洁技术和低碳耕作方式。上述制度重塑了传统农业“高投入-高排放”的收益逻辑,使农业减污降碳从被动遵循转变为理性选择,推动农业系统在经济收益与生态约束之间实现新的动态均衡。

综上,如图1所示,耕地利用转型通过结构调整与要素再配置直接促进农业减污降碳协同,并

在农业绿色技术创新与人力资本提升等机制中产生持续的间接推动。在此基础上,环境治理强度与政府财政支持等外部条件对作用链条形成重要

的调节与塑造,使整体过程呈现出从短期效应向长期均衡演进的动态特征。

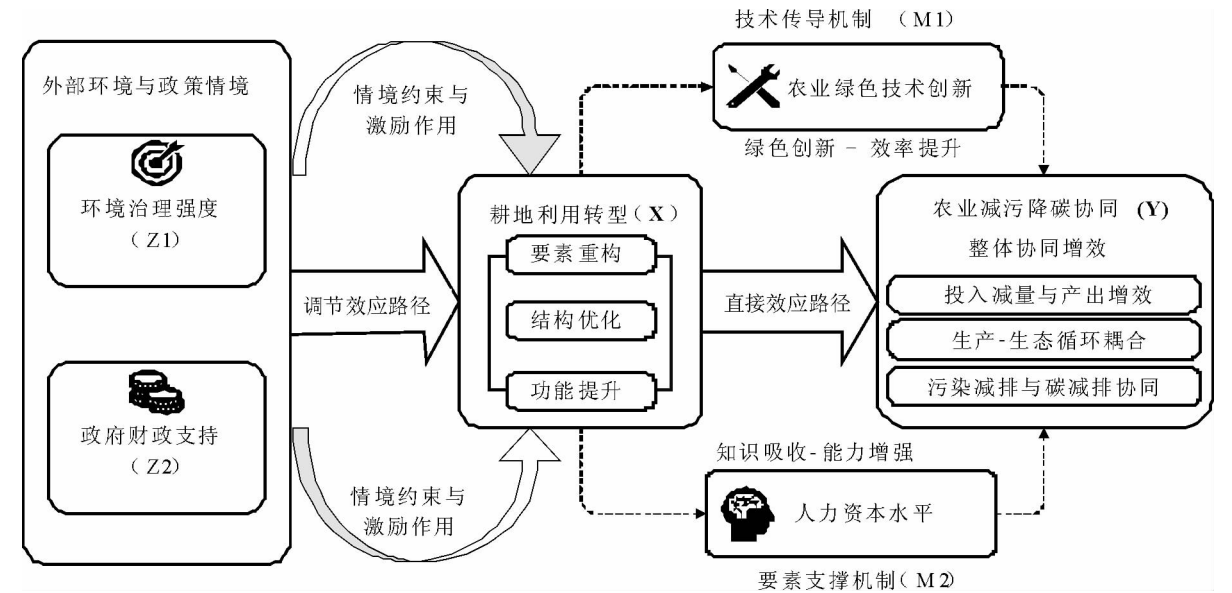


图 1 耕地利用转型对农业减污降碳协同影响机制理论示意图

Fig. 1 Theoretical framework of the impact of cultivated land use transformation on agricultural pollution reduction and carbon abatement synergy

1.2 研究假设

1.2.1 耕地利用转型对农业减污降碳协同的直接影响

农业绿色发展强调在保障粮食安全的同时实现减污与降碳的协同效应,而耕地利用转型是推动这一过程的核心环节。在粗放式扩张时期,传统农业依赖高投入、高消耗的生产模式,导致面源污染和温室气体排放持续攀升,加重生态压力并削弱农业可持续性。耕地利用方式的调整本质上是对农业发展路径的重构,通过优化耕地数量、投入方式和利用结构,使农业系统由依赖资源消耗转向强调效率与环境友好并重^[25]。随着土地利用从传统单一、粗放模式向集约化、绿色化转变,资源配置效率得以提升,绿色技术得以更有效应用,生产过程中的污染强度和碳排放水平随之下降。同时,土地生态功能的强化也促进了生产与环境之间的协调关系,为农业减污降碳协同奠定了更加稳固的制度与实践基础。根据以上分析,提出假设 H₁:耕地利用转型能够显著提升农业减污降碳协同水平。

1.2.2 耕地利用转型对农业减污降碳协同的间接影响

1) 农业绿色技术创新:耕地利用转型在绿色化生产要求下强化了农业主体的制度约束与技术

升级需求,从而加速绿色技术创新的生成与扩散,并为农业绿色化转型提供持续而关键的技术支撑。一方面,绿色技术进步有助于优化农业生产方式,使得节能型农机装备、精准施肥与绿色防控等先进技术更容易在农业体系中得到推广,从而显著提高资源利用效率并减少高污染投入品的使用。另一方面,绿色创新能力的提升通常伴随更高水平的技术供给和制度保障,使污染治理技术、清洁生产制度和生态友好型投入机制能够更有效地嵌入农业生产过程^[26]。

2) 人力资本水平:耕地利用转型通过推动农业生产向集约化、专业化与现代化方向重构,使劳动力在技能结构与生产能力上同步升级,并由此提升农业人力资本水平,成为农业生产方式升级与绿色转型的核心动力。受教育程度更高、技能储备更强的农业劳动力,对新技术、新制度与绿色生产方式具有更高的接受度和应用能力,更能在耕地利用方式变化中实现生产组织方式、投入结构与经营行为的同步调整。高素质劳动力在信息获取、技术学习与管理决策方面的优势,使其更容易将土地集约化利用、节本增效技术和绿色生产规范落实到具体实践中,从而强化耕地利用转型的绿色效益^[27]。根据上述分析,提出假设 H₂:耕地利用转型通过农业绿色技术创新和人力资本水

平等机制通道促进农业减污降碳协同。

1.2.3 环境治理强度与政府财政支持对农业减污降碳协同的调节作用

1) 环境治理强度: 环境治理强度的增加促进了农村污水处理、垃圾收运、面源污染防治等基础设施的持续完善, 使农业生产活动在更整洁、更具约束力的生态环境中展开, 进而推动绿色生产方式在农业领域的加速扩散。生态治理基础的增强不仅降低了传统粗放投入带来的环境压力, 也改善了农业生产对清洁技术的吸收条件, 使耕地利用结构优化更易转化为稳定的污染削减与碳排放降低效果^[28]。同时, 更高水平的环境治理强度通过强化外部约束机制, 提高了污染成本与违规风险, 从制度层面巩固了耕地利用结构优化向减污降碳效益转化的稳定性。

2) 政府财政支持: 政府财政支持的增强意味着农业绿色发展在资金投入和政策供给方面获得了更强的保障, 有助于缓解农业主体在绿色生产中的成本压力。较高的财政支农力度能够推动绿色农机具更新、清洁投入品使用和生态保护实践的落地, 提升农业经营者采用绿色技术和清洁措施的意愿, 使耕地利用结构优化更容易转化为实际的污染物削减与碳排放降低效益^[7]。政府财政支持的制度供给还通过降低绿色生产投资的不确定性, 增强耕地利用结构调整向减污降碳效应转化的激励一致性。根据上述分析, 提出假设 H₃: 耕地利用转型促进农业减污降碳协同过程中环境治理强度和政府财政支持发挥正向调节作用。

1.2.4 耕地利用转型对农业减污降碳协同机制的地区差异性

农业生产具有显著的地域性特征, 不同地区在资源禀赋、技术水平、经济条件以及政策执行力度方面存在差异^[29]。这些差异导致耕地利用转型在不同空间范围内的效果并不一致。在资源条件优越、政策支持力度较大和农业基础较好的地

区, 耕地利用转型往往能够更快地实现绿色生产目标, 显著提升农业减污降碳协同效应; 而在部分资源受限、农业结构单一或政策执行不足的地区, 转型可能面临较大阻力, 其对农业减污降碳协同的作用相对有限。故耕地利用转型对农业减污降碳协同效应不是同质普遍的, 而是与不同地区的自然禀赋和社会经济条件密切相关。根据以上分析, 提出假设 H₄: 耕地利用转型对农业减污降碳协同的影响具有明显空间异质性。

2 数据、变量与模型

2.1 数据来源与处理

研究数据包括社会经济数据和自然条件数据(见表 1), 其中, 社会经济数据指标来源于 EPS 数据库(<https://www.epsnet.com.cn>)、CNRDS(中国研究数据服务平台)、中国统计年鉴(2000—2023 年)、各省/市(自治区)统计年鉴(2000—2023 年)、中国农业统计年鉴(2000—2021 年)、中国城市统计年鉴(2000—2023 年)、中国科技统计年鉴(2000—2023)等。自然条件数据中, NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)。地形起伏度数据基于 2022 年哥白尼 30 m 分辨率 DEM 数据处理得到的平均起伏度栅格数据, 采用国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn>)发布的审图号为 GS(2019)1825 的省级行政区划数据, 对每个省内的栅格值进行了求平均数处理, 得到了全国 31 个省/市/自治区(不含港澳台)省级层面的平均地形起伏度。降水数据来源于国家气象信息中心—中国气象数据网(<https://data.cma.cn>), 在获取原始数据后, 采取和 DEM 同样的处理方式, 计算得到省级层面的 2000—2023 年平均年降水量数据。由于 2000—2023 年间部分年份存在数据缺失, 为保证数据的完整性和科学性, 对缺失值采用线性插值填补。

表 1 变量的描述性统计
Tab. 1 Descriptive statistics of variables

变量类型	变量名称	变量简称	样本量	均值	标准差	最小值	中位数	最大值
被解释变量	农业减污降碳协同	APCR	744	0.72	0.18	0.09	0.76	1.00
解释变量	耕地利用转型	Cultivation	744	0.22	0.10	0.05	0.21	0.55
机制变量	农业绿色技术创新	Inpat	744	3 742.80	7 428.78	0.00	897.50	56 013.00
	人力资本水平	Human	744	0.02	0.01	0.00	0.02	0.04

续表 1								
变量类型	变量名称	变量简称	样本量	均值	标准差	最小值	中位数	最大值
调节变量	环境治理强度	Env	744	1. 17	0. 77	0. 17	0. 99	4. 17
	政府财政支持	Gov	744	0. 09	0. 05	0. 01	0. 09	0. 18
控制变量	降水量	Precipitation	744	884. 41	481. 07	98. 68	802. 32	2141. 81
	地形起伏度	DEM	744	17. 54	9. 41	2. 68	17. 27	33. 12
	城镇化率	Urban	744	0. 53	0. 16	0. 12	0. 53	0. 94
	产业结构	Industry	744	0. 12	0. 06	0. 00	0. 11	0. 38
	农村居民人均可支配收入	Income	744	9 656. 25	7 389. 03	1 330. 00	7 804. 50	42 988. 05
	灾害率	Disaster	744	0. 21	0. 16	0. 00	0. 18	0. 94

注:在计算描述性统计前,对各变量先进行 1% 缩尾处理(全样本逐列)。

2.2 研究模型与变量

2.2.1 耕地利用转型水平测度

耕地利用转型是耕地要素、结构和功能在一段时间内由量变发生质变的过程,本文从要素、结构、功能 3 个维度构建了耕地利用转型评价指标体系(见表 2)。在要素维度,选取人均耕地面积、

农业劳动力、灌溉率代表耕地利用过程中的数量要素和投入要素;在结构维度,分别选取复种指数、粮食作物播种比例表示耕地利用过程中的利用结构和种植结构;在功能维度,选取 NDVI 指数、单位耕地收益、粮食单产分别表示耕地利用的生态功能、经济功能和社会功能。

表 2 耕地利用转型评价指标体系
Tab. 2 Assessment indicator system of cultivated land use transformation

一级维度	二级维度	指标	单位	指标含义	属性	权重
要素	数量要素	人均耕地面积	hm ² /人	耕地面积/农村人口,反映耕地数量变化	+	0. 164 4
	投入要素	农业劳动力	万人	反映农业劳动的劳动力数量和质量	+	0. 165 0
		灌溉率	%	有效灌溉面积/耕地总面积,反映农田水利保障程度	+	0. 080 2
结构	利用结构	复种指数	%	农作物总播种面积/耕地总面积,反映农业利用水平	+	0. 143 4
	种植结构	粮食作物播种比例	%	粮食作物播种面积/农作物播种面积,反映作物结构与生产方向	+	0. 193 1
功能	生态功能	NDVI 指数	无量纲	表征耕地系统中的植被覆盖情况	+	0. 036 5
	经济功能	单位耕地收益	元/hm ²	产值/耕地面积,反映农业经济水平	+	0. 178 6
	社会功能	粮食单产	kg/hm ²	粮食总产量/粮食作物播种面积,反映耕地的基本粮食生产水平	+	0. 038 7

在确定耕地利用转型指标体系后,本文构建综合评价模型以定量测度耕地利用转型水平。原始数据经标准化处理后,利用熵权法确定各指标权重;并据此进行加权求和,得到全国 31 个省/市/自治区(不含港澳台)2000—2023 年的耕地利用转型综合得分。

2.2.2 农业减污降碳协同水平测度

本文参考张德钢、刘耀彬、陆敏等学者关于农业减污降碳协同的水平测度方法进行测量,使用农业碳排放密度与农业面源污染密度的交乘项来反

向表征农业减污降碳协同水平,反映农业系统在污染控制与碳减排方面的协同减量程度^[7,20,30]。农业面源污染密度用单位种植面积的农业面源污染排放量表示,农业碳排放密度采用单位种植面积的农业碳排放量表征。计算公式如下。

$$s_{it} = d_{it}^n \cdot d_{it}^c \tag{1}$$

$$d_{it}^n = \frac{P_{it}}{A_{it}} = \frac{\sum_{k=1}^4 w_k x_{k,it}}{A_{it}} \tag{2}$$

$$d_{it}^c = \frac{C_{it}}{A_{it}} =$$

$$\frac{r_1x_{1,it} + r_2x_{2,it} + r_3x_{3,it} + r_4x_{4,it} + r_5T_{it}}{A_{it}} \quad (3)$$

式中: s_{it} 为农业减污降碳协同水平; d_{it}^n 为农业面源污染密度; d_{it}^c 为农业碳排放密度; P_{it} 为农业面源污染排放测算值; A_{it} 为农作物播种面积; C_{it} 为农业碳排放总量; $x_{1,it}$ 、 $x_{2,it}$ 、 $x_{3,it}$ 、 $x_{4,it}$ 分别为化肥、农药、农膜和农用柴油投入量; T_{it} 为土壤翻耕活动量。 w_k 为农业面源污染测算中第 k 类投入指标的权重, i 为评价单元序号; t 为评价时间年, r_1 至 r_5 分别为化肥、农药、农膜、农用柴油和土壤翻耕活动对应的碳排放因子,取值分别为 0.895 6 kg/kg、4.9341 kg/kg、5.18 kg/kg、0.592 7 kg/kg 和 312.6 kg/hm²。本文采用等权重处理,即 $w_k = 0.25$ 。

2.2.3 机制与调节变量

参考有关研究成果^[7,16],考虑数据的全面性、科学性、代表性,选取以下变量为潜在机制变量:
① 农业绿色技术创新,以农业绿色技术专利申请数和农业绿色实用新型专利申请数总和来衡量;
② 人力资本水平,采用农村受高等教育人员数/农村总人口来衡量。选取以下变量为潜在调节变量:
① 环境治理强度,以环境污染治理投资额占 GDP 比重衡量;
② 政府财政支持,以涉农支出占地方一般公共预算支出(亿元)的比重表示衡量。

2.2.4 控制变量

在参考卢泓钢、马莹莹等学者研究基础上^[17,31],选取以下变量为潜在控制变量:
① 降水量,以各省份平均年降水量表示;
② 地形起伏度,以各省平均地形起伏度表示;
③ 城镇化率,以城镇人口数占地区总人口数的比例表示;
④ 产业结构,以第一产业增加值占地区生产总值的比例衡量;
⑤ 农村居民人均可支配收入,以农村居民年度净收入表示;
⑥ 受灾率,以农业受灾面积/农作物总播种面积的比例衡量。

2.3 基准回归模型

为了识别耕利用转型对农业减污降碳协同的总体影响,本文构建双向固定效应面板回归模型。

$$S_{it} = \beta_0 + \beta_1q_{it} + \beta_2X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: S_{it} 为被解释变量,即农业减污降碳协同水平; q_{it} 为核心解释变量,即耕地利用转型水平; β_0 为常数项; β_1 表示耕地利用转型水平对农业减污降碳协同水平的影响系数; β_2 为控制变量对应的待估系数; X_{it} 为控制变量集合; μ_i 为地方固定效应; λ_t 为年份固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。

2.4 中介效应模型

为揭示耕地利用转型对农业减污降碳协同水平的作用机制,本文将农业绿色技术创新和人力资本水平作为潜在中介变量,进一步构建中介效应模型进行检验。

$$m_{it} = a_0 + a_1q_{it} + a_2X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \eta_{it} \quad (5)$$

$$s_{it} = \theta_0 + \theta_1q_{it} + \theta_2m_{it} + \theta_3X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \eta_{it} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: m_{it} 为中介变量; X_{it} 为控制变量; α_0 和 θ_0 为常数项; α_1 为耕地利用转型对中介变量的影响系数; α_2 为控制变量对中介变量的影响系数; θ_1 和 θ_2 分别为耕地利用转型和中介变量对被解释变量的影响系数; θ_3 为控制变量对被解释变量的影响系数。

2.5 调节效应模型

为考察环境治理强度和政府财政支持在耕地利用转型影响农业减污降碳协同水平过程中的调节作用,本文进一步构建双向固定效应调节模型进行检验。模型设定如下。

$$s_{it} = \phi_0 + \phi_1q_{it} + \phi_2r_{it} + \phi_3(q_{it} \cdot r_{it}) + \phi_4X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \eta_{it} \quad (7)$$

式中: s_{it} 为被解释变量; ϕ_0 为常数项; ϕ_1 为耕地利用转型水平的直接影响系数; ϕ_2 为调节变量的影响系数; ϕ_3 为交互项系数; ϕ_4 为控制变量的估计系数; r_{it} 为调节变量; $q_{it} \times r_{it}$ 为耕地利用转型水平与调节变量的交互项; X_{it} 为控制变量。

3 结果与分析

3.1 特征事实

3.1.1 耕地利用转型空间分布格局

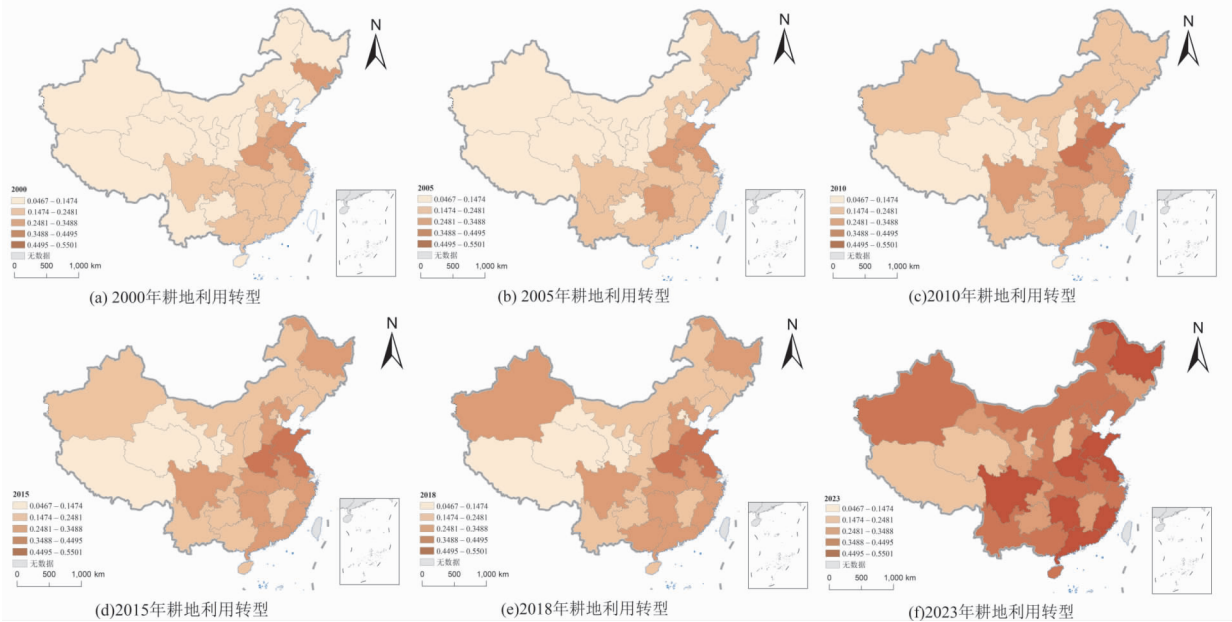
根据图 2 的空间分布结果可知,2000—2023 年间中国耕地利用转型水平整体呈持续上升趋势,区域差异明显减小,表现出由数量扩张向质量提升、由粗放利用向集约高效转型的演进特征。

2000 年前后,全国耕地利用转型水平普遍偏低,高值区主要集中在黄淮海平原与长三角地区〔见图 2(a)、(b)〕。东部地区受产业化程度高、资源利用率高等因素影响,转型水平领先于全国平均水平;而中西部地区因自然禀赋差异与生产条件限制,转型进程相对滞后。2010—2015 年间,全国耕地利用转型水平显著提升,黄淮海平原和长江中下游平原形成连续的高值带〔见图 2(c)、(d)〕,核心区由东部沿海向中部腹地扩展。

此阶段的快速增长与政策支持和技术进步密切相关,其中取消农业税、高标准农田建设和耕地保护补贴等政策强化了土地利用约束与生产激励,推动了耕地利用从数量扩张向质量提升的转变^[32]。同时,农业机械化、良种良法推广和精准农业技术的应用显著提升了耕地利用效率与资源配置水平,成为促进耕地利用转型的关键动力^[33]。

2015 年以后,全国耕地利用转型水平继续上

升[见图 2(e)、(f)],东部地区保持高位稳定,中部地区稳步提升,西部地区在生态补偿政策和土地整治工程的推动下显著改善。这一时期,农业现代化进程加快,机械化、信息化与智能化的协同发展进一步促进了耕地利用方式的绿色化与集约化^[34]。时间序列结果显示,全国耕地利用转型的区域差异系数由 2000 年的 0.21 下降至 2023 年的 0.13,表明区域差异明显收敛。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1825 号的标准地图制作,底图无修改。

图 2 2000—2023 年中国耕地利用转型空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of cultivated land use transformation in China from 2000 to 2023

空间上,耕地利用转型总体呈现东部率先提升、中部逐步跟进、西部稳步推进的梯度演化特征。东部地区转型指数普遍在 0.45 以上,中部地区多介于 0.30 ~ 0.40 之间,西部地区整体低于 0.25 但呈稳步上升态势。耕地利用转型已逐步从阶段性尝试演进为整体性过程,其进展不仅改变了农业生产与组织方式,也重塑了区域发展的空间格局。

3.1.2 农业减污降碳协同空间分布格局

根据图 3 的空间分布结果可知,2000—2023 年间中国农业减污降碳协同水平整体呈持续改善趋势,但演进过程具有明显的阶段性特征。总体上,协同水平经历了由“初步提升—区域扩展—整体优化”的动态演化过程。

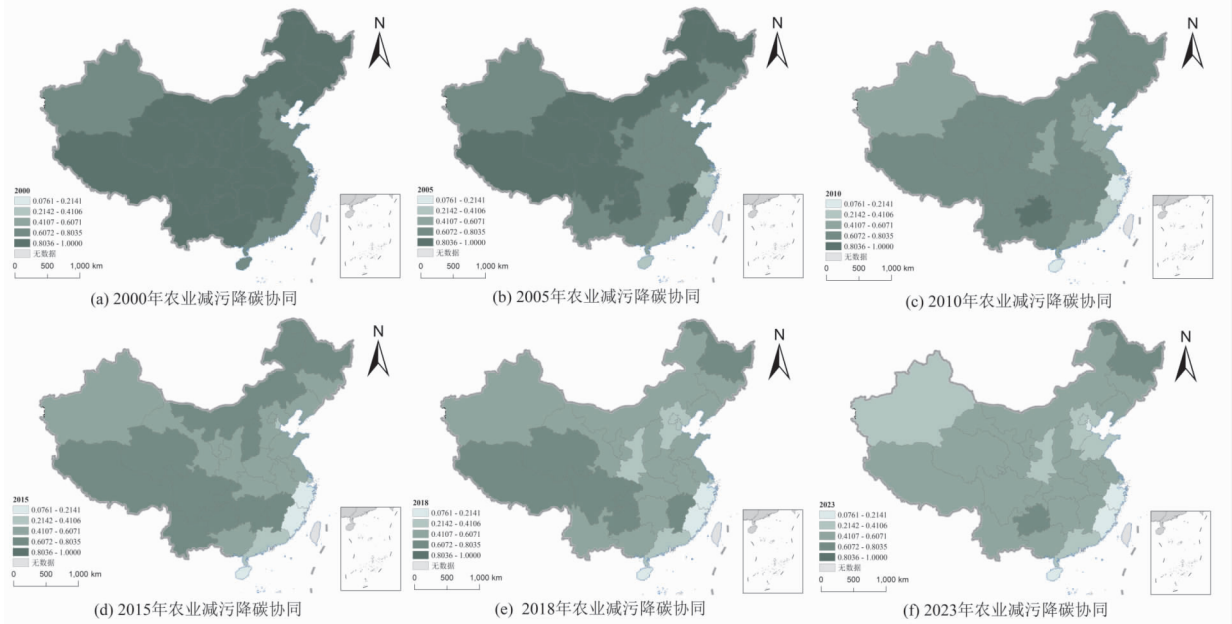
2000—2005 年间,全国农业减污降碳协同指数均值由约 0.84 降至约 0.67,标准差由约 0.10 上升至约 0.15[见图 3(a)、(b)]。在空间分布上,东部沿海和部分中部省份(如江苏、浙江、广

东、山东等)整体表现更为突出,而西北、西南地区协同改善相对有限,呈现出明显的区域差异格局。东部地区较早推进农业结构调整、投入品减量化改革与农村环境治理,同时依托完善的基础设施、较高的农业机械化水平以及市场化程度优势,使减污降碳成效率先显现;相比之下,西部地区受自然禀赋约束明显、农业经营方式相对粗放、要素投入效率偏低,加之环保投入不足,使协同改善过程相对滞后,从而强化了上述空间分化特征。

2010—2015 年间,全国协同均值进一步下降至约 0.45,标准差维持在约 0.16[见图 3(c)、(d)],表明协同水平持续改善、区域差异有所收敛。受基础条件限制与绿色技术扩散速度偏慢影响,西部地区(如甘肃、云南、西藏等)协同改善相对不足;而中部省份(如河南、湖南)协同水平明显提升,长江中下游区域逐步呈现连续优势格局,体现出政策扶持与农业生产方式优化的综合作用。2018—2023 年间,全国协同均值由约 0.40

降至约 0.34,标准差从约 0.16 降至约 0.15〔见图 3(e)、(f)〕,区域差异进一步缩小。2018 年时,长江中下游地区整体协同水平已处于较优区间,区域平均指数约 0.39,省际差异较小。到 2023 年,该区域协同水平进一步提升,平均指数降至约 0.34,全国多数省份均呈现改善趋势。广东、福建、海南、广西等南方省份整体处于较优水平,协

同指数约 0.33;江苏、浙江、山东等东部地区也保持稳定提升,协同指数约 0.35;而新疆、青海等西北省份仍相对较高,其指数多在约 0.38 左右。随着“双碳”目标制度化、绿色金融拓展及农业绿色生产政策持续推进,各地减排约束与绿色激励机制逐步强化,推动了协同水平的整体提升。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1825 号的标准地图制作,底图无修改。

图 3 2000—2023 年中国农业减污降碳协同空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of agricultural pollution reduction and carbon abatement synergy in China from 2000 to 2023

综上,农业减污降碳协同格局经历了由“东西分化”向“整体提升、区域差距显著收敛”的演进过程(见图 3)。至 2023 年,全国多数省份协同指数已进入较优水平区间,南方及长江中下游地区表现相对领先,中西部整体改善明显。总体来看,全国区域间差距明显缩小,协同格局趋于更加均衡,显示出我国农业绿色转型的基础不断巩固。

3.2 耕地利用转型对农业减污降碳协同机制

3.2.1 基准回归

为识别耕地利用转型对农业减污降碳协同的影响,我们采用省份与年份双向固定效应开展基准回归,结果如表 3 所示。模型(1)~(4)中,APCR 的回归系数始终为负且在 1% 水平下显著。说明耕地利用转型显著降低了污染物与二氧化碳排放的综合水平,从而实现了协同效应的提升。换言之,耕地利用转型通过抑制污染强度与碳排放强度,推动了农业系统向低碳与清洁生产方向演进, H_1 得证。随着控制变量逐步加入,系数绝

对值由 $-0.195\ 3$ 扩大至 $-0.219\ 3$,协同改善效应更为稳健。整体结果表明,在显式控制相关变量后,耕地利用转型对农业减污降碳协同的真实边际效应得以更准确识别,进一步验证了主效应估计的稳健性与可靠性。

3.2.2 稳健性检验

为检验前述研究结果的稳健性,本文分别从剔除直辖市、对变量做缩尾处理、缩短样本年限、分位数回归 4 个角度进行检验(见表 4)。

1) 剔除直辖市:参考王淑贺等研究学者的研究结果,考虑到直辖市在经济发展和政策惠及力度等方面存在差异性,可能会对结果产生稳定性影响^[35]。在剔除北京、重庆、天津、上海等直辖市后,结果显示,APCR 的回归系数为负且在 1% 水平下显著。

2) 解释变量与被解释变量缩尾处理:考虑样本数据中的极端值对两者关系的影响,参考郭沛等研究学者的研究结果,对耕地利用转型、农业减污

降碳协同数据采取上下 5% 的缩尾^[36]。结果显示, APCR 的回归系数为负且在 1% 水平下显著。

表 3 基准回归结果

Tab. 3 The results of benchmark regression

变量/参数	模型(1) 农业减污降碳协同	模型(2) 农业减污降碳协同	模型(3) 农业减污降碳协同	模型(4) 农业减污降碳协同
耕地利用转型	-0. 195 3 *** (0. 049 2)	-0. 195 3 *** (0. 049 3)	-0. 219 3 *** (0. 048 3)	-0. 214 7 *** (0. 047 4)
降水量		0. 000 9 (0. 063 8)	-0. 007 4 (0. 064 0)	-0. 015 7 (0. 065 4)
地形起伏度		0. 296 4 *** (0. 043 5)	0. 294 8 *** (0. 063 5)	0. 356 5 *** (0. 065 8)
城镇化率			0. 073 3 * (0. 039 1)	0. 080 1 ** (0. 038 3)
产业结构			0. 089 1 *** (0. 030 5)	0. 078 4 *** (0. 028 8)
人均收入				0. 078 2 (0. 070 0)
自然灾害率				-0. 002 6 (0. 021 6)
常数项	-0. 223 2 * (0. 129 7)	0. 238 4 *** (0. 090 7)	0. 206 9 ** (0. 094 2)	0. 274 4 *** (0. 093 9)
样本量 <i>N</i>	744	744	744	744
控制变量	控制	控制	控制	控制
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
决定系数(<i>R</i> ²)	0. 909 3	0. 909 3	0. 910 7	0. 911 0
调整决定系数(Adj <i>R</i> ²)	0. 902 2	0. 902 1	0. 903 2	0. 903 3

注:****p* < 0. 01、***p* < 0. 05、**p* < 0. 1;括号内为标准误。

3)缩短样本年限:为观察耕地利用转型对农业减污降碳协同影响机制的时间连续性,文章对 2000—2023 年全样本数据缩短至 2000—2020 年后重新进行检验。结果显示,APCR 的回归系数为负且在 1% 水平下显著(见表 4)。

4)分位数回归:鉴于传统最小二乘法(OLS)主要考察变量间的均值回归关系,易受样本极端值和残差非正态分布的干扰,可能掩盖了不同农

业减污降碳协同水平下的真实效应,文章采用条件分位数回归模型,选取能够代表数据中心趋势的中位数(*q* = 0. 5)进行重新估算^[37]。结果显示,核心解释变量的回归系数依然显著为负,效应方向与基准回归完全一致,从统计分布特性的角度,排除了极端异常值的潜在干扰,进一步显示出耕地利用转型对农业减污降碳协同影响的强稳健性。

表 4 稳健性检验
Tab. 4 Robustness test

变量/参数	剔除直辖市 农业减污降碳协同	缩尾 5% 农业减污降碳协同	2000—2020 样本 农业减污降碳协同	分位数回归($q=0.5$) 农业减污降碳协同
耕地利用转型	-0.162 *** (0.046)	-0.200 *** (0.044)	-0.192 *** (0.066)	-0.081 *** (0.026)
控制变量	控制	控制	控制	控制
常数项	0.608 *** (0.117)	0.287 *** (0.088)	0.176 * (0.100)	-0.536 *** (0.058)
样本量(N)	648	744	651	744
决定系数(R^2)	0.932	0.911	0.914	0.741
调整决定系数(Adj. R^2)	0.926	0.904	0.906	0.718

注：*** $p < 0.01$ 、** $p < 0.05$ 、* $p < 0.1$ ；所有模型均控制省份固定效应和年份固定效应；括号内为标准误。

3.2.3 内生性检验

为有效缓解耕地利用转型可能存在的内生性问题,本文分别采用信息化水平(Ict)与技术市场发展水平(Tech)作为外生工具变量进行两阶段最小二乘法(2SLS)估计(见表 5)。第一阶段回归结果表明,所选的两个工具变量的系数分别为 0.611($p < 0.01$)和 0.679($p < 0.01$),均在 1% 显著性水平下显著为正,表明信息化水平与技术市场发展水平对耕地利用转型具有促进作用。联合

显著性检验显示,第一阶段 F 值为 10.988 ($p < 0.01$),已超过判断强工具变量的临界值 ($F \geq 10$),通过了不可识别检验和弱工具变量检验。Hansen J 检验统计量为 3.883 ($p = 0.143$),Sargan 统计量为 3.221 ($p = 0.128$)未拒绝工具变量外生性假设,表明选取的工具变量与误差项之间不存在显著相关性,模型设定合理,估计结果稳健可信。

表 5 内生性检验
Tab. 5 Endogeneity test

变量/参数	系数(第一阶段) 耕地利用转型	系数(第二阶段) 农业减污降碳协同
信息化水平(第一阶段)	0.611 *** (0.072)	
技术市场发展水平(第一阶段)	0.679 *** (0.068)	
耕地利用转型(第二阶段)		-1.523 *** (0.427)
省份固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
第一阶段工具变量联合显著性 F 统计量	10.988 ***	
第一阶段偏 R^2 (排除工具变量)	0.043	
Hansen J 统计量(外生性检验)		3.883 ($p = 0.143$)
Sargan 统计量(外生性检验)		3.221 ($p = 0.128$)
样本量(N)	744	744
决定系数(R^2)	0.914	0.918

注：*** $p < 0.01$ 、** $p < 0.05$ 、* $p < 0.1$ ；括号内为标准误。

3.2.4 机制检验

就耕地利用转型对农业减污降碳协同的中介机制而言,表6报告了农业绿色技术创新与人力资本水平的估计结果。首先,耕地利用转型对绿色技术创新具有显著的推动作用,其系数为0.254($p<0.01$),将绿色技术创新变量纳入回归后,其对农业减污降碳协同的影响显著为负,系数为-0.253($p<0.01$)。这表明耕地利用转型通过促进农业绿色技术升级,进而改善能源利用效率、投入结构与清洁生产能力,从而提升农业减污降碳协同水平。其次,在人力资本路径下,耕地利用转型对人力资本水平亦具有显著正向影响,其系数为0.2105($p<0.01$)。进一步,人力资本水平对农业减污降碳协同呈显著负向影响,系数为

-0.2409($p<0.01$),表明人力资本提升有助于推广绿色生产技术、优化农业经营方式并增强劳动力环保意识,从而推动农业污染与碳排放协同治理。

进一步的Bootstrap(1000次)检验结果验证了上述发现:农业绿色技术创新路径的间接效应均值为-0.064,95%置信区间为[-0.105,-0.032];人力资本路径的间接效应均值为-0.051,95%置信区间为[-0.072,-0.019],均在1%水平上显著不跨0,Sobel检验结果亦一致。这表明,耕地利用转型通过促进农业绿色技术创新与提升人力资本两条路径,显著推动了农业减污降碳协同目标的实现,H2得证。

表6 机制检验
Tab.6 Mechanism test

变量/参数	(1)农业绿色技术创新	(2)农业减污降碳协同	(3)人力资本水平	(4)农业减污降碳协同
耕地利用转型	0.254 *** (0.056)	-0.131 *** (0.047)	0.210 *** (0.057)	-0.145 *** (0.045)
农业绿色技术创新		-0.253 *** (0.050)		
人力资本水平				-0.241 *** (0.051)
控制变量	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
样本量(N)	744	744	744	744
决定系数(R ²)	0.935	0.914	0.930	0.920
Bootstrap 间接效应(1000次)		-0.064 *** [-0.105,-0.032]		-0.051 *** [-0.085,-0.017]
Sobel 检验		Z = -3.440 *** ,P = 0.000		Z = -2.906 *** ,P = 0.003

注:*** $p<0.01$ 、** $p<0.05$ 、* $p<0.1$;括号内为标准误。

3.2.5 调节效应分析

实证结果显示,环境治理强度与政府财政支持对耕地利用转型的农业减污降碳协同效应产生了显著的正向调节作用(见表7)。在模型(1)中,耕地利用转型与环境治理强度的交互项系数为-0.048($p<0.05$),表明较高的环境治理强度能够显著强化耕地利用转型所带来的农业减污降

碳协同效应。更高的环境治理强度意味着农村地区在污染治理设施、生态治理基础和环境监管能力方面具备更完善的支撑条件,从而提升农业主体在绿色生产环节中的规范化、清洁化和资源高效利用能力,使耕地利用结构优化更容易转化为实质性的污染物减排与碳排放减少。模型(2)中,政府财政支持在耕地利用转型促进农业减污

降碳协同中的调节作用同样显著。其交互项系数为 $-0.031(p < 0.05)$,说明随着政府财政支持力度增强,耕地利用转型对污染物削减与碳排放降低的促进效应进一步加强。资金支持力度的增加

在一定程度上缓解了农业主体采用绿色投入和清洁生产方式的资金约束,使耕地利用结构调整更容易转化为实际的节能减排成效^[22]。综上, H_3 得证。

表 7 调节效应分析
Tab.7 Analysis of moderating effects

变量/参数	(1)农业减污降碳协同	(2)农业减污降碳协同
耕地利用转型	-0.249 *** (0.090)	-0.225 *** (0.081)
环境治理强度	0.061 (0.045)	
交互项:耕地利用转型 × 环境治理强度	-0.049 ** (0.019)	
政府财政支持		0.048 (0.043)
交互项:耕地利用转型 × 政府财政支持		-0.031 ** (0.014)
常数项	0.067 (0.117)	0.163 (0.100)
控制变量	控制	控制
省份固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
样本量(N)	744	744
决定系数(R ²)	0.913	0.912
调整决定系数(Adj. R ²)	0.905	0.904

注:*** $p < 0.01$ 、** $p < 0.05$ 、* $p < 0.1$;括号内为标准误。

3.2.6 空间异质性检验

本文构建自然地理分区,人口地理分区,流域分区 3 个子类型,并进一步选取中国一、二、三阶梯分界线、胡焕庸线、长江、黄河流域等典型地理分界线组成共 7 个检验模型,考察不同地区耕地利用转型影响农业减污降碳协同的空间异质性,检验如下(见表 8)。在三阶梯划分下,第一阶梯和第三阶梯耕地利用转型均显著降低了污染物和碳排放水平,农业减污降碳协同水平较高。其中第一阶梯的系数绝对值最大(系数 $-0.399,p < 0.01$),说明高海拔地区的环境改善效应最为突出;第二阶梯系数虽为负但不显著。胡焕庸线划

分结果显示,东侧与西测地区均呈显著负效应,且东侧绝对值略大(系数 $-0.304,p < 0.01$,系数 $-0.242,p < 0.01$),表明人口密集、经济发达的东侧地区在耕地利用转型中取得了更显著的减污降碳成效。流域划分结果发现,黄河流域地区的系数显著为负(系数 $-0.411,p < 0.01$),环境改善效应显著。而长江流域系数为正且不显著,表明长江流域可能受产业结构等因素影响,耕地利用转型的减排效应未能显现。总体来看,耕地利用转型在第一阶梯、胡焕庸线以东以及黄河流域的减污降碳协同效果最为显著,区域差异明显, H_4 得证。

表 8 空间异质性分析
Tab. 8 Spatial heterogeneity analysis

变量/参数	自然地理分区			人口地理分区		流域分区	
	第一阶梯	第二阶梯	第三阶梯	胡焕庸线东	胡焕庸线西	长江流域沿岸	黄河流域沿岸
耕地利用转型	-0.399 ^{***} (0.116)	-0.143 (0.101)	-0.264 ^{***} (0.064)	-0.304 ^{***} (0.068)	-0.242 ^{***} (0.057)	0.056 (0.074)	-0.411 ^{***} (0.100)
省份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量(<i>N</i>)	96	168	480	456	288	216	216
决定系数(<i>R</i> ²)	0.967	0.928	0.893	0.89	0.928	0.907	0.92
调整决定系数(Adj. <i>R</i> ²)	0.951	0.908	0.881	0.878	0.916	0.887	0.903

注:****p* < 0.01、***p* < 0.05、**p* < 0.1;括号内为标准误。

4 结论与讨论

4.1 结论

耕地利用转型不仅重塑了土地资源的配置逻辑,也改变了农业排污与碳排放的演化路径。在耕地总量刚性的约束下,其结构优化和格局调整对农业减污降碳协同具有显著影响。本文基于2000—2023年中国31个省份,刻画了耕地利用转型和农业减污降碳协同演化格局。并识别了耕地利用转型对农业减污降碳协同的作用机制。主要研究结论如下。

1)在空间格局上分析,耕地利用转型表现为由东部率先向中西部逐步推进的梯度扩展,其扩散路径凸显了区域间发展条件的差异性;相较之下,农业减污降碳协同效应经历了由分散不均向整体提升与区域协调的转变。

2)基准回归结果表明,耕地利用转型显著促进了农业减污降碳协同,APCR系数在1%水平下始终为负,说明转型有效降低了污染物与碳排放强度,推动农业系统向绿色低碳方向演进。多种稳健性检验(包括剔除直辖市、缩尾处理、样本年限缩短与分位数回归)均保持结果一致,验证了结论的稳健性与可靠性。

3)中介效应显示,耕地利用转型能够通过提升农业绿色创新和人力资本素质,对农业减污降碳协同产生显著影响;在纳入两类中介变量后,其传导效应依然稳健,表明转型带来的技术优化与

能力提升已部分转化为协同增效。进一步的Bootstrap与Sobel检验均验证了农业绿色技术创新与人力资本水平两条路径的中介效应显著存在。

4)环境治理强度与政府财政支持均对耕地利用转型的农业减污降碳协同效应产生正向调节作用。较高的环境治理强度改善了农业生态条件与外部治理基础,而更强的财政支持缓解了绿色生产的资金约束,从而共同增强了耕地利用转型的节能减排效益。

5)耕地利用转型在不同区域的减污降碳效应存在鲜明的区域差异性。在三阶梯划分中,第一阶梯和第三阶梯表现出显著的减污降碳协同效应,尤其是第一阶梯作用最为突出;在胡焕庸线划分下,线东西两侧均呈显著促进效应,其中人口密集、经济发达的线东地区更具优势;在流域维度上,黄河流域的环境改善效应最为显著,而长江流域未能体现出明显的减排作用。

4.2 讨论

现有研究多侧重于分别考察耕地利用转型或农业减污降碳协同,而对二者协同机制的系统性探讨仍相对不足。本文以2000—2023年为研究期,选取全国31个省/市/自治区(不含港澳台)为研究对象,通过构建耕地利用转型指标体系和农业减污降碳协同指数模型(APCR),系统分析了耕地利用转型影响农业减污降碳协同的一般性规律和空间异质性。研究不仅在一定程度上拓展了耕地利用转型与农业生态文明建设关系的讨

论,也为我国因地制宜推进耕地利用转型、实现减污降碳协同提供了重要的理论启示与实践价值。本文还存在有待进一步研究的空间:耕地利用转型在产生减污、降碳等生态效应的同时,对粮食生产等社会功能以及其他经济功能的协同影响,仍是值得深入探讨的问题;此外,农业减污、降碳的计算,尚存在进一步优化的空间。文章为进一步推动耕地利用转型对农业减污降碳协同的影响效益,提出以下建议。

1)推动耕地利用方式的系统性绿色转型。应着眼于整体提升耕地利用效率与环境效益,加快粗放型利用向集约化、绿色化和多样化转变。政策层面既要推动节能减排技术研发与应用,也需完善绿色金融、生态补偿等激励机制,引导形成兼顾产出与生态的耕地利用格局。

2)防范“粗放增长”与“要素失衡”风险。应坚持“质量优先、绿色带动”:一方面通过加强农业绿色技术研发支持、完善创新成果转化体系与农机智能化推广机制,推动农业生产由依赖传统经验型投入向依托技术进步与智能化绿色生产方式转型;另一方面深化农村教育培训和技能提升计划,强化农业劳动力的技术吸收能力与绿色生产意识,使人力资本成为支撑农业低碳化与协同治理的重要驱动力。

3)强化环境治理强度与政府财政支持对耕地利用转型的保障作用。应不断提升农村环境治理强度水平,完善面源污染治理、乡村环境整治等关键设施,夯实农业绿色生产的生态基础,提高绿色技术在农业体系中的吸收与转化能力。同时,优化财政支农资金结构,引导更多资源投向绿色投入与清洁生产环节,缓解农业主体绿色转型的成本压力。

4)因地制宜实施区域差异化政策。不同区域应结合自身特征推进转型:西部和生态脆弱区侧重生态保护与绿色技术推广,东部在人口和经济优势下加快绿色农机与清洁能源替代,黄河流域强化水土保持与污染治理,长江流域等区域探索结合产业结构调整的本地化低碳路径。

参考文献

[1] 龙花楼. 论土地利用转型与乡村转型发展[J]. 地理科学进展,2012,31(2):131-138.
Long H L. Land use transition and rural transformation development[J]. Progress in Geography, 2012, 31

(2): 131-138.
[2] 付慧,刘艳军,孙宏日,等. 京津冀地区耕地利用转型时空分异及驱动机制[J]. 地理科学进展,2020,39(12):1985-1998.
Fu H, Liu Y J, Sun H R, et al. Spatiotemporal characteristics and dynamic mechanism of cultivated land use transition in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Progress in Geography, 2020, 39(12): 1985-1998.
[3] 高海东,易琦,贾莲莲,等. 黄河流域治理状态识别与对策分析[J]. 地理学报,2025,80(3):778-792.
Gao H D, Yi Q, Jia L L, et al. Identification of governance status and countermeasures based on sediment transport modulus and water quality index in the Yellow River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(3): 778-792.
[4] 葛继红,郑智聪,周曙东. 中国农村化学品企业发展存在“污染天堂效应”吗? [J]. 南京农业大学学报(社会科学版),2018,18(6):128-136.
Ge J H, Zheng Z C, Zhou S D. Was there pollution heaven effect in the development of China's rural chemical enterprises? [J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018, 18(6): 128-136.
[5] 杨斌,田佳琦,武越天,等. 耕地利用隐性转型与农业碳排放时空耦合及其影响因素:以长江经济带为例[J]. 生态学报,2025,45(17): 8672-8686.
Yang B, Tian J Q, Wu Y T, et al. Spatiotemporal characteristics and influence factors of coupling coordination between recessive farmland use transition and agricultural carbon emissions: A case study of the Yangtze River Economic Belt in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): 8672-8686.
[6] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. (2022-10-26)[2025-08-29]. <https://politics.people.com.cn/n1/2022/1026/c1024-32551597.html>.
[7] 张德钢,唐瑜梳. 粮食主产区政策对农业减污降碳协同的影响[J]. 资源科学, 2025, 47(6): 1358-1373.
Zhang D G, Tang Y S. Effect of policies in major grain-producing areas on synergistic reduction of agricultural pollution and carbon emission[J]. Resources Science, 2025, 47(6): 1358-1373.
[8] 李柳笛,李宇明,白秀广. 农业新质生产力赋能农业碳减排的机制及异质性[J]. 经济地理, 2026, 46(3):205-214.
Li L D, Li Y M, Bai X G. Impact mechanism and

- heterogeneity of the agricultural new quality productive forces on agricultural carbon emission reduction [J]. *Economic Geography*, 2026, 46(3): 205-214.
- [9] Hou D, Meng F, Prishchepov A V. How is urbanization shaping agricultural land-use? Unraveling the nexus between farmland abandonment and urbanization in China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 214: 104170.
- [10] 戈大专,龙花楼,杨忍. 中国耕地利用转型格局及驱动因素研究:基于人均耕地面积视角[J]. *资源科学*, 2018, 40(2): 273-283.
- Ge D Z, Long H L, Yang R. The pattern and mechanism of farmland transition in China from the perspective of per capita farmland area [J]. *Resources Science*, 2018, 40(2): 273-283.
- [11] 龙花楼,李秀彬. 中国耕地转型与土地整理:研究进展与框架[J]. *地理科学进展*, 2006(5): 67-76.
- Long H L, Li X B. Cultivated-land transition and land consolidation and reclamation in China: Research progress and framework [J]. *Progress in Geography*, 2006(5): 67-76.
- [12] 宋小青,吴志峰,欧阳竹. 耕地转型的研究路径探讨[J]. *地理研究*, 2014, 33(3): 403-413.
- Song X Q, Wu Z F, Ouyang Z. Route of cultivated land transition research [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(3): 403-413.
- [13] Guo Z, Zhang X. Carbon reduction effect of agricultural green production technology: A new evidence from China [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 874: 162483.
- [14] Yuan R, Xu C, Kong F. Decoupling agriculture pollution and carbon reduction from economic growth in the Yangtze River Delta, China [J]. *Plos One*, 2023, 18(1): e0280268.
- [15] 陈晓红,张嘉敏,唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. *资源科学*, 2022, 44(12): 2387-2398.
- Chen X H, Zhang J M, Tang X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism [J]. *Resources Science*, 2022, 44(12): 2387-2398.
- [16] 邵汉华,王庆祥,何铿辉. 绿色技术创新对省域减污与降碳协同水平的影响及其驱动机制[J]. *经济地理*, 2025, 45(1): 17-24, 35.
- Shao H H, Wang Q X, He K H. Impact of green technology innovation on the cooperation level of provincial-level pollution reduction and carbon reduction and its driving mechanism [J]. *Economic Geography*, 2025, 45(1): 17-24, 35.
- [17] 卢泓钢,王益如,吴伟光. 中国农业减污降碳协同增效的水平测度及其时空收敛性研究:基于“减污、降碳、扩绿、增长”的四维分析[J]. *生态经济*, 2024, 40(12): 186-195.
- Lu H G, Wang Y R, Wu W G. Environment pollution and carbon emission of agriculture in China: Based on the four-dimensional analysis of "pollution reduction, carbon reduction, green expansion and growth" [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(12): 186-195.
- [18] 吴昊玥,陈锐,何艳秋,等. 中国农业减污降碳协同效应量化及时空特征:基于减排绩效视角[J]. *环境科学*, 2025, 46(11): 6828-6838.
- Wu H Y, Chen R, He Y Q, et al. Estimation and spatiotemporal characteristics of the co-abatement effect of pollution and carbon emissions of agriculture in China: Based on the emission mitigation performance [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(11): 6828-6838.
- [19] 钟顺昌,焦怡萌,闫程莉,等. 建设用地资源空间集聚对减污降碳协同的影响机制[J]. *地理学报*, 2024, 79(3): 688-711.
- Zhong S C, Jiao Y M, Yan C L, et al. The impact mechanism of spatial agglomeration of construction land resources on the synergistic reduction of pollutants and CO₂ [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(3): 688-711.
- [20] 刘耀彬,邓伟凤,李硕硕,等. 数字产业集聚对减污降碳协同的影响:以长江经济带为例[J]. *资源科学*, 2024, 46(4): 744-760.
- Liu Y B, Deng W F, Li S S, et al. The impact of digital industry agglomeration on synergistic pollution reduction and carbon emission reduction: Taking the Yangtze River Economic Belt as an example [J]. *Resources Science*, 2024, 46(4): 744-760.
- [21] 檀菲菲,闫晨晓. 数字经济的减污降碳协同促进效应:以长三角城市群为例[J]. *环境科学*, 2025, 46(7): 4175-4185.
- Tan F F, Yan C X. Synergistic effects of pollution and carbon emission reductions in a digital economy: A case study of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4175-4185.
- [22] 马志飞,石梦婷,刘倩,等. 淮河流域农业生态效率时空演变与影响因素研究[J]. *信阳师范大学学报(自然科学版)*, 2026, 39(2): 173-178.
- Ma Z F, Shi M T, Liu Q, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural eco-efficiency

- cy in the Huaihe River Basin[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(2): 173-178.
- [23] Liu Y, Long H, Li T, et al. Land use transitions and their effects on water environment in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Land Use Policy, 2015, 47: 293-301.
- [24] Wang L, Xue W, Si J, et al. Synergizing pollution control and carbon reduction in China's Yellow River Basin: Exploring the roles of policy, technology, and structural transformation[J]. Land Use Policy, 2025, 157: 107669.
- [25] 刘晶,徐伟义,金晓斌,等. 可持续集约导向下的耕地利用转型:理论逻辑与调控路径[J]. 地理研究, 2025,44(7):1861-1876.
- Liu J, Xu W Y, Jin X B, et al. Cultivated land use transition for sustainable intensification: Theoretical logic and regulatory approach[J]. Geographical Research, 2025, 44(7): 1861-1876.
- [26] 邱士雷,王帆,陈祺,等. 结构调整视角下环境规制对工业绿色全要素生产率的影响机制研究[J]. 干旱区资源与环境,2025,39(9):1-12.
- Qiu S L, Wang F, Chen Q, et al. Impact mechanism of environmental regulation on industrial green total factor productivity: A perspective from structural adjustment[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025, 39(9): 1-12.
- [27] 卢召艳,黎红梅. 中国农业“水-能源-粮食”系统协同发展及其影响因素[J]. 经济地理,2024,44(12):177-186.
- Lu Z Y, Li H M. Coordination development of "water-energy-food" system in China's agriculture and its influencing factors[J]. Economic Geography, 2024, 44(12): 177-186.
- [28] 王成军,路程,陈磊,等. 农业生产性服务业推动地区农业转型研究[J]. 中国农业资源与区划,2026, 47(3):90-102.
- Wang C J, Lu C, Chen L, et al. Research on agricultural productive service industry promoting regional agricultural transformation[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2026, 47(3): 90-102.
- [29] 王兆峰,张先甜,吴卫. 中国耕地保护效率演进及其粮食安全效应[J]. 地理学报,2026,81(5):1452-1470.
- Wang Z F, Zhang X T, Wu W. Evolution of cultivated land protection efficiency and its food security effect in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2026, 81(5): 1452-1470.
- [30] 陆敏,徐好,陈福兴. “双碳”背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(11):121-133.
- Lu M, Xu H, Chen F X. Pollution and carbon reduction effects of the carbon emissions trading mechanism in the context of the "dual carbon" goals[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11): 121-133.
- [31] 马莹莹,姚文艳,姜玲,等. 绿色金融改革创新试验区政策对城市减污降碳的影响及作用机制[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(6):45-55.
- Ma Y Y, Yao W Y, Jiang L, et al. Impact of China's green finance reform and innovation pilot zone policies on urban pollution and carbon emission reduction and their mechanisms[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(6): 45-55.
- [32] 叶思菁,宋长青,程昌秀,等. 中国耕地资源利用的“五化”态势与治理对策[J]. 中国科学院院刊, 2023,38(12):1962-1976.
- Ye S J, Song C Q, Cheng C X, et al. Five issues and countermeasures of China cropland resource use[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1962-1976.
- [33] 梁钰,李祥,贺炳彦,等. 基于最小数据集的黄土丘陵沟壑区耕地质量评价及地形梯度特征分析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2025,55(4):850-866.
- Liang Y, Li X, He B Y, et al. Evaluating cultivated land quality in loess hill and gully region and characterisation of topographic gradient using the minimum data set[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2025, 55(4): 850-866.
- [34] 刘晓琼,张雪静,杨华,等. 黄河流域资源型地区可持续农业与农村发展时空特征与耦合协调机制:基于42个地级市的实证分析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2025,55(4):726-739.
- Liu X Q, Zhang X J, Yang H, et al. Spatial-temporal characteristics and coupled coordination mechanism of sustainable agriculture and rural development of resource-based areas in the Yellow River Basin: An empirical analysis based on 42 prefecture-level cities[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2025, 55(4): 726-739.
- [35] 王淑贺,刘世哲,李晓敏. 数字经济空间关联网对减污降碳的影响机制研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2025,25(2):105-119.
- Wang S H, Liu S Z, Li X M. Research on the impact

mechanism of the digital economy spatial correlation network on pollution reduction and carbon reduction [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2025, 25(2) : 105-119.

[36] 郭沛,王光远. 数字经济的减污降碳协同作用及机制:基于地级市数据的实证检验[J]. 资源科学, 2023,45(11) :2117-2129.

Guo P, Wang G Y. The synergistic effect of digital economy on pollution and carbon reduction and the influence mechanism: An empirical test based on prefecture-level city data[J]. Resources Science, 2023, 45(11) : 2117-2129.

[37] 刘怡君,张榆琴,李学坤. 数字经济对农业减污降碳协同效应的影响机制[J]. 环境科学,2026,47(5) : 2927-2938.

Liu Y J, Zhang Y Q, Li X K. Impact mechanism of the digital economy on the synergistic effects of pollution reduction and carbon mitigation in agriculture[J]. Environmental Science, 2026, 47(5) : 2927-2938.

(编 辑 邵 煜)