

引用格式: 李园园, 薛彩霞, 柴朝卿, 等. 中国保护性耕作农业生态效率的动态演进、区域差异与收敛性[J]. 资源科学, 2026, 48(5): 1158-1175. [Li Y Y, Xue C X, Chai C Q, et al. Dynamic evolution, regional differences, and convergence of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China[J]. Resources Science, 2026, 48(5): 1158-1175.] DOI: 10.18402/resci.2026.05.09

# 中国保护性耕作农业生态效率的动态演进、 区域差异与收敛性

李园园, 薛彩霞, 柴朝卿, 王心怡, 侯广健, 张金荣

(西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100)

**摘要:**【目的】保护性耕作具有节本增效和固碳减排的双重经济-生态效益,但其技术的区域性特征使其农业生态效率存在空间差异性,本文旨在揭示中国保护性耕作农业生态效率的动态演进规律与区域差异特征,为差异化保护性耕作技术推广路径和实现农业可持续发展提供参考依据。【方法】本文采用中国30个省份2002—2022年的面板数据,基于耕作方式视角运用含非期望产出的超效率SBM模型对各省份保护性耕作农业生态效率进行测度,并采用Dagum基尼系数和收敛模型分析其动态演进、区域差异及收敛性特征。【结果】①全国及各区域保护性耕作农业生态效率均随时间呈“先减后增”变化态势,空间上呈“西高东低-北高南低”分布。②全国保护性耕作农业生态效率的基尼系数呈“先升后降”的趋势,区域间差异是其非均衡性的主要来源。③保护性耕作农业生态效率在全国均存在 $\alpha$ 收敛和 $\beta$ 收敛,从各区域来看,中部地区存在 $\alpha$ 收敛,中、西及东北地区存在 $\beta$ 收敛,在考虑社会经济等因素后,收敛周期缩短。【结论】中国保护性耕作农业生态效率水平整体较高,存在明显的区域异质性和 $\beta$ 收敛特征。未来应立足保护性耕作农业生态效率的空间非均衡性,因地制宜推广保护性耕作;优化保护性耕作推广政策,健全保护性耕作长效发展机制;同时加强地区间农业生产交流合作,建立保护性耕作经济-生态效益的联动机制。

**关键词:** 保护性耕作; 农业生态效率; 超效率SBM模型; 动态演进; 区域差异; 收敛性; 中国

DOI: 10.18402/resci.2026.05.09

## 1 引言

温室气体排放带来的全球气候变暖持续加剧,导致极端气候事件频发,已对粮食生产构成严峻挑战,而中国现有的农业资源禀赋和人口大国属性放大了粮食生产面临的自然风险<sup>[1]</sup>,因而如何应对极端气候成为农业实现可持续发展的关键<sup>[2]</sup>。保护性耕作被认为是基于自然解决方案(Nature-based Solutions, Nbs)的气候智能型农业的关键措施之一<sup>[3]</sup>,目前已有120多个国家(地区)实施保护性耕作农业。中国的保护性耕作始于20世纪60年代,90年代在山西展开系统性试验,2002年启动“保护性耕作示范工程”,2008年中央一号文件首次提出“推广保护性耕作技术”,《保护性耕作工程建设规划(2009—2015年)》的实施基本形成了中国的保护性

耕作技术体系和服务体系。《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025年)》和《国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025年)》将保护性耕作作为黑土地战略性保护和落实粮食安全战略的核心技术进行推广。据《中国农业机械工业年鉴》数据统计,截至2022年,中国免耕播种面积达18917.11千 $\text{hm}^2$ ,秸秆机械还田作业面积为57335.07千 $\text{hm}^2$ ,保护性耕作(联合措施)作业面积为10362.63千 $\text{hm}^2$ ,总作业面积累计86614.81千 $\text{hm}^2$ ,占全国农作物总播种面积的50.95%。已有研究表明,保护性耕作农业通过少耕或免耕播种、作物秸秆还田覆盖等耕作措施不仅具有节本增效的经济效应和防治水土流失、固碳减排的生态效益<sup>[4-6]</sup>,而且能够在一定程度上减缓极端气候对粮食生产的冲击<sup>[1]</sup>。农业生态效

收稿日期: 2025-02-16; 修订日期: 2025-07-15

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(23YJA630111); 陕西省自然科学基金项目(2025JC-YBMS-805)

作者简介: 李园园, 女, 山西晋城人, 博士, 讲师, 研究方向为资源经济与环境管理。E-mail: lyy020924@nwafu.edu.cn

通讯作者: 薛彩霞, 女, 山西运城人, 教授, 研究方向为资源经济与环境管理。E-mail: xiaoxueacc@126.com

2026年5月

率是反映农业生产效率和环境效益协调性的关键指标,在极端气候频发背景下,评估保护性耕作的农业生态效率不仅对实现农业可持续发展具有重要现实意义,而且对践行“藏粮于地、藏粮于技”战略具有参考意义。

现有关于保护性耕作的研究主要聚焦于田间长期定位试验,且分别独立考察其节本增效的经济效益与固碳减排的生态效益。与传统耕作方式相比,实施保护性耕作不仅可以减少劳动、化肥、机械等投入要素使用量<sup>[6,7]</sup>,而且能够通过改变土壤的理化性质、提高土壤水分保持能力起到培肥地力和蓄水保墒的作用,进而实现粮食增产<sup>[1,6,8]</sup>。学者通过田野调查研究也印证了保护性耕作在农户层面实际采用的经济效益<sup>[7,9]</sup>。关于保护性耕作固碳减排效应的研究显示,保护性耕作主要通过促进作物生长、增加地表覆盖、减少土壤扰动等提高土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)的固定能力<sup>[10]</sup>,但保护性耕作技术的实施会改变土壤理化性质和生物环境,进而影响微生物的分解、厌氧发酵等,最终直接或间接影响农业温室气体排放<sup>[4]</sup>;学者还从宏观层面对中国保护性耕作的碳汇碳排及其驱动力因子作了进一步探讨<sup>[4,5]</sup>。当然,保护性耕作经济效益和生态效益的发挥还与耕作措施、耕作年限和作物类型等有关<sup>[8]</sup>。

农业生态效率是基于农业全要素生产率框架的环境成本内生指标,伴随着人们对生态环境的愈加重视,学者相继将农业面源污染和农业碳排放等非期望产出指标纳入了农业生产效率的测度体系中<sup>[11,12]</sup>,并从时空差异<sup>[11,13]</sup>、影响因素及空间效应<sup>[14]</sup>等方面对农业生态效率进行系统探讨。生态效率的测度方法分为参数法和非参数法两类,其中前者是基于前沿生产函数进行测度,后者是以所有决策单元中生产最有效的决策单元作为生产前沿面,将各决策单元与前沿面比较得出效率值,如DEA、SBM模型等。学者采用不同的方法从省域<sup>[11]</sup>、市域<sup>[14]</sup>和县域<sup>[15]</sup>等不同区域尺度探讨农业生态效率的时空差异,如崔许锋等<sup>[11]</sup>和Fu等<sup>[13]</sup>基于中国省域面板数据,测度分析了农田绿色低碳利用效率及农业生态效率的时空演变特征与空间差异,研究发现,农业生产特征<sup>[14]</sup>、社会经济因素<sup>[15]</sup>、自然环境<sup>[16]</sup>等是影响农业生态效率的关键因素。

现有文献对本文具有重要的借鉴和启发意义,

但尚存在可完善之处:一是保护性耕作已被证实兼具节本增效的经济效益和固碳减排的生态效益,现有文献从经济或生态单一视角对保护性耕作效益的研究无法综合衡量保护性耕作的效果,但长期田间位点试验所提供的系统实验数据,可以为从效率角度探讨保护性耕作的效果提供基础。二是中国农业生产是传统耕作和保护性耕作的“混合体”,现有文献关于农业生态效率的测度均是以“混合”农业为基础展开研究,忽略了不同耕作方式在经济-生态效应方面的差异,难以客观评估不同耕作方式下的农业生态效率水平。保护性耕作作为传统耕作的绿色转型,其实际农业投入产出情况较传统耕作具有明显比较优势<sup>[7,17]</sup>,但保护性耕作农业生态效率水平如何?现有文献尚未关注。三是保护性耕作以“示范”形式由点至面逐步推广,加之不同作物种植类型、熟制制度以及保护性耕作农机具的发展和经验模式<sup>[8]</sup>,保护性耕作农业生态效率在地区之间也可能存在差异。基于此,本文以耕作方式为切入点,选取2002—2022年为研究时段,结合保护性耕作节本增效和固碳减排的双重效益特征,构建保护性耕作农业生态效率评价指标体系。在此基础上,采用含非期望产出的超效率SBM模型测算中国保护性耕作农业生态效率并剖析其时空演变规律;借助Dagum基尼系数厘清区域差异特征;利用空间收敛模型探讨保护性耕作农业生态效率的敛散变化态势,从而为政府部门更准确把握保护性耕作农业生态效率的演变规律和完善保护性耕作技术推广政策提供参考。

## 2 理论分析

保护性耕作属于绿色低碳的现代农业耕作方式,是对传统耕作方式的变革。免耕和秸秆还田是保护性耕作农业在中国实践中的典型措施(图1)。

### (1) 保护性耕作固碳减排机理

免耕通过减少土壤扰动,既能对土壤团聚体有

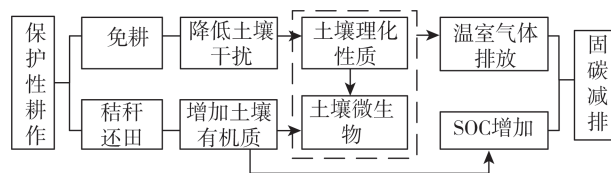


图1 保护性耕作固碳减排机理

Figure 1 Mechanism of carbon sequestration and emission reduction by conservation tillage

机碳形成物理保护,又可依托田间高湿度、低土温的环境条件,减缓外源有机物料的分解速率,进而提升SOC储量<sup>[5]</sup>。作物秸秆富含大量有机质,秸秆还田可直接补充土壤碳源,促进土壤大团聚体发育,进一步增强土壤固碳能力<sup>[18]</sup>。保护性耕作模式会改变农田土壤理化性质与微生物群落结构,使其温室气体排放区别于传统耕作<sup>[4,19]</sup>。其中,免耕避免了翻耕扰动造成的有机碳流失,可以有效削减土壤CO<sub>2</sub>释放,同时低温环境可进一步抑制CH<sub>4</sub>排放<sup>[4]</sup>。秸秆还田在有机质腐解、土壤孔隙改善的双重作用下,会加速土壤呼吸,进而引起CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>等温室气体排放发生变化<sup>[20]</sup>。

### (2) 保护性耕作农业生态效率的评价机理

依据生态效率评价理论,农业生态效率评价指标由投入和产出两类指标构成,其中产出包括期望产出和非期望产出。

从投入指标来看,保护性耕作通过减少作业工序、输入养分、提高水分保持能力等途径影响农业生产的投入。免耕因减少了播种之前翻地和整地的作业工序<sup>[21]</sup>,从而减少劳动力的投入、农业机械的使用频率,以及降低燃油成本、机械磨损和维修等费用。作物秸秆中含有丰富的营养元素,还田后能够增加土壤肥力,同时土壤表面残留物的输入有利于提高土壤水分的渗透性,使秸秆还田具有培肥地力和蓄水保墒的作用<sup>[7,22]</sup>,因而,秸秆还田降低了化肥的使用量和农业灌溉频次,并避免了农膜的使用<sup>[23]</sup>。但是,耕地表面被作物秸秆覆盖后,土壤由于避免了太阳直射形成了适宜杂草和病虫害滋生的环境条件,会增加病虫害发生率,导致增加农药

投入量<sup>[24]</sup>。

从产出指标来看,保护性耕作的土壤固碳属于期望产出,由CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>带来的温室气体排放属于非期望产出。除此之外,保护性耕作通过提高水分利用率、提高土壤肥力等对粮食产量这一期望产出产生影响,通过农药、化肥等化学要素的投入影响农业面源污染这一非期望产出。粮食作物需要充足的水和养分才能获得高产,而保护性耕作通过改变耕作土壤层结构,使得土壤能够更好地吸收和保持降雨<sup>[8]</sup>;作物秸秆中含有大量的氮磷钾及微量元素,保护性耕作下的土壤耕层表现出更高的养分含量<sup>[25]</sup>,这有利于获得更高的粮食产量。关于免耕的产量效应形成了增产、减产和不显著3种观点,但减产比例显著高于增产和不显著比例,是因为免耕造成了土壤压实增加、渗透受损而抑制作物根系的发育和生长<sup>[26]</sup>。但是,当免耕和秸秆还田同时实施时,秸秆还田对免耕的减产具有减缓作用<sup>[4]</sup>,其原因一是秸秆腐解提升了土壤孔隙度,有助于缓解免耕导致的土壤板结问题<sup>[20]</sup>;二是秸秆还田加速土壤养分循环和减少水分蒸发可以弥补免耕导致的养分不足并增强土壤的蓄水保墒能力<sup>[27]</sup>。伴随着免耕、秸秆还田的实施,化肥、农膜、柴油等化学投入要素会减少,但农药的投入会增加,因而保护性耕作农业的农业面源污染会发生变化。综合考虑保护性耕作生产过程的投入产出特点,借鉴现有研究<sup>[11,12,28]</sup>,本文构建了保护性耕作农业生态效率评价指标体系(表1)。

### (3) 保护性耕作农业生态效率的影响因素分析 农业支持政策、社会经济发展和农业生产特征

表1 保护性耕作农业生态效率评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of agricultural eco-efficiency of conservation tillage

指标	指标类型	变量	变量说明	单位
投入	资源投入	劳动力	保护性耕作农业劳动力从业人员	人
		土地	保护性耕作业面积	千hm <sup>2</sup>
		机械	保护性耕作农业投入机械	万kW
		农药	保护性耕作农药施用量	万t
		化肥	保护性耕作化肥投入量	万t
		灌溉	保护性耕作农业有效灌溉面积	千hm <sup>2</sup>
		柴油	保护性耕作农业柴油使用量	万t
		产出	期望产出	粮食产量
固碳量	保护性耕作的土壤固碳量			万tC
非期望产出	碳排放		保护性耕作碳排放、保护性耕作下水稻本身产生的温室气体排放以及化肥、农药、灌溉和柴油等农业化学投入产生的碳排放	万tC
	农业面源污染		保护性耕作下化肥、农药投入产生的面源污染	万t

2026年5月

是影响保护性耕作农业生态效率的关键因素。从农业支持政策来看,相对于传统耕作农业,保护性耕作农业是一种具有环境正外部性的新型农业生产方式,政策支持是各国政府对其进行推广的通用策略。从中国的推广实践来看,政府不仅通过出台技术规范、项目示范、技术指导等方式引导农民对保护性耕作技术规范采用,而且通过农机具购置补贴、作业补贴等方式降低农民的技术采用成本,以此提高保护性耕作的技术效果和推广面积<sup>[29]</sup>。从社会经济发展来看,由于保护性耕作农业的载体是农业机械,因而农业经济发展和农村收入水平较高的地区,保护性耕作农机具更为先进,其技术效果更好,生态效率更高。农村人力资本不仅影响农民对保护性耕作技术的接受程度,还通过农民的技术效仿和“干中学”影响技术的实践效果<sup>[30]</sup>,但可能由于务工比较经济优势,导致高水平人力资本外出务工或“兼业”现象,对保护性耕作农业生态效率产生负向影响。从农业生产特征来看,由于粮食作物种植特征和保护性耕作技术在不同粮食作物之间发展水平存在差异,因而导致保护性耕作农业生态效率也存在异质性。首先,小麦和玉米是保护性耕作的发端作物,其保护性耕作技术和机具更为成熟和先进;而水稻因水田耕作特性,其秸秆还田会产生更大的碳排放,故旱地保护性耕作的农业生态效率更高。其次,农业机械化作业具有规模性效益,因而农业规模化水平较高的地区,保护性耕作的生态效率相对更高。此外,农业以农作物生长为基础,

对自然因素依赖性强的特征决定了自然灾害对其产出的影响,即农业受灾程度也是影响保护性耕作农业生态效率的重要因素。

根据以上分析,本文构建如图2所示的保护性耕作农业生态效率评价机理与影响因素。

### 3 研究方法 with 数据来源

#### 3.1 研究方法

##### 3.1.1 基于非期望产出的超效率SBM模型

含非期望产出的超效率SBM模型是Tone<sup>[31]</sup>在传统SBM模型的基础上考虑了生产过程中的非期望产出而提出来的。该模型综合了超效率DEA模型和SBM模型的优势,在将非期望产出纳入模型的同时能够将效率值为1的有效决策单元进行再分解。具体模型如下:

$$\pi = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{f=1}^m \left( \frac{s_f^x}{x_{fo}} \right)}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{v=1}^{s_1} \frac{s_v^y}{y_{vo}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{lo}} \right)}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{fo} \geq \sum_{g=1, \neq 0}^u \eta_g x_g - s_f^x, \forall f; \\ y_{vo} \leq \sum_{g=1, \neq 0}^u \eta_g y_g + s_v^y, \forall v; \\ z_{lo} \geq \sum_{g=1, \neq 0}^u \eta_g z_g - s_l^z, \forall l; \\ 1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{v=1}^{s_1} \frac{s_v^y}{y_{vo}} + \sum_{l=1}^{s_2} \frac{s_l^z}{z_{lo}} \right) > 0; \\ s_f^x \geq 0, s_v^y \geq 0, s_l^z \geq 0, \eta_g \geq 0, \forall f, g, v, l \end{cases} \quad (1)$$

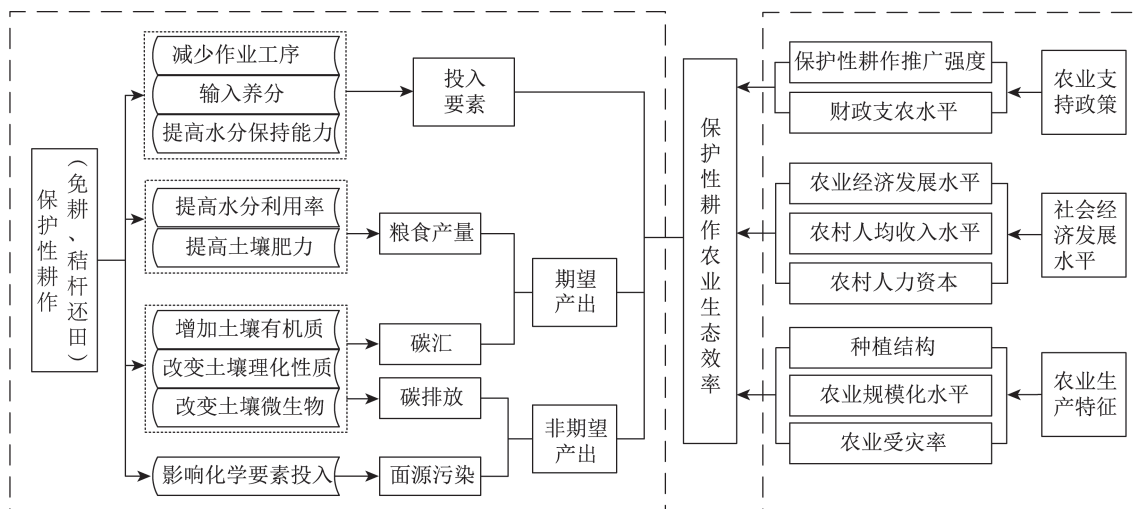


图2 保护性耕作农业生态效率评价机理与影响因素

Figure 2 Evaluation mechanism and influencing factors of agricultural eco-efficiency of conservation tillage

式中： $\pi$ 为保护性耕作农业生态效率值； $u$ 为决策单元的数量；每个决策单元由投入 $m$ 、期望产出 $s_1$ 和非期望产出 $s_2$ 构成； $x$ 、 $y$ 和 $z$ 分别为相应的投入、期望产出和非期望产出矩阵中的元素； $g$ 为决策单元； $o$ 为正在被评估的目标决策单元； $f$ 、 $v$ 和 $l$ 以及 $s^x$ 、 $s^y$ 和 $s^z$ 分别为投入、期望产出和非期望产出的索引和松弛变量； $\eta$ 为强度变量。

### 3.1.2 Dagum 基尼系数

Dagum 基尼系数及其分解方法能够有效解决样本数据间的交叉重叠等问题<sup>[32]</sup>。运用 Dagum 基尼系数及其分解方法可将中国保护性耕作农业生态效率总体差异分解为区域内差异贡献( $G_w$ )、区域间差异贡献( $G_{nb}$ )和组间超变密度贡献( $G_t$ )三部分。计算方法如下：

$$G = \frac{\sum_{b=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{r=1}^{n_h} |\pi_{bi} - \pi_{hr}|}{2\pi n^2} \quad (2)$$

$$G = G_w + G_{nb} + G_t$$

式中： $G$ 为总体基尼系数； $\pi_{bi}$ 、 $\pi_{hr}$ 分别为第 $b$ 、第 $h$ 组内省域 $i$ 与省域 $r$ 保护性耕作农业生态效率； $\bar{\pi}$ 为所有考察省域保护性耕作农业生态效率的加权平均值； $n$ 为考察省域的数量； $k$ 为考察总组数，本文分组为东部、中部、西部和东北地区4个组别； $n_b$ 和 $n_h$ 分别为第 $b$ 和第 $h$ 组内部省域数量。

### 3.1.3 收敛模型

经典收敛模型中的 $\alpha$ 收敛反映相对差异程度； $\beta$ 收敛反映随着时间推进，各省域间的差距在逐步缩小，最终达到同一稳态水平。 $\beta$ 收敛又分为绝对 $\beta$ 收敛和条件 $\beta$ 收敛，其中前者假设不同地区具有相同的资源禀赋、生产条件、财政支持等，随着时间推移，各地区将收敛于相同水平；后者则不考虑假设条件，各地区随时间将受各自地区多方面因素影响而最终收敛于各自稳定的水平。 $\alpha$ 收敛模型如下：

$$\alpha_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\pi_{i,t} - \bar{\pi}_t)^2}{n}} \quad (3)$$

式中： $\alpha_t$ 为保护性耕作农业生态效率的标准差； $t$ 为年份； $\alpha_t$ 值越大表明越多省域的保护性耕作农业生态效率与其平均值的差异较大。

经典 $\beta$ 收敛模型设定如下：

$$\ln \frac{\pi_{i,t+1}}{\pi_{i,t}} = \lambda + \beta \ln \pi_{i,t} + \sum_{a=1}^n \gamma_a \ln X_{a,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

式中： $\gamma_a$ 为各控制变量 $X_{i,t}$ 的估计系数；当 $\gamma_a = 0$ 时，以上模型为绝对 $\beta$ 收敛，否则为条件 $\beta$ 收敛； $\pi_{i,t}$ 和 $\pi_{i,t+1}$ 分别为省域 $i$ 第 $t$ 和 $t+1$ 年的保护性耕作农业生态效率； $\lambda$ 为截距项； $\varepsilon_{i,t}$ 为随机误差项。

$\beta$ 为收敛性的判断系数，公式为：

$$\beta = -(1 - e^{-\theta T})/T \quad (5)$$

式中： $\theta$ 为收敛速度； $T$ 为研究周期； $\beta < 0$ 表示趋于收敛，反之趋于发散。

地理学第一定律表明任何事物之间均是相关的，且距离越近事物的相关性越高<sup>[33]</sup>。鉴于保护性耕作农业生态效率可能存在空间依赖性，本文借鉴蔺鹏等<sup>[34]</sup>的研究，引入空间 $\beta$ 收敛模型(空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM))，并通过检验选择最优模型对中国保护性耕作农业生态效率的敛散性特征进行检验。具体模型构建如下：

SLM的 $\beta$ 收敛：

$$\ln \frac{\pi_{i,t+1}}{\pi_{i,t}} = \lambda + \beta \ln \pi_{i,t} + \chi \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln \frac{\pi_{j,t+1}}{\pi_{j,t}} + \sum_{a=1}^n \gamma_a \ln X_{a,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

SEM的 $\beta$ 收敛：

$$\ln \frac{\pi_{i,t+1}}{\pi_{i,t}} = \lambda + \beta \ln \pi_{i,t} + \sum_{a=1}^n \gamma_a \ln X_{a,i,t} + \varphi_{i,t};$$

$$\varphi_{i,t} = \sigma \sum_{j=1}^n W_{ij} \varphi_{j,t} + \varepsilon_{i,t}$$

SDM的 $\beta$ 收敛：

$$\ln \frac{\pi_{i,t+1}}{\pi_{i,t}} = \lambda + \beta \ln \pi_{i,t} + \chi \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln \frac{\pi_{j,t+1}}{\pi_{j,t}} + \sum_{k=1}^n \gamma_k \ln X_{k,i,t} + \phi_{i,t} \sum_{j=1, k=1}^n W_{i,j} \ln X_{k,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

式中： $\beta$ 为收敛系数； $\chi$ 为空间滞后系数； $W_{ij}$ 为空间权重矩阵(邻接矩阵)； $\varphi_{i,t}$ 为空间自相关的误差项； $\sigma$ 为回归系数； $\phi$ 为控制变量与空间权重矩阵的空间交互效应的回归系数。

## 3.2 投入产出数据的测算

### 3.2.1 投入指标

根据上述分析，保护性耕作农业的投入要素包括土地、劳动力、农药、化肥、灌溉、机械及柴油。其中，保护性耕作的作业面积及保护性耕作机械在历

2026年5月

年《中国农业机械工业年鉴》中有详细统计,投入要素劳动力、农药、化肥、灌溉和柴油在相关的统计数据中均为“传统耕作”和“保护性耕作”两种农业耕作方式下要素投入的总和,而保护性耕作农业生态效率评价指标体系中各项投入产出的数据均应为保护性耕作生产方式下的投入和产出,因此,本文基于相关统计数据构建了从农业生产要素总投入中“剥离”保护性耕作生产要素投入的方法。其基本思路是,以传统耕作农业和保护性耕作农业的播种面积为基础,基于两种耕作方式下要素投入的比例系数,采用系数比例法将保护性耕作农业要素从总要素投入中分离出来。具体如下:以传统耕作农业的生产要素投入为参照,假设其投入为1,则保护性耕作农业的要素投入比例为 $(1 + \partial_{iq})$ ,其中, $\partial_{iq}$ 为省域*i*保护性耕作农业要素*q*的投入相对传统耕作农业的增减比例,该参数来源于已有研究结果(表2)。再假设投入要素*q*在传统耕作农业下单位面积的使用量为 $A_{iq}$ ,则投入要素*q*在保护性耕作农业下单位面积的使用量为 $(1 + \partial_{iq}) \times A_{iq}$ 。在实际农业生产中,省份*i*的农作物播种面积为传统耕作播种面积 $S_i^T$ 和保护性耕作播种面积 $S_i^{CT}$ , $I_{iq}$ 为省份*i*要素*q*的实际投入量,那么,保护性耕作农业的生产要素投入量 $CTI_{iq}$ 计算公式如下:

$$CTI_{iq} = I_{iq} \times (1 + \partial_{iq}) \times S_i^{CT} / (1 \times S_i^T + (1 + \partial_{iq}) \times S_i^{CT}) \quad (9)$$

### 3.2.2 产出指标

保护性耕作农业的产出包括粮食产量、土壤碳汇、碳排放和面源污染。其中,保护性耕作农业的土壤碳汇和碳排放测算参考薛彩霞等<sup>[4]</sup>和童荣鑫等<sup>[42]</sup>的方法进行测算,由农业化学要素投入产生的碳排放与面源污染、水稻作物产生的温室气体排放测算分别参考田云等<sup>[43]</sup>及闵继胜等<sup>[44]</sup>的方法进行测算,保护性耕作农业的粮食产量则需要采用“剥离”方式从粮食总产量中进行分离。

关于保护性耕作对粮食生产效应的影响,研究显示,免耕大多表现为减产<sup>[26]</sup>,秸秆还田基本表现为增产<sup>[45]</sup>,而且两种措施同时采用时存在协同效应,即秸秆还田对免耕的减产具有减缓效应<sup>[4]</sup>。基于此,本文剥离保护性耕作农业粮食产量的基本思路是,以传统耕作和保护性耕作的作业面积为基础,基于不同耕作方式下各省份粮食生产效应的系统实验数据,兼顾保护耕作农业两种措施粮食生产效益的差异性与协同效应,采用系数比例法将保护性耕作粮食产量从总粮食产量中“剥离”出来。具体如下:首先,构建保护性耕作和传统耕作的粮食产量比例系数。假定省份*i*在传统耕作农业下单位面积的粮食产量为1,则保护性耕作下实施免耕、秸秆还田及免耕+秸秆还田单位面积的粮食产量分别为 $(1 + \mu_i^{NT})$ 、 $(1 + \mu_i^{SR})$ 和 $(1 + \mu_i^{NS})$ , $\mu_i^{NT}$ 、 $\mu_i^{SR}$ 和 $\mu_i^{NS}$ 分别表示相对于传统耕作,免耕、秸秆还田和免耕+秸秆还田的粮食增减产系数,该参数来源于张雄智等<sup>[46]</sup>、王晓娟等<sup>[47]</sup>、周子军等<sup>[48]</sup>、李舟<sup>[49]</sup>及何进等<sup>[50]</sup>的研究。其次,运用系数比例法对保护性耕作农业的粮食产量进行剥离。假设 $P_i$ 为省份*i*的两种耕作方式下的粮食总产量, $S_i^T$ 、 $S_i^{NT}$ 、 $S_i^{SR}$ 和 $S_i^{NS}$ 分别为省份*i*实施传统耕作、免耕、秸秆还田和免耕+秸秆还田的作业面积,对保护性耕作农业的粮食产量测算公式为:

$$CTP_i = \frac{P_i \times ((1 + \mu_i^{NT}) \times S_i^{NT} + (1 + \mu_i^{SR}) \times S_i^{SR} + (1 + \mu_i^{NS}) \times S_i^{NS})}{1 \times S_i^T + (1 + \mu_i^{NT}) \times S_i^{NT} + (1 + \mu_i^{SR}) \times S_i^{SR} + (1 + \mu_i^{NS}) \times S_i^{NS}} \quad (10)$$

### 3.3 数据来源及处理

本文以中国30个省份为研究样本(因数据缺失,不包括西藏及港澳台地区),时间跨度为2002—2022年。根据上述理论分析,本文引入农业支持政策(包括保护性耕作推广强度(表3)和财政支农水平)、社会经济发展(农业经济发展水平、农村人均收入水平和农村人力资本)、农业生产特征(种植结构、农业规模化水平和农业受灾率)3个方面的变量

表2 保护性耕作下农业生产投入要素增减情况

Table 2 Increase and decrease of agricultural production input factors under conservation tillage

投入变量	平均增减比例/%	文献类型	投入变量	平均增减比例/%	文献类型
劳动力	-41.286	微观调研;实证研究;田间实验 <sup>[21,35,36]</sup>	灌溉	-21.188	综述;实证研究;田间实验 <sup>[39,40]</sup>
农药	35.000	田间实验 <sup>[37,38]</sup>	柴油	-28.750	综述;田间实验 <sup>[39,41]</sup>
化肥	-16.520	综述;田间实验 <sup>[39]</sup>			

注:增减比例是指保护性耕作较传统耕作而言,在实际农业生产活动过程中生产要素投入量的增减比例。

表3 各变量描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of variables

变量名称	变量代码	变量说明	单位	均值	标准差	最小值	最大值
保护性耕作农业生态效率	$\pi$	运用含非期望产出的超效率SBM模型测算所得	—	0.645	0.272	0.256	1.339
保护性耕作推广强度	CTPI	保护性耕作作业面积/农作物播种总面积	—	0.298	0.277	0.003	1.000
财政支农水平	FSA	农林水事务支出/地方财政一般预算支出×100%	%	10.301	3.381	2.133	20.384
农业经济发展水平	AGDP	农业总产值/年末常住人口	元/人	3551.216	2530.916	522.397	16136.160
农村人均收入水平	INCOME	农村居民人均纯收入	元	10854.010	7723.006	1535.000	44616.120
农村人力资本	EDU	(农村小学人数×6+农村初中人数×9+农村高中人数×12+农村高中及以上人数×16)/农村6岁以上总人数	年	7.672	0.990	5.148	12.542
种植结构	PLANT	小麦玉米水稻播种面积/粮食播种面积	—	0.789	0.142	0.359	0.987
农业规模化水平	SCALE	农作物播种面积/农林牧渔从业人员数	千hm <sup>2</sup> /万人	7.104	3.975	2.088	29.837
农业受灾率	ADR	农业受灾面积/农作物总播种面积×100%	%	20.415	15.144	0.000	93.592

注：样本数为630。

作为分析保护性耕作农业生态效率收敛性的控制变量。各变量数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国农业机械工业年鉴》、各省统计年鉴以及国家统计局数据网站,部分缺失数据采用插值法补齐。对于经济类指标,使用各省GDP平减指数折算为以样本初期2002年为基期的实际变量,以使其具有可比性。各变量描述性统计见表3。

## 4 结果与分析

### 4.1 保护性耕作农业生态效率的动态演进特征

#### 4.1.1 时序特征分析

图3为2002—2022年全国及分区保护性耕作农业生态效率随时间的变化情况。全国层面,保护性耕作农业生态效率值介于0.561~0.772,整体呈

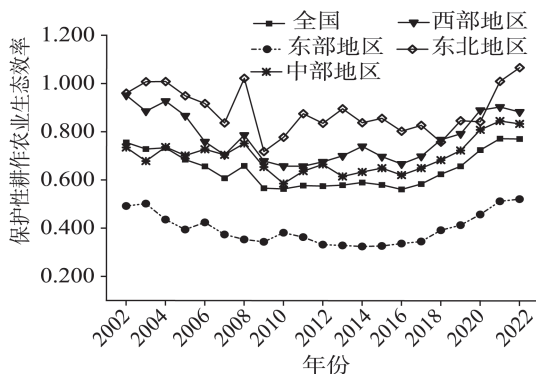


图3 2002—2022年全国及各区域保护性耕作农业生态效率的时序变化

Figure 3 Temporal changes in agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China and its regions, 2002-2022

“波动下降(2002—2010年)—平稳(2011—2015年)—上升(2016—2022年)”的U型变化趋势,时间转折点分别为2010年和2016年。这与保护性耕作技术进步、农业种植结构变化以及保护性耕作推广政策调整等有关。2002—2010年,保护性耕作技术经历了由“试验探索阶段”到“项目示范阶段”的发展历程;2010年中央一号文件中明确提出“推广保护性耕作”,保护性耕作技术进入“全面推广阶段”;2015年国家开始实施《到2020年化肥/农药使用量零增长行动》,这一举措推动了农作物化肥和农药用量的下降,保护性耕作农业生态效率由此提升。

从分区层面来看,东、中、西及东北地区保护性耕作农业生态效率随时间整体均表现为“先减后增”的U型变化趋势,并在后期保持继续增长的潜力。其中,东北地区位居首位,其平均值为0.888,其次是西部地区(0.776),中部地区平均值为0.697,位居第三。可以发现,这3个区域的保护性耕作农业生态效率均高于全国平均水平(0.645),表明中国保护性耕作农业生态效率水平整体较高,意味着保护性耕作在全国范围内具有良好的社会经济生态效益,坚持保护性耕作实践能够为提升农业生产效率、质量和环境友好性提供有力支持,并有助于实现农业可持续发展目标。需要注意的是,东部地区保护性耕作农业生态效率均值为0.398,低于全国平均水平。可能的原因是,东部地区经济发展水平较高,且以二三产业为主要发展产业,因而其可能对农业的投入和关注较低,加之种植结构与中西部地

2026年5月

区存在差异,且保护性耕作技术最早应用于以小麦玉米为主要种植作物的西北旱作区。

#### 4.1.2 空间特征分析

借鉴现有文献中农业生态效率水平的等级划分标准<sup>[5]</sup>,同时根据2002—2022年全国保护性耕作农业生态效率值,本文将保护性耕作农业生态效率划分为低效率((0, 0.40])、较低效率((0.40, 0.60])、中效率((0.60, 0.80])、高效率((0.80, 1))和超效率([1, +∞))5种类型;然后利用ArcGIS软件对2002年、2008年、2015年和2022年保护性耕作农业生态效率进行空间可视化(图4)。

由图4可知,全国保护性耕作农业生态效率整体呈“西高东低、北高南低”的空间分布格局。2002年,东北地区的黑龙江和吉林、中部地区的山西和江西,以及西部地区的内蒙古、新疆、甘肃、宁夏、青海、重庆和贵州等省份的效率值均已达到前沿面水平。辽宁和上海的效率值超过了0.80,属于高效率

水平。东部地区的北京、天津、河北、江苏、浙江和山东的效率值不足0.40,属于低效率水平。2008年处于超效率水平的省份个数较2002年有所下降,这可能与气候条件变化、缺乏保护性耕作种植经验等有关。东部地区除上海外的其他9个省份的效率值均未超过0.40,仍处于低效率状态。相比2008年,2015年的整体效率再次下降,可能的原因在于,尽管保护性耕作技术在此期间得到大面积推广,但农民对保护性耕作技术的认知和种植经验不足。同时,传统耕作模式的“多投入、多产出”观念根深蒂固,导致保护性耕作技术的实施效果不佳,从而限制了效率提升。2022年全国保护性耕作农业生态效率增幅明显,在空间上表现为“西高-东低”两极分化状态。东部地区除天津和山东外,其他8个省份的效率值均不足0.40,处于低效率状态。

需要注意的是,东北地区保护性耕作农业生态效率在研究期间整体较高。原因一是东北地区以

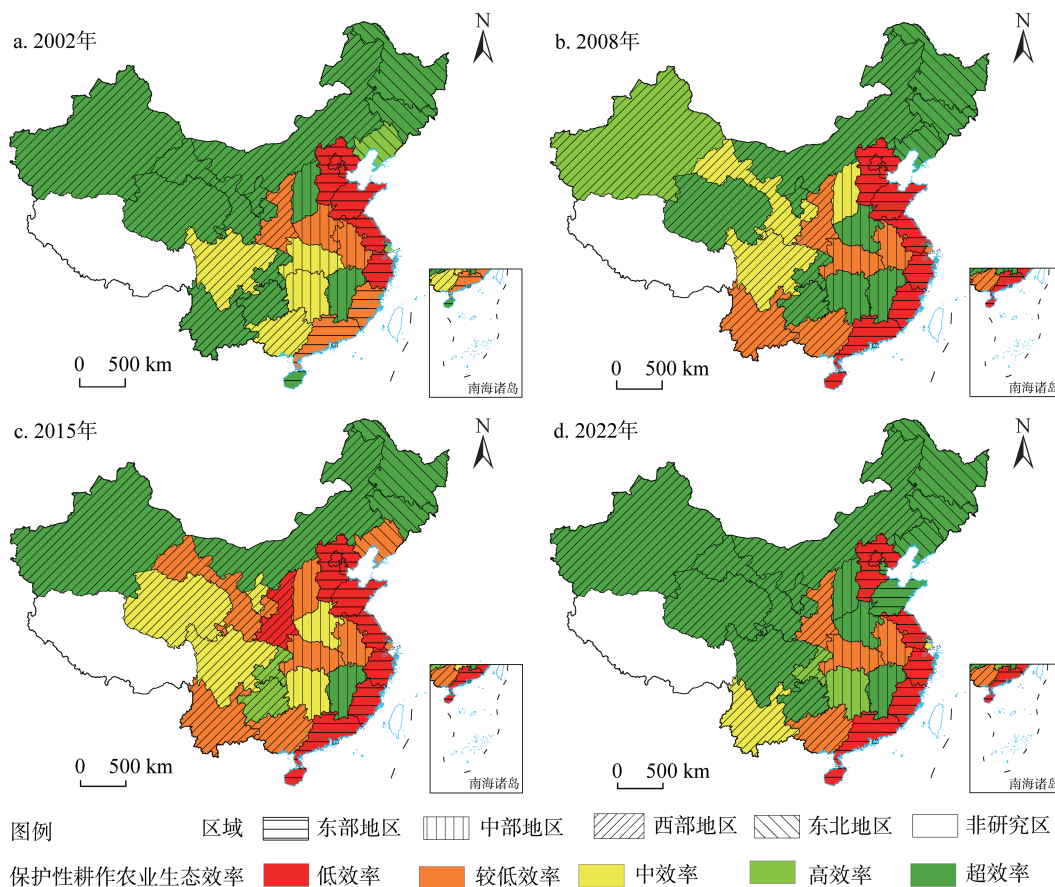


图4 2002、2008、2015和2022年全国保护性耕作农业生态效率的空间分布

Figure 4 Spatial distribution of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China in 2002, 2008, 2015, and 2022

注:该图基于自然资源部审图号为GS(2020)1827号的标准地图制作,底图无修改。

黑土地为主,其土壤质量较好,同时东北地区气候条件更适宜保护性耕作的开展,如冬季覆盖作物可以有效保护土壤并改善土壤结构。二是国家政策的支持和农民对土地保护意识的增强。2020年农业农村部财政部印发的《东北黑土地保护性耕作行动计划实施指导意见》中明确提出“要深入实施东北黑土地保护性耕作行动计划”。随着环保意识的提高,当地农民也更加重视保护性耕作的实践和应用。据《中国农业机械工业年鉴》统计数据显示,东北地区保护性耕作作业面积和保护性耕作机械水平分别由2002年的4638.38千 $\text{hm}^2$ 和673.46万 $\text{kW}$ 增加至2022年的20047.22千 $\text{hm}^2$ 和2150.86万 $\text{kW}$ ,年均增长率分别为7.90%和5.90%。

## 4.2 保护性耕作农业生态效率的区域差异特征

### 4.2.1 总体差异

图5a显示,研究期间全国保护性耕作农业生态效率的基尼系数范围在0.195~0.251之间,整体呈“波动上升(2002—2013年)—波动下降(2014—2022年)”的变化态势,波动幅度较小,表明全国保护性耕作农业生态效率存在空间非均衡性,且这些差异随时间呈现先扩大后缩小的特征,意味着在全国范围内实施保护性耕作时需要考虑地区间的差异。

### 4.2.2 区域内差异

分区域来看,东、中、西及东北地区的内部差异存在异质性(图5a)。其中,东部地区基尼系数由2002年的0.254波动降至2009年的0.087,而后又波动升至2022年的0.248,历年均值为0.145,波动幅度较大。中部地区变化相对平稳,其历年均值(0.164)相对较高,但低于全国平均水平(0.226),表明中部地区是全国保护性耕作农业生态效率内部差异相对较大的区域。西部和东北地区均随时间呈“先升后降”的倒U型变化态势,其中,西部(0.140)大于东北地区(0.078),但前者变化较平稳,后者变化幅度较大,表明西部地区的内部差异大于东北地区。

从变化趋势来看,中、西和东北地区基尼系数表现出以2010年和2018年为分界线的两节点三阶段演变格局。具体而言,2002—2010年均呈上升趋势,其中中部>西部>东北地区;2010—2018年变化较为平稳,表现为西部和中部地区交替变化,东北地区位居最后;2018—2022年基尼系数开始出现下降,但同样表现为中部>西部>东北地区,表明各区域内部差异较大,但差异随时间在缩小。究其原因,2010年国家开始大面积推广保护性耕作技术,

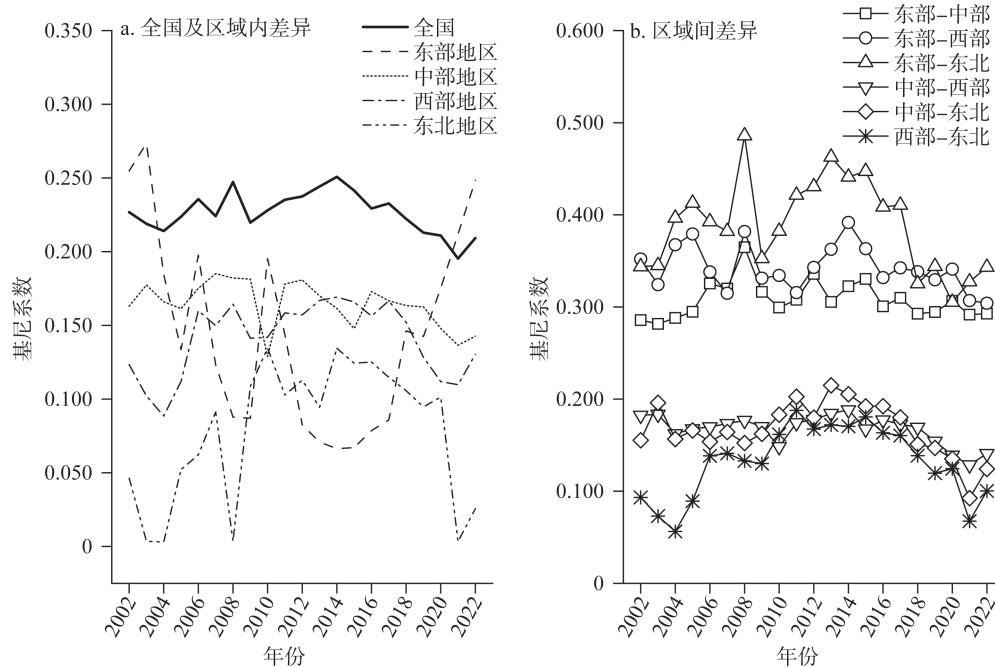


图5 2002—2022年全国保护性耕作农业生态效率的差异变化

Figure 5 Changes in differences of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China, 2002-2022

2026年5月

然而,由于各地区推广的起步时间和发展速度不同,各地区农民对新技术的掌握和适应能力存在差异。此外,这种差异还与地域差异、基础设施和资源投入差异、政策执行,以及农民素质和技术接受度的不同等有关。

#### 4.2.3 区域间差异

图5b刻画了不同区域间保护性耕作农业生态效率差异的演变趋势。可以看出,东部与其他3个区域之间的平均基尼系数均显著高于全国平均水平(0.226),表明推动全国内部保护性耕作农业生态效率的空间均衡性发展应重点关注东部地区保护性耕作农业的发展情况。中、西部与东北区域间的基尼系数基本在0.056~0.214之间,整体变化较平稳,但自2018年开始,区域间基尼系数趋于相近且均呈下降趋势,表明中、西部与东北地区之间保护性耕作农业生态效率随时间在逐渐趋于均衡。为促进区域间保护性耕作农业生态效率均衡性和适宜性发展,未来还需不断深化政策措施改革,同时加强保护性耕作技术支持、农科人才引进以及优化资源配置。

#### 4.2.4 差异来源分析

采用Dagum基尼系数将全国保护性耕作农业

生态效率的差异分解为区域内、区域间及组间超变密度(图6)。从差异贡献来看,区域内、区域间和组间超变密度平均贡献值和贡献率依次为0.041和18.18%、0.150和66.06%、0.035和15.76%,说明区域间差异是构成全国保护性耕作农业生态效率空间非均衡性的主要来源。从时序变化特征来看,区域间差异贡献值由2002年的0.143下降至2022年的0.127,降幅11.20%,其贡献率介于57.65%~77.43%。区域内差异和组间超变密度差异的贡献值均相对较小,分别介于0.033~0.047和0.014~0.052之间,其中,前者变化较稳定,贡献率位于20.00%附近;后者随时间呈小幅波动上升,但贡献率相对较低,均值不足16.00%。

### 4.3 保护性耕作农业生态效率的收敛性分析

#### 4.3.1 $\alpha$ 收敛性分析

图7为全国及分区保护性耕作农业生态效率的 $\alpha$ 收敛结果。全国层面,保护性耕作农业生态效率的 $\alpha$ 统计值呈小幅波动下降态势,整体呈现 $\alpha$ 收敛特征,意味着全国省际间差异在缩小。分区层面,东部地区 $\alpha$ 统计值随时间呈波动态势,不存在 $\alpha$ 收敛。中部地区 $\alpha$ 统计值呈小幅波动下降趋势,存在 $\alpha$ 收敛,说明省际间保护性耕作农业生态效率水平逐

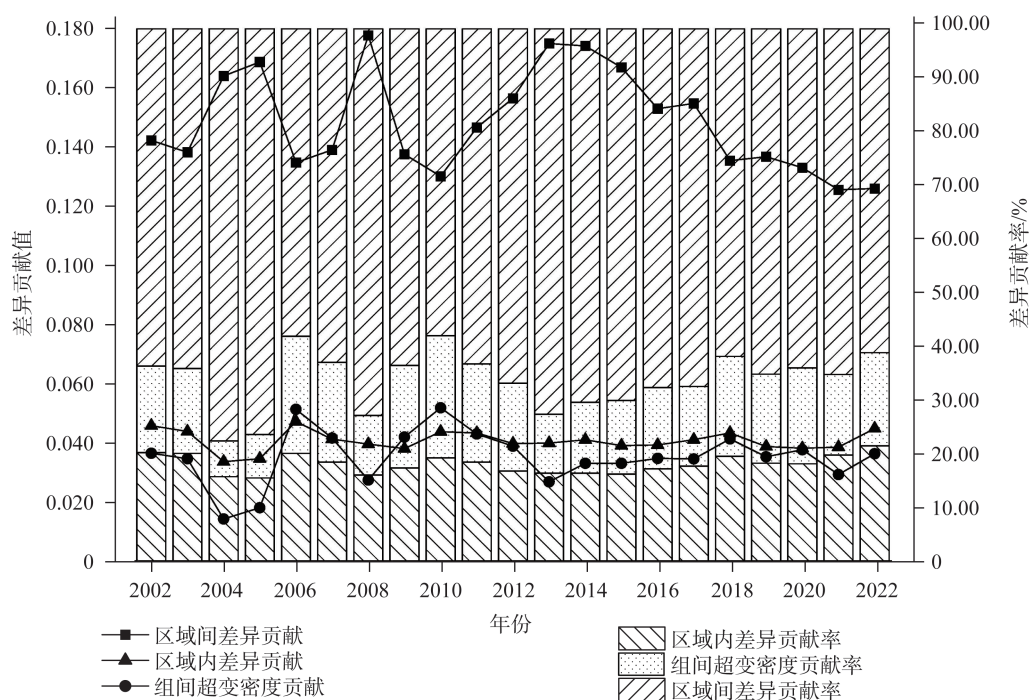


图6 2002—2022年保护性农业生态效率的Dagum基尼系数及其来源的时序变化

Figure 6 Temporal changes in Dagum Gini coefficient and its sources for agricultural eco-efficiency of conservation tillage, 2002-2022

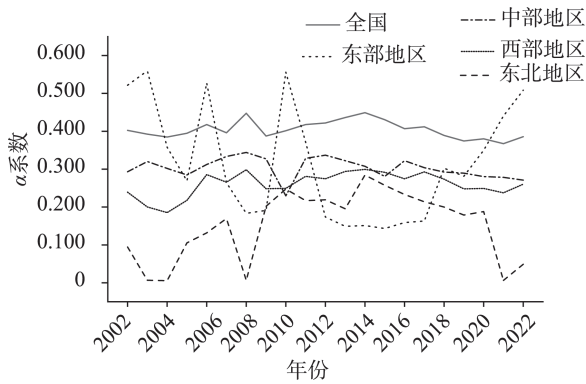


图7 2002—2022年全国及分区保护性耕作农业生态效率的 $\alpha$ 系数演变

Figure 7 Evolution of  $\alpha$  coefficient of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China and its regions, 2002-2022

步趋同。西部地区整体呈小幅上升态势,东北地区 $\alpha$ 统计值随时间呈倒U型变化,表明均不存在 $\alpha$ 收敛,即西部和东北地区省际间效率差距未出现缩小趋势。

4.3.2  $\beta$ 收敛性分析

(1) Moran's  $I$ 指数分析

对于经典 $\beta$ 收敛的模型类型选择,依据Hausman检验选择固定效应模型检验保护性耕作农业生态效率的绝对收敛和条件收敛。对于空间 $\beta$ 收敛模型的类型选择,首先采用全局莫兰指数方法对全国保护性耕作农业生态效率进行空间自相关性检验。如表4结果所示,全国莫兰指数始终为正且通过了5%的显著性水平检验,表明其存在显著的空间正自相关性特征。

(2)绝对 $\beta$ 收敛分析

由表5可知,除东部地区外,全国、中、西部及东北地区均存在绝对 $\beta$ 收敛,其估计系数 $\beta$ 值均为负,且均通过了10%的显著性水平检验,说明在不考虑社会经济等其他因素时,长期来看低效率省份存在追赶效应。从收敛速度来看,经典模型下,西部地区收敛速度最快(0.116),其次是东北地区(0.108),表明西部和东北地区将更早收敛到其稳态水平,这主要得益于国家出台的保护性耕作推广政策,如东北地区的黑土地保护利用试点补贴为秸秆还田、免耕等保护性耕作技术的采纳提供了资金支持。西部地区则与保护性耕作技术最早应用于旱区农业有关。考虑空间因素后,收敛速度有所下降(0.094>0.091,0.108>0.107),这主要源于空间异质性,如地区间自然地理条件差异大,不同土壤、气候和地形使保护性耕作技术应用效果不同。需要注意的是,上述分析是在各地区经济发展、人力资本、财政投入等水平相似的假定条件下,但实际上并非如此,因此需要进一步进行条件 $\beta$ 收敛检验。

(3)条件 $\beta$ 收敛分析

由表6可知,第一,除东部地区外,全国、中、西及东北地区的 $\beta$ 收敛系数均为负,且均通过了1%的显著性水平检验,表明全国、中、西及东北地区均存在条件 $\beta$ 收敛,意味着在考虑了农业经济发展、人力资本、财政投入等因素之后,长期来看保护性耕作农业生态效率收敛于稳态水平的趋势依然存在。第二,从收敛速度来看,全国及分区条件 $\beta$ 收敛速度较绝对 $\beta$ 收敛速度有所加快,表明保护性耕作农

表4 2002—2022年中国保护性耕作农业生态效率全局Moran's  $I$

Table 4 Moran's  $I$  of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China, 2002-2022

年份	Moran's $I$	Z统计量	P值	年份	Moran's $I$	Z统计量	P值
2002	0.346	3.034	0.002	2013	0.434	3.768	0.000
2003	0.391	3.385	0.001	2014	0.393	3.414	0.001
2004	0.476	4.062	0.000	2015	0.391	3.414	0.001
2005	0.504	4.276	0.000	2016	0.332	2.946	0.003
2006	0.270	2.419	0.016	2017	0.337	2.981	0.003
2007	0.229	2.112	0.035	2018	0.260	2.346	0.019
2008	0.321	2.822	0.005	2019	0.292	2.597	0.009
2009	0.307	2.736	0.006	2020	0.265	2.373	0.018
2010	0.280	2.523	0.012	2021	0.236	2.151	0.032
2011	0.338	2.990	0.003	2022	0.250	2.260	0.024
2012	0.390	3.404	0.001				

2026年5月

表5 全国及分区保护性耕作农业生态效率的绝对 $\beta$ 收敛Table 5 Absolute  $\beta$  convergence of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China and its regions

变量	全国		东部地区	中部地区		西部地区	东北地区	
	OLS	SEM	OLS	OLS	SDM	OLS	OLS	SDM
$\ln\pi$	-0.311*** (0.071)	-0.310*** (0.029)	-0.151 (0.108)	-0.296*** (0.068)	-0.279*** (0.087)	-0.504*** (0.101)	-0.414* (0.040)	-0.403*** (0.149)
$C$	-0.167*** (0.038)		-0.146 (0.107)	-0.119*** (0.029)		-0.159*** (0.031)	-0.057*** (0.006)	
$\rho$		0.104* (0.001)			-0.050 (0.101)			-0.049 (0.104)
$LR$ spatial	107.158*** 0.000		25.836*** 0.004		19.054*** 0.004	59.739*** 0.000		7.329* 0.062
$LR$ time	115.771*** 0.000		45.944*** 0.000		37.035** 0.011	79.26*** 0.000		43.131*** 0.002
$LM$ Spatial lag		2.405 0.121	0.122 0.726		11.702*** 0.001	1.727 0.189		4.533** 0.033
Robust $LM$ Spatial lag		0.024 0.875	0.187 0.665		0.035 0.851	0.145 0.703		0.011 0.913
$LM$ Spatial error		2.765 0.096	0.076 0.783		12.231*** 0.000	2.273 0.132		4.711** 0.030
Robust $LM$ Spatial error		0.385 0.535	0.141 0.707		0.565 0.452	0.691 0.406		0.190 0.663
时间固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
$R^2$	0.121	0.123	0.304	0.369	0.387	0.443	0.621	0.634
收敛速度	0.096	0.096	0.068	0.094	0.091	0.116	0.108	0.107
样本数	600	600	200	120	120	220	60	60

注: 括号内为稳健标准误; 表格中第二行未加括号的为 $P$ 值。\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%、10%的水平下显著。下同。

业生态效率的收敛趋势与经济发展、资源禀赋及政策导向等因素息息相关,这与实际相符。第三,加入控制变量后,不同区域控制变量对保护性耕作农业生态效率的增长影响各异。保护性耕作推广强度在东部地区表现为正向促进作用,而在中部地区表现为负向抑制作用,究其原因,东部地区可能与其高效的资源配置和现代化农业经营模式等有关;中部地区推广强度的增加在短期内可能由于技术适应性、区域非适配性、管理水平以及生态环境适应问题等因素,导致保护性耕作农业生态效率增长受到抑制。财政支农水平的影响有正有负,其中部地区为正向促进作用,但在东部和东北地区为显著抑制作用,这可能与地方财政支农资金的结构配置不同有关,中部地区多为粮食主产区,其财政支农主要定位于农田生态安全等“公共物品”<sup>[52]</sup>,

其通过资金结构优化可以实现外部性内部化;东部和东北地区大部分财政支农资金可能多用于农药、化肥和农机补贴,导致农业碳排放增加,从而不利于保护性耕作农业生态效率的增长。农村人均收入水平仅在中部地区表现为显著正向促进作用,当收入提高时,农民愿意投入更多的资金来调整保护性耕作农业生产实践中的资源配置,进而促进保护性耕作农业生态效率的增长。农村人力资本在东部地区表现为负向抑制作用,而在东北地区为正向促进作用。可能的原因是,东部地区工业化程度高,高人力资本的农户倾向于从事非农产业,农村“兼业化”现象普遍;东北地区作为国家粮食安全的“压舱石”,其正向效应则得益于东北地区专业化人力资本集聚、规模化经营优势与国家保护性耕作政策赋能<sup>①</sup>。

①  $\beta$ 收敛稳健性检验结果可向作者索取。

表6 全国及分区保护性耕作农业生态效率的条件 $\beta$ 收敛Table 6 Conditional  $\beta$  convergence of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China and its regions

变量	全国	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
	OLS	OLS	SEM	OLS	SDM
$\ln\pi$	-0.327*** (0.068)	-0.070 (0.052)	-0.390*** (0.067)	-0.514*** (0.113)	-0.660*** (0.121)
$\ln CTPI$	-0.022 (0.014)	0.030* (0.015)	-0.110*** (0.038)	-0.041 (0.026)	0.045 (0.046)
$\ln FSA$	-0.043 (0.048)	-0.048* (0.025)	0.306*** (0.103)	-0.021 (0.091)	-1.092*** (0.241)
$\ln AGDP$	-0.048 (0.031)	-0.007 (0.022)	-0.218 (0.172)	-0.075 (0.087)	0.310 (0.237)
$\ln INCOME$	0.152 (0.158)	0.005 (0.023)	0.545* (0.323)	-0.015 (0.323)	1.051 (1.797)
$\ln EDU$	0.034 (0.207)	-0.475** (0.179)	-0.480 (0.394)	0.212 (0.209)	3.217* (1.878)
$\ln PLANT$	0.109* (0.056)	0.291* (0.157)	-0.770** (0.374)	0.162 (0.129)	0.323 (0.405)
$\ln SCALE$	0.029 (0.041)	-0.031 (0.022)	-0.029 (0.087)	0.006 (0.114)	0.649** (0.261)
$\ln ADR$	0.003 (0.004)	0.004 (0.004)	0.074*** (0.021)	-0.008 (0.019)	0.030 (0.032)
$C$	-1.214 (1.291)	1.148 (0.681)		0.191 (2.762)	
$\rho$			-0.633*** (0.097)		-0.236** (0.092)
$LR$ spatial	97.004*** 0.000	7.024 0.723	25.001*** 0.000	58.174*** 0.000	13.915*** 0.003
$LR$ time	83.049*** 0.000	34.857** 0.020	30.878* 0.057	59.402*** 0.000	53.378*** 0.000
$LM$ Spatial lag	2.229 0.135	0.099 0.753	14.045*** 0.000	2.025 0.155	4.518*** 0.034
Robust $LM$ Spatial lag	0.008 0.925	0.934 0.334	0.128 0.720	0.149 0.699	0.020 0.887
$LM$ Spatial error	2.330 0.127	0.312 0.576	16.688*** 0.000	1.884 0.170	5.745*** 0.017
Robust $LM$ Spatial error	0.109 0.740	1.147 0.284	2.771* 0.096	0.008 0.927	1.246 0.264
时间固定效应	是	是	是	是	是
个体固定效应	是	否	是	是	是
$R^2$	0.305	0.321	0.712	0.464	0.668
收敛速度	0.101	0.044	0.109	0.121	0.133
样本数	600	200	120	220	60

2026年5月

## 5 讨论、结论及政策建议

### 5.1 讨论

农业生态效率是定量刻画农业可持续发展的重要指标,已成为乡村全面振兴的重要议题之一<sup>[53,54]</sup>。与传统耕作相比,保护性耕作具有节本增效和固碳减排的双重经济-生态效益,探究保护性耕作方式下的农业生态效率,对于落实国家“藏粮于地、藏粮于技”战略、助力国家“双碳”目标具有重要意义。不同于以往研究<sup>[4-6,11,12,28]</sup>,首先,本文从耕作方式视角出发,重点探究保护性耕作方式下的农业生态效率情况,突破了以往“混合”农业生态效率未区分不同耕作方式农业生态效率差异的局限性。其次,本文综合考虑了保护性耕作碳汇碳源的双重特征,并将保护性耕作的固碳减排效应纳入农业生态效率评价指标体系框架内,弥补了以往单维度仅将农业碳排放纳入非期望产出中的不足。再次,基于文献中田间试验、农户微观调研的数据,采用农业生态效率这一指标对保护性耕作农业的“粮食生产”和“生态环境”的效应从宏观层面进行综合量化,拓展了农业生态效率的应用场景。

时空分布结果显示(图3和图4),全国保护性耕作农业生态效率水平整体较高,呈“西高东低、北高南低”的空间分布,尤以东北地区最高,东部地区最低,这种区域异质性与中国粮食主产区分布和农业资源禀赋差异高度相关<sup>[55]</sup>。东北地区是中国重要的粮食生产基地,凭借土壤肥沃的优势,更易推广规模化保护性耕作技术,从而实现农业生态与生产效益的“双赢”,这也为保护性耕作助力实现“藏粮于地”战略中保护黑土地、提升耕地质量提供了实践支撑。东部地区则由于工业化程度高、土地细碎化严重,导致保护性耕作推广面临成本高、技术适配性差等挑战。Dagum基尼系数结果表明区域间差异是全国保护性耕作农业生态效率空间非均衡性的主要来源(图6),尤以东部与其他区域间差异最显著(图5b),这种空间分异本质上是工业化进程中生产要素“虹吸效应”与农业功能“挤出效应”共同作用的结果,未来可尝试构建区域保护性耕作生态补偿机制以平衡区域之间的利益关系。 $\beta$ 收敛特征表明(表6),在外部条件优化下,后发地区存在明显“追赶效应”,未来可以通过建立跨区域协作机制来引导高效率地区经验向薄弱地区流动,加强地区间

保护性耕作生产实践的交流与合作。

然而,本文仍存在以下不足之处:在剥离保护性耕作农业投入、产出以及量化其固碳减排效应的过程中,受限于数据获取,相关系数和碳汇/碳排放参数是基于已有田间试验的系统测度结果和已有文献的研究结果,包括省域和区域两个层面的数据,研究结果的精确性有待提高。鉴于此,未来需要通过地理信息系统数据解译、作物生产模型构建等方式进一步确定不同省域以及更小研究单元的保护性耕作实际碳排放系数、固碳能力以及实际农业生产投入要素的使用量。

### 5.2 结论

基于耕作方式视角,本文采用含非期望产出的超效率SBM模型对中国30个省份2002—2022年保护性耕作农业生态效率进行测度,并采用Dagum基尼系数和收敛模型分析其动态演进、区域差异及收敛性特征。主要结论如下:

(1)全国及各区域保护性耕作农业生态效率均随时间呈“先减后增”的U型变化态势,且整体维持在较高水平。但各区域之间存在异质性,表现为东北地区最高,其次是西部、中部,东部地区最低。从空间分布来看,全国保护性耕作农业生态效率呈现“西高东低、北高南低”的格局,空间差异特征明显。

(2)全国保护性耕作农业生态效率的基尼系数呈“先升后降”的趋势。从区域内来看,东部地区差异最大;在2002—2010年为中部>西部>东北地区,在2010—2022年为西部>中部>东北地区。从区域间来看,东部与其他区域间差异明显大于中-西、中-东以及西-东北地区间差异,并且区域间差异始终是其空间非均衡性的主要来源。

(3)从全国来看,中国保护性耕作农业生态效率的差距在缩小,低效率地区追赶明显,且外部条件趋同会加快这一过程;从各区域来看,只有中部地区各省份间的差距在缩小;西部、中部和东北地区的低效率省份均呈现追赶态势,且控制外部因素后追赶速度更快。

### 5.3 政策建议

基于上述研究结论,本文提出如下政策建议:

(1)优化保护性耕作推广政策,健全保护性耕作长效发展机制。研究结果显示,全国保护性耕作农业生态效率整体水平较高,因此,政府未来应继

续设立保护性耕作专项补贴资金,同时可以提供财政奖励或者生态补偿金以鼓励农民采用保护性耕作实践。此外,政府还可以联合地方非政府机构部门(如企业、合作社等)、村集体等相关利益群体,逐步建立起以保护性耕作技术为主的农机社会化服务主体,推动保护性耕作规模化、规范化发展,最终在地方建立起保护性耕作长效发展机制。

(2)立足空间非均衡性发展,因地制宜推广保护性耕作。研究显示,全国保护性耕作农业生态效率空间差异显著,且区域间差异是影响全国保护性耕作农业生态效率空间非均衡性的主要原因,因此,在国家政策背景下,政府应结合各地区经济发展情况、地形地势等自然地理条件,积极联合当地科研机构,鼓励农业科技人才创新研发适宜性保护性耕作农机具,以达到因地制宜、因机制宜的效果。同时,政府可以依托各地区保护性耕作示范项目,进而为当地农民提供参考和实践指导,最终推动实现不同地区保护性耕作经济-生态效益最大化和农业生态效率最优化。

(3)加强地区农业生产交流合作,建立保护性耕作经济-生态效益的联动机制。 $\beta$ 收敛结果显示除东部地区外,中、西及东北地区的低效率省份表现出明显的追赶效应,且该效应受邻近地区经济发展、资源禀赋等因素的影响。因此,地方政府在关注自身保护性耕作农业生产的同时,还应考虑邻近地区在资源禀赋、经济发展水平、作物种植结构等方面的差异性以及其是否对本地区产生了影响,从而在保护性耕作农业生产管理方面形成“辐射带动(自身高,周边低时)或积极借鉴(自身低,周边高时)邻近地区”的交流合作模式,不断寻求自身保护性耕作下农业生产效率与环境效益协调统一的均衡点,最终建立完备的保护性耕作经济-生态效益的联动机制。

### 参考文献(References):

- [1] 刘东,冯晓龙,司伟.中国粮食生产的气候变化适应水平及其机制研究[J].经济学(季刊),2024,24(5):1516-1532.[Liu D, Feng X L, Si W. The adaptation level and mechanism of grain production to climate change in China[J]. China Economic Quarterly, 2024, 24(5): 1516-1532.]
- [2] 于法稳.气候韧性农业:内涵特征、理论阐释及推进策略[J].中国特色社会主义研究,2024,(6):52-62.[Yu F W. Climate-resilient agriculture: Connotation and characteristics, theoretical explanation and promotion strategies[J]. Studies on Socialism with Chinese Characteristics, 2024, (6): 52-62.]
- [3] IPCC. Climate change and land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [4] 薛彩霞,李园园,胡超,等.中国保护性耕作净碳汇的时空格局[J].自然资源学报,2022,37(5):1164-1182.[Xue C X, Li Y Y, Hu C, et al. Study on spatio-temporal pattern of conservation tillage on net carbon sink in China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1164-1182.]
- [5] 李园园,薛彩霞,柴朝卿,等.中国保护性耕作净碳汇的时空分异特征及其驱动力[J].中国人口·资源与环境,2022,32(10):15-23.[Li Y Y, Xue C X, Chai C Q, et al. Spatio-temporal variation and driving forces of net carbon sink of conservation tillage in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(10): 15-23.]
- [6] 邓远远,朱俊峰.保护性耕作技术采纳的增产与稳产效应[J].资源科学,2023,45(10):2050-2063.[Deng Y Y, Zhu J F. Effect of conservation tillage technology adoption on yield increasing and stabilizing[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 2050-2063.]
- [7] 李卫,薛彩霞,姚顺波,等.农户保护性耕作技术采用行为及其影响因素:基于黄土高原476户农户的分析[J].中国农村经济,2017,385(1):44-57,94-95.[Li W, Xue C X, Yao S B, et al. The adoption behavior of households' conservation tillage technology: An empirical analysis based on data collected from 476 households on the Loess Plateau[J]. Chinese Rural Economy, 2017, 385(1): 44-57, 94-95.]
- [8] Huang Y, Ren W, Wang L, et al. Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 268: 144-153.
- [9] 仇焕广,苏柳方,张祎彤,等.风险偏好、风险感知与农户保护性耕作技术采纳[J].中国农村经济,2020,(7):59-79.[Qiu H G, Su L F, Zhang Y T, et al. Risk preference, risk perception and farmers' adoption of conservation tillage[J]. Chinese Rural Economy, 2020, (7): 59-79.]
- [10] Pramanick B, Kumar M, Naik B M, et al. Long-term conservation tillage and precision nutrient management in maize-wheat cropping system: Effect on soil properties, crop production, and economics[J]. Agronomy, 2022, DOI: 10.3390/agronomy12112766.
- [11] 崔许锋,王雨菲,张光宏.面向低碳发展的农业生态效率测度与时空演变分析:基于SBM-ESDA模型[J].农业经济问题,2022,513(9):47-61.[Cui X F, Wang Y F, Zhang G H. Low-carbon oriented measurement and spatiotemporal evolution of agricultural eco-efficiency in China: Based on SBM-ESDA model[J]. Issues in Agricultural Economy, 2022, 513(9): 47-61.]
- [12] Yang B, Zhang Z, Wu H. Detection and attribution of changes in agricultural eco-efficiency within rapid urbanized areas: A case study in the Urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze

2026年5月

- River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109533.
- [13] Fu J, Ding R, Zhu Y Q, et al. Analysis of the spatial-temporal evolution of green and low carbon utilization efficiency of agricultural land in China and its influencing factors under the goal of carbon neutralization[J]. *Environmental Research*, 2023, DOI: 10.1016/j.envres.2023.116881.
- [14] Lv T G, Fu S F, Zhang X M, et al. Spatiotemporal evolution and convergence of agricultural eco-efficiency in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2023, DOI: 10.1016/j.pce.2023.103438.
- [15] 张展, 廖小平, 李春华, 等. 湖南省县域农业生态效率的时空特征及其影响因素[J]. *经济地理*, 2022, 42(2): 181-189. [Zhang Z, Liao X P, Li C H, et al. Spatio-temporal characteristics of agricultural eco-efficiency and its determinants in Hunan Province[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 181-189.]
- [16] 段存儒, 武照亮, 曾贤刚. 气候变化感知对农户生计策略的影响: 基于云南省农村居民调查数据[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(7): 251-264. [Duan C R, Wu Z L, Zeng X G. Impact of climate change perception on rural households' livelihood strategies: Based on the survey data of residents in Yunnan Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(7): 251-264.]
- [17] Pittelkow C M, Liang X, Linqvist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. *Nature*, 2015, 517(7534): 365-368.
- [18] Berhane M, Xu M, Liang Z Y, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26: 2687-2701.
- [19] Young M D, Ros G H, Vries W. Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.agee.2021.107551.
- [20] 齐智娟, 徐敬文, 张忠学, 等. 秸秆还田配施氮肥对黑土玉米田土壤CO<sub>2</sub>排放与碳平衡的影响[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(6): 284-293. [Qi Z J, Xu J W, Zhang Z X, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on soil CO<sub>2</sub> emission and carbon balance in black soil maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(6): 284-293.]
- [21] 郭星宇, 王浩, 于琦, 等. 耕作对渭北旱塬小麦-玉米轮作田土壤水分和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 2977-2990. [Guo X Y, Wang H, Yu Q, et al. Effects of tillage on soil moisture and yield of wheat-maize rotation field in Weibei Upland Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 2977-2990.]
- [22] Li H, He J, Bharucha Z P, et al. Improving China's food and environmental security with conservation agriculture[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2016, 14(4): 1-15.
- [23] Wang H, Wang S, Wang R, et al. Direct and indirect linkages between soil aggregates and soil bacterial communities under tillage methods[J]. *Geoderma*, 2019, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113879.
- [24] 闫宇翡. 川西平原不同耕作措施适应性评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. [Yan Y F. The Adaptability Valuation of Different Tillage Measures in the Western Sichuan Plain[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.]
- [25] 袁玉玉, 王洋, 崔政武, 等. 黑土区不同耕作方式对土壤有机碳及其组分的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(7): 3183-3191. [Yuan Y Y, Wang Y, Cui Z W, et al. The effect of different tillage methods on soil organic carbon and its components in the black soil area of Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(7): 3183-3191.]
- [26] Lal R. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70(3): 55-62.
- [27] 王鹏博, 张冬霞, 乔唱唱, 等. 秸秆还田和施磷量对豫西旱地小麦土壤酶活性和产量形成的影响[J]. *作物学报*, 2025, 51(2): 534-547. [Wang P B, Zhang D X, Qiao C C, et al. Effects of straw returning and phosphorus application on soil enzyme activity and yield formation of wheat in dry land of western Henan, China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(2): 534-547.]
- [28] 林利平, 张悟移. 粮食主产区农业生态效率时空特征、驱动因素及提升路径[J]. *资源科学*, 2025, 47(2): 402-416. [Lin L P, Zhang W Y. Spatiotemporal characteristics, driving factors, and improvement paths of agricultural ecological efficiency in the main grain producing areas of China[J]. *Resources Science*, 2025, 47(2): 402-416.]
- [29] 崔宁波, 范月圆, 巴雪真. 中国保护性耕作政策变迁进程、逻辑与展望: 基于制度变迁理论的视角[J]. *中州学刊*, 2021, 1(10): 33-40. [Cui N B, Fan Y Y, Ba X Z. The process, logic and prospect of conservation tillage policy change in China: Based on the perspective of institutional change theory[J]. *Academic Journal of Zhongzhou*, 2021, 1(10): 33-40.]
- [30] 邓仲良, 杨舸. 人口变化对中国经济转型的影响[J]. *改革*, 2025, (1): 53-64. [Deng Z L, Yang G. The impact of population changes on China's economic transformation[J]. *Reform*, 2025, (1): 53-64.]
- [31] Tone K. A slack-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.
- [32] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. *Empirical Economics*, 1997, 22(4): 515-531.
- [33] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970, 46(2): 234-240.
- [34] 蔺鹏, 孟娜娜. 绿色全要素生产率增长的时空分异与动态收敛[J]. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(8): 104-124. [Lin P, Meng N N. Spatio-temporal differentiation and dynamic convergence of green total factor productivity growth[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2021, 38(8): 104-124.]
- [35] Komarek A M. Conservation agriculture in western China increases productivity and profits without decreasing resilience[J]. *Food Security*, 2018, (10): 1251-1262.

- [36] 王金霞, 张丽娟. 保护性耕作技术对农业生产的影响: 黄河流域的实证研究[J]. 管理评论, 2010, 22(6): 77-84, 60. [Wang J X, Zhang L J. Impacts of conservation tillage on agriculture: Empirical research in the Yellow River Basin[J]. Management Review, 2010, 22(6): 77-84, 60.]
- [37] 刘建忠. 靖边农牧交错区农田保护性耕作试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006. [Liu J Z. Farmland Protection Cultivation Experimental Study in the Interlocks Area of the Farming and Animal Husbandry of Jingbian[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006.]
- [38] 王晓娜. 北京地区免耕农业及其经济效益研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2008. [Wang X N. Research on No-Tillage Agriculture and its Economic Benefits in Beijing Region[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2008.]
- [39] 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报, 2008, (9): 43-48. [Gao H W, Li H W, Li W Y. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, (9): 43-48.]
- [40] Sarker K K, Xu C L, Wang X Y, et al. Band tillage with fertilizer application for un-puddled transplanting rice in northeast of China [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 73-83.
- [41] He J, Li H W, Wang X Y, et al. The adoption of annual sub-soiling as conservation tillage in dry land maize and wheat cultivation in northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2): 493-502.
- [42] 童荣鑫, 梁迅, 关庆锋, 等. 2000-2020年中国陆地土壤碳储量及土地管理碳汇核算[J]. 地理学报, 2023, 78(9): 2209-2222. [Tong R X, Liang X, Guan Q F, et al. Estimation of soil carbon storage change from land use and management at a high spatial resolution in China during 2000-2020[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(9): 2209-2222.]
- [43] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1298-1309. [Tian Y, Zhang J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1298-1309.]
- [44] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21-27. [Min J S, Hu H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21-27.]
- [45] Islam R, Glenney D C, Lazarovits G. No-till strip row farming using yearly maize-soybean rotation increases yield of maize by 75% [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 837-846.
- [46] 张雄智, 李帅帅, 刘冰洋, 等. 免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(5): 1-12. [Zhang X Z, Li S S, Liu B Y, et al. Effects of no-till and residue retention on carbon sequestration and yield in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(5): 1-12.]
- [47] 王晓娟, 黄高宝, 李卿沛, 等. 不同耕作措施下旱地春小麦田和豌豆田的蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5): 172-177. [Wang X J, Huang G B, Li Q P, et al. Characteristics of evapotranspiration and its yield performance of rain-fed spring wheat and peas fields[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(5): 172-177.]
- [48] 周子军, 郭松, 陈琨, 等. 长期秸秆覆盖对免耕稻-麦产量、土壤氮组分及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1148-1159. [Zhou Z J, Guo S, Chen K, et al. Long-term straw mulching affects rice and wheat yields, soil nitrogen fractions, and microbial community under a no-till system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1148-1159.]
- [49] 李舟. 基于多尺度分析的黄土高原保护性耕作系统下作物产量、土壤碳库与经济效益研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Li Z. Crop Yield, Soil Carbon Pool and Economic Benefit of Conservation Tillage System in the Loess Plateau Based on Multi-Scale Analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]
- [50] 何进, 李洪文, 高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报, 2006, (10): 62-67. [He J, Li H W, Gao H W. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, (10): 62-67.]
- [51] 闫明涛, 乔家君, 翟萌, 等. 河南省农业生态效率测度、空间溢出与影响因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11): 1396-1405. [Yan M T, Qiao J J, Qu M, et al. Measurements, spatial spillover and influencing factors of agricultural eco-efficiency in Henan Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(11): 1396-1405.]
- [52] 黄伟华, 祁春节, 黄炎忠, 等. 财政支农投入提升了农业碳生产率吗? 基于种植结构与机械化水平的中介效应[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(10): 2318-2332. [Huang W H, Qi C J, Huang Y Z, et al. Does financial support for agriculture improve agricultural carbon productivity? Analysis on the mediating effects of planting structure and mechanization level[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(10): 2318-2332.]
- [53] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率的省际差异和影响因素: 基于1996-2015年31个省份的面板数据分析[J]. 中国农村经济, 2018, (1): 46-62. [Wang B Y, Zhang W G. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: An analysis based on panel data from 31 provinces in 1996-2015[J]. Chinese Rural Economy, 2018, (1): 46-62.]
- [54] 张振旺, 李建强. 城乡融合对中国农业生态效率的影响及其机制[J]. 资源科学, 2024, 46(8): 1570-1587. [Zhang Z W, Li J Q. Impact of urban-rural integration on agricultural ecological efficiency in China and mechanism[J]. Resources Science, 2024, 46(8): 1570-1587.]
- [55] 李冬梅, 祁悦, 龚河阳, 等. 生态视角下吉林省粮食生产效率偏差时空演变与影响因素研究[J]. 地理科学, 2025, 45(5): 1050-1061. [Li D M, Qi Y, Gong H Y, et al. Spatio-temporal evolution and determinants of grain production efficiency deviation in Jilin Province from ecological perspective[J]. Geographical Science, 2025, 45(5): 1050-1061.]

# Dynamic evolution, regional differences, and convergence of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China

LI Yuanyuan, XUE Caixia, CHAI Chaoqing, WANG Xinyi, HOU Guangjian, ZHANG Jinrong

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

**Abstract:** [Objective] Conservation tillage demonstrates dual economic and ecological benefits through cost reduction, efficiency enhancement, carbon sequestration, and emission mitigation. However, its region-specific technical characteristics lead to spatial disparities in agricultural eco-efficiency. This study aims to uncover the dynamic evolution patterns and regional difference characteristics of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China, providing evidence for designing differentiated promotion pathways and advancing sustainable agricultural development. [Methods] Utilizing panel data from 30 Chinese provinces from 2002 to 2022, this study employed a super-efficiency SBM model with undesirable outputs to measure agricultural eco-efficiency of conservation tillage from the perspective of tillage practices. The Dagum Gini coefficient and convergence models were applied to analyze its dynamic evolution, regional differences, and convergence characteristics. [Results] (1) The agricultural eco-efficiency of conservation tillage nationwide and in all regions showed a trend of “first decreasing and then increasing” over time. In terms of spatial distribution, it presented patterns of “higher in the west and lower in the east” and “higher in the north and lower in the south”. (2) The Gini coefficient of agricultural eco-efficiency of conservation tillage across China showed a trend of “rising first and then declining.” Inter-regional disparities were the main source of its imbalance. (3) The agricultural eco-efficiency of conservation tillage exhibited both  $\alpha$ -convergence and  $\beta$ -convergence nationwide. In terms of different regions, the central region demonstrated  $\alpha$ -convergence, while the central, western, and northeastern regions showed  $\beta$ -convergence. After considering socioeconomic factors, the convergence cycle was shortened. [Conclusion] The overall level of agricultural eco-efficiency of conservation tillage in China is relatively high, with obvious regional heterogeneity and  $\beta$ -convergence characteristics. In the future, the promotion of conservation tillage should be based on the spatial imbalance of its agricultural eco-efficiency and adapted to local conditions. Policies for promoting conservation tillage should be optimized, and the long-term development mechanism for conservation tillage should be improved. At the same time, interregional exchange and cooperation in agricultural production should be strengthened to establish a linkage mechanism for the economic-ecological benefits of conservation tillage.

**Key words:** conservation tillage; agricultural eco-efficiency; super-efficiency SBM model; dynamic evolution; regional differences; convergence; China