中国农业碳排放回弹效应:统计测度、时空演变与驱动因素

李新颖[1], 张自强[1], 王庆军[1], 史 琼[2]
(1.贵州大学 经济学院, 贵州 贵阳 550025; 2.贵州省现代农业发展研究所, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: [目的] 系统测度中国农业碳排放回弹效应,揭示其时空演变与形成机理,为实现"双碳"目标提供理论与实践指导。[方法] 采用非期望产出的超效率SBM模型与Malmquist-Luenberger指数,测算2001—2024年中国266个地级市的技术进步率,定量评估由技术进步引起的农业碳排放回弹效应,并综合运用Kernel密度估计、Moran's *I*指数、Markov链分析、Dagum基尼系数及QAP模型,系统分析回弹效应的动态演进趋势、空间差异及驱动因素。[结果] ①中国农业碳排放回弹效应整体偏高,存在"回火效应";区域层面,东、中部地区各年份均表现为"回火效应",西部和东北地区回弹较低,部分年份存在"过度储存效应"。②时空演变方面,农业碳排放回弹效应整体呈上升态势,各市区间绝对差异扩大,"俱乐部趋同"现象不明显,存在"跨越式"跃迁发展的可能性。③空间分解表明,全国总体差异呈"上升—下降"波动趋势,中部地区组内差异最大,差异主要来源于超变密度。④形成机理方面,各解释变量在不同区域的作用力存在差异,但农业机械动力和种植结构是驱动碳排放回弹差异的核心因素。[结论] 为抑制农业碳排放回弹,应分区域突破农机节能与低碳技术,因地制宜优化生产模式并配以生态补偿,健全碳排放回弹核算监测体系,实施差异化信贷激励与约束机制。

关键词: 农业碳排放; 回弹效应; 动态演变; 区域差异; 形成机理
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0290-10 **中图分类号:** F205, F323

文献参数: 李新颖, 张自强, 王庆军, 等.中国农业碳排放回弹效应:统计测度、时空演变与驱动因素[J].水土保持通报,2026,46(5):290-299. Li Xinying, Zhang Ziqiang, Wang Qingjun, et al. Agricultural carbon emission rebound effects in China: Statistical measurement, spatiotemporal evolution, and driving factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):290-299.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.036 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.036**

Agricultural carbon emission rebound effects in China: Statistical measurement, spatiotemporal evolution and driving factors

Li Xinying[1], Zhang Ziqiang[1], Wang Qingjun[1], Shi Qiong[2]
(1.*School of Economics*, *Guizhou University*, *Guiyang*, *Guizhou* 550025, *China*;
2.*Guizhou Provincial Institute of Modern Agricultural Development*, *Guiyang*, *Guizhou* 550025, *China*)

Abstract: [Objective] The agricultural carbon emission rebound effects in China were systematically measured, and their spatiotemporal evolution and formation mechanisms were investigated in order to provide theoretical and practical guidance for achieving the "dual carbon" goals. [Methods] This study employed the super-efficiency SBM model with undesirable outputs and the Malmquist-Luenberger index to calculate the technological progress rates of 266 Chinese cities from 2001 to 2024, thereby quantitatively assessing the agricultural carbon rebound effects induced by technological progress. Furthermore, this study systematically analyzed the dynamic evolution trends, spatial disparities, and driving factors of the rebound effects by combining kernel density estimation, Moran's *I* index, Markov chain analysis, the Dagum Gini coefficient and the QAP model. [Results] ① The agricultural carbon rebound effects in Chinese cities were generally high and showed a clear "backfire effect". At the regional level, the eastern and central regions exhibited a "backfire effect" in all years, while the western and

收稿日期:2026-03-21 **修回日期:**2026-04-23 **采用日期:**2026-04-30
资助项目:贵州省教育厅高等学校人文社会科学研究项目"'双碳'目标下贵州林区推进森林碳汇增长与相对贫困缓解的路径研究"(GDZX2024021); 广东省哲学社会科学规划项目"深化集体林权制度改革背景下生态产品价值实现机制研究"(GD24WTCXGC07)
第一作者:李新颖(2000—),女(汉族),贵州省六盘水市人,硕士研究生,研究方向为农村发展。Email:3328701285@qq.com。
通信作者:张自强(1986—),男(汉族),贵州省遵义市人,博士,教授,主要从事农村与区域发展方面的研究。Email:532959728@qq.com。

northeastern regions had a relatively low rebound, with a "super-conservation effect" observed in some years. ② In terms of spatiotemporal evolution, the agricultural carbon rebound effects showed an overall upward trend, with the absolute disparity between cities widening. The "club convergence phenomenon" was not significant, and "leapfrog development" was possible. ③ Spatial decomposition showed that the overall national disparity presented a "rising—falling" fluctuation trend. The central region had the largest intra-group difference, and the overall disparity was mainly derived from transvariation intensity. ④ In terms of formation mechanisms, the effects of explanatory variables differed across regions. However, agricultural machinery power and cropping structure were the core driving forces of carbon rebound disparities. [Conclusion] To curb the agricultural carbon rebound effects, region-specific breakthroughs should be made in energy-saving and low-carbon technologies for agricultural machinery. Production modes should be optimized according to local conditions and supported by ecological compensation policies. A sound accounting and monitoring system for agricultural carbon rebound should be established, together with differentiated credit incentive and restraint mechanisms.

Keywords: agricultural carbon emissions; rebound effects; dynamic evolution; regional disparities; formation mechanisms

温室气体大量排放引起的气候变化问题已成为广泛关注的全球性问题。农业既是全球温室气体的重要排放源,同时也是一个巨大的碳汇系统。根据联合国粮农组织(FAO)2020年发布的报告,全球农业粮食系统产生的温室气体排放量占人为排放总量的30%(约1.50×10^{10} t)[1]。中国作为农业大国,其农业活动产生的碳排放量约占全国碳排放总量的17%,且这一比重近年来呈现持续增长态势[2],农业碳排放问题不容忽视。保障国家粮食安全、推动农业绿色高质量发展,亟需实现农业生产部门的降碳减排。然而,在农产品需求刚性增长的新时代背景下,如何协调增产与减排目标,已成为中国农业发展的核心挑战。

近年来,中国通过强化政策约束,如《"十四五"节能减排综合工作方案》《农业农村减排固碳实施方案》、推广节能技术及推动经营规模化,试图遏制农业碳排放增长。然而,有研究[3]表明,中国农业碳排放总量并未呈现预期中的下降趋势。1990—2020年碳排放量从5.13×10^{8} t标准煤攀升至6.36×10^{8} t标准煤,累计增幅达23.95%。在能源领域这种现象称为"回弹效应",即技术进步在提高能源使用效率的同时,也增加了能源需求,从而造成较高的碳排放[4]。当前中国正处在农业现代化向农业高质量发展进发的开端期,也是2030年碳达峰的关键期,回弹效应的存在使得节能减排政策难以达到预期目标。在此背景下,评估农业碳排放回弹效应及其影响,制定科学碳减排策略,加速农业绿色低碳转型,是中国实现碳达峰和碳中和目标、迈向高质量发展之路上亟待解决的重要课题。

学界关于回弹效应的研究主要集中在以下几个方面:①关于回弹效应的测度。研究主要集中在水资源回弹效应[5]、能源回弹效应[6-7]、环境回弹效应[8]。具体来看,如采用"直接比较法"测算中国工业用水回弹效应[9];或将回弹效应调整因子嵌入传统SFA模型,构建基于"一步法"策略的碳排放回弹效应测算方法[10]。②关于回弹效应的影响因素。宏观上,数字经济的发展促使企业增加高碳能源消耗,进而促进碳排放回弹效应[11]。数字金融则通过推动产业结构优化、激励绿色技术创新,在提升碳排放效率的同时抑制碳排放回弹[12]。微观上,农户为追求利润可能扩大灌溉面积或改种高耗水作物,导致用水回弹[13]。已有部分学者将碳排放回弹效应引入到农业领域,陈佩[3]基于农业技术进步视角,发现中国农业碳排放存在"部分回弹效应";黄晓慧等[14]、郭庆宾等[15]则分别从粮食主产区和长江经济带层面验证了农业碳排放回弹效应的普遍性与区域异质性;在机制层面,黄恒君等[16]指出技术进步通过扩大种植规模、推动种植结构"经济化"加剧了碳排放回弹,而张自强等[17]则发现农业气象服务能够通过提升化肥利用效率、缓解极端天气冲击等路径削弱了农业碳排放回弹效应。

既有研究为本研究奠定了重要理论基础与方法论参照,但该领域仍存在亟待深化的关键缺口。与现有研究相比,本研究的边际贡献在于:①聚焦农业碳排放回弹效应的长期趋势与空间溢出效应,通过动态追踪突破静态,短周期分析局限,弥补长期动态与空间关联视角的不足;②运用二次指派程序(QAP)分析驱动因素,突破单一视角框架,更全面考察碳排放回弹效应差异的复杂成因,克服传统回归处理关系数据自相关的缺陷;③将研究尺度下沉至市域层面,捕捉生产特征与资源禀赋对碳排放回弹的影响,克服省级分析难以兼顾微观异质性的局限,精准刻画区域分化特征,为微观减排政策制定提供实证支撑。综上所述,本研究基于2001—2024年全国266个市区数据,采用非期望产出的超效率SBM

模型与Malmquist-Luenberger指数，通过计算技术进步率，定量评估由技术进步引起的农业碳排放回弹效应，同时运用Kernel密度估计、Moran's I指数及Markov链分析，把握其动态演进趋势；最后利用Dagum基尼系数法和QAP模型探究农业碳排放回弹效应在空间布局与结构特征上的差异及其驱动因素。

1 材料与方法

1.1 研究方法

1.1.1 农业碳排放回弹效应的测算

本研究的研究对象是种植业（狭义农业）。需要说明的是，文中“农业总产值”指标是指农林牧渔业总产值中的“农业”产值（即种植业产值），而非农林牧渔合计的大农业总产值。参考黄晓慧等[14]的研究，选取化肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉面积以及表征翻耕活动的农作物播种面积作为主要碳源，通过计算其消耗量与相应碳排放系数的乘积之和，得出各地区农业碳排放总量。

农业碳排放回弹效应可通过技术应用间接引发的碳排放增加量与其直接实现的碳排放减少量的比值进行衡量，计算公式为

$$RE_{t+1}=\frac{TR_{t+1}}{S_{t+1}}=\frac{\sigma_{t+1}(A_{t+1}-A_t)CI_{t+1}}{(CI_t-CI_{t+1})A_{t+1}}\times 100\% \quad (1)$$

式中：t为年份；S_{t+1}表示技术进步带来的碳排放量减少量；TR_{t+1}为技术进步引致的农业碳排放增加量；σ_{t+1}为农业技术进步贡献率；A为各市区农业总产值；CI为农业碳排放强度；RE表示农业碳排放回弹效应，其具体含义为：当RE<0时，存在“过度储存效应”，意味着实际的碳排放减少量比预期的减排量多。当RE=0时，即“零回弹效应”，技术效率提升带来的预期减排效果被完全实现，未产生额外碳排放。当0<RE<0.5时，即存在“弱回弹效应”，0.5≤RE<1时，存在“强回弹效应”，意味着技术应用虽直接降低碳排放强度，但因效率提升刺激生产扩张或投入增加，导致实际减排量小于预期，碳排放总量仍呈净减少。当RE=1时，出现“完全回弹效应”，预期减排量被完全抵消，碳排放总量无净变化；当RE>1时，存在“回火效应”，技术效率提升反而导致碳排放总量绝对增加，规模扩张或资源再配置产生的新增碳排放已完全抵消理论减排量并产生净增排放量。

1.1.2 技术进步率的测算

传统DEA模型采用径向、角度的效率测量方式，忽视了松弛变量问题，也无法刻画同时增加期望产出与减少非期望产出的技术变革特征，导致效率值存在系统性偏差。文中借鉴陈佩[3]的研究，采用非期望产出的超效率SBM模型测算技术进步水平，弥补传统DEA的部分不足。现假设有n个决策单元，每个单元包含投入向量$x\in R^m$，期望产出向量$y\in R^{r1}$，非期望产出向量$b\in R^{r2}$，分别定义矩阵$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2\cdots x_n]\in R^{m\times n}$，$Y=[y_1,y_2\cdots y_n]\in R^{r1\times n}$，$B=[b_1,b_2\cdots b_n]\in R^{r2\times n}$，且假设$X,Y,B$均大于0。

$$\rho=\min\frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1+\frac{1}{r_1+r_2}\left(\sum_{j=1}^{r_1}\frac{s_j^+}{y_{j0}}+\sum_{j=1}^{r_2}\frac{s_j^b}{b_{j0}}\right)} \quad (2)$$

$$s.t.\begin{cases}x_0=X\tau+s^-\\ y_0=Y\tau-s^+\\ b_0=B\tau+s^b\\ \tau,s^-,s^+,s^b\geqslant 0\end{cases} \quad (3)$$

式中：m，r_1，r_2分别为投入、期望产出和非期望产出的指标个数；i,j分别为投入和产出指标的序号；x_0，y_0，b_0分别为当前被评价决策单元（下标0代表当前决策单元）的实际投入、期望产出和非期望产出向量；s^-,s^+,s^b分别为投入、期望产出、非期望产出松弛向量；τ为权重向量；ρ为效率评价值，ρ关于s^-,s^+,s^b单调递减，当$0\leqslant\rho\leqslant 1$，该决策单元存在效率损失，处于生产前沿面之外。

借鉴黄恒君等[16]的方法，在SBM模型的基础上，引入Malmquist-Luenberger指数，进一步分解得到农业技术水平。其模型为

$$ML_0^{t,t+1}=\left\{\frac{\left[1+\rho_0^t\left(x_0^t,y_0^t,b_0^t\right)\right]}{\left[1+\rho_0^t\left(x_0^{t+1},y_0^{t+1},b_0^{t+1}\right)\right]}\times\frac{\left[1+\rho_0^{t+1}\left(x_0^t,y_0^t,b_0^t\right)\right]}{\left[1+\rho_0^{t+1}\left(x_0^{t+1},y_0^{t+1},b_0^{t+1}\right)\right]}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ML指数可以进一步分解为技术效率变化指数（EC）和技术进步变化指数（TC）：TC>1表示技术进步；TC=1表示技术无变化；TC<1则表示技术退步。

$$ML_0^{t,t+1}=EC_0^{t,t+1}\cdot TC_0^{t,t+1} \quad (5)$$

1.1.3 核密度估计

核密度估计是一种非参数的统计方法，用于估计一个随机变量的概率密度函数。本研究借助核密度估计法，探究全国整体以及地理区域下农业碳排放回弹效应的分布动态与演进特征。计算步骤见参考文献[18]。

1.1.4 马尔科夫链

运用马尔科夫链分析农业碳排放回弹效应的状态转移特征与长期演进趋势，依据“无记忆性”原理，识别不同水平类型的转移概率与稳态分布，具体构

建步骤参见文献[19]。

1.1.5　Dagum基尼系数及其分解

Dagum基尼系数法能够有效解决子样本间的交叉重叠问题,将总体基尼系数分解为区域内差异、区域间差异和超变密度3部分。本研究采用该方法考察农业碳排放回弹效应的地区差异来源,具体计算参见文献[20]。

1.1.6　二次指派程序(QAP)

二次指派程序(QAP)是一种分析矩阵数据关系的非参数方法,通过随机置换检验矩阵间相关性,可克服多重共线性问题。参考芦风英等[21]的方法,以农业碳排放回弹效应水平差异矩阵为因变量,选取农业经济水平、农地经营规模、种植结构、农业机械动力差异矩阵为自变量,建立QAP回归模型。各变量测度及选取依据如下:经济水平会影响农业投入强度与资源消耗,发达地区技术密集但生产扩张可能加剧回弹[19],参考杨晨等[22]研究,农业经济水平以农村居民人均纯收入对数表示。农地经营规模以农作物播种总面积表示,规模扩大会促使农户加大资本投入,同时伴随化肥农药使用增加,可能提升回弹效应[14]。种植结构以粮食播种面积/农作物播种面积测度,不同作物碳排放强度差异显著,粮食作物过度替代经济作物可能因规模扩大而抵消部分减排效果[23-24]。农业机械动力以农业机械总动力/农村人口衡量,机械化直接增加能耗并通过提高效率间接影响回弹[25]。

1.2　数据来源

选取2001—2024年中国266个地级市的数据,数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》以及各地级市统计年鉴、EPS全球统计数据平台,为了减少样本损失,采用插值法处理缺失数据,以确保研究数据的完整性。

2　结果与分析

2.1　农业碳排放回弹效应水平

利用回弹效应模型,测算得出2001—2024年中国266个地级市及分区域农业碳排放回弹效应水平,结果详见表1。整体来看,中国农业碳排放回弹水平呈波动上升趋势,均值从2001年的6.941上升至2024年的16.107,年均增速为3.69%。考察期内,农业碳排放回弹效应均值约为10.693,存在"回火效应",表明技术进步虽带来减排效果,但被回弹效应抵消,甚至导致碳排放总量不降反增。此外,所有年份的回弹效应均值均大于1,进一步证实2001—2024年碳排放效率的提高未能实现碳减排。在区域层面,农业碳排放回弹效应年均值排序为:中部(11.849)>东部(11.088)>西部(10.336)>东北部(7.631)。东、中部地区高于全国平均水平(10.693),呈现"中—东—西—东北"逐级降低的阶梯状分布。从时间维度看,东部和中部地区呈稳定增长趋势,所有年份均表现为"回火效应",可能因该区域经济发达,人口密集,农业生产活动频繁,能源需求较大所致。西部地区呈波动上升态势但回弹效应较低,可能因其粮食作物以旱地小麦、玉米为主,化肥农药投入少,碳排放强度较低。且西部地区粮食作物播种面积占全国比重仅为9.47%,粮食种植规模相对较小,在一定程度上限制了碳排放规模的扩张[3]。东北地区在2003,2009,2016和2017年表现为"过度储存效应",即实际减排量超过预期。原因可能是东北地区化肥施用量较低,技术进步带来的减排主要体现在化肥减量上,较低的化肥基数使超额减排更易实现;此外,东北地区经济长期低迷,农业生产规模有所收缩,导致总排放降幅大于预期[10]。

表1　中国及4大地区农业碳排放回弹效应的测算结果

Table 1　Measurement results of agricultural carbon emission rebound effects in China and four major regions

年份	碳排放回弹效应水平				
	全国	东部	中部	西部	东北部
2001	6.941	13.520	3.213	3.822	6.135
2002	10.864	12.770	12.107	7.997	9.608
2003	4.871	6.768	4.653	7.064	−4.976
2004	8.789	11.445	8.301	6.870	7.527
2005	10.921	11.466	9.752	11.381	11.255
2006	14.890	14.692	19.079	14.381	6.243
2007	10.537	13.944	16.932	3.680	2.119
2008	8.327	3.832	13.351	9.002	6.246
2009	4.946	11.273	10.328	−4.721	−1.974
2010	10.835	10.042	12.084	12.906	4.851
2011	6.624	6.903	8.815	2.760	9.783
2012	12.492	15.724	12.561	9.465	10.991
2013	14.298	13.734	18.319	13.078	8.770
2014	14.734	15.476	16.871	15.586	5.375
2015	11.354	10.845	11.330	12.315	10.449
2016	6.337	9.271	4.831	8.478	−2.956
2017	8.217	10.239	7.213	11.183	−1.879
2018	14.669	17.515	16.072	11.811	10.479
2019	6.931	3.821	8.482	8.364	7.934
2020	9.440	13.239	6.778	7.261	11.154
2021	13.706	15.330	15.378	10.921	11.943
2022	14.506	11.711	15.677	16.202	14.983
2023	15.307	8.091	15.975	21.482	18.023
2024	16.107	4.472	16.274	26.763	21.063
均值	10.693	11.088	11.849	10.336	7.631

2.2 农业碳排放回弹效应动态演进趋势

2.2.1 基于Kernel密度估计的时间演变趋势

采用核密度估计法绘制2001，2009，2017和2024年的核密度曲线，分析全国及4大地区农业碳排放回弹效应的演进趋势（如图1所示）。图1a为全国核密度曲线。在研究期内，随着时间推移，曲线的中心位置总体右移，波峰高度呈现出“上升—下降”的波动变化，宽度明显变窄，2017年出现增宽的现象，之后再次变窄，且存在弱侧峰及拉长的左右拖尾。表明全国农业碳排放回弹效应整体呈上升态势，市区间仍存在梯度差异，差异逐步扩大，极化现象加剧。图1b—1e分别为4大区域农业碳排放回弹效应的动态演进特征。从分布位置看，东、中部核密度曲线中心呈现不同幅度的右移，表明上述地区农业碳排放回弹效应随时间呈现增长趋势；西部地区曲线中心先左移后右移；东北地区整体右移，但2017年左移后再次右移，呈先降后升趋势。从分布形态来看，各区域核密度曲线主峰高度波动变化，东、中、东北地区主峰高度整体下降，表明主流市区间的分化程度有所加剧；西部地区主峰高度整体上升，波动性更强，但主流市区集中趋势增强，离散不明显。从分布延展性看，所有地区右拖尾在2024年均明显拉长，表明高回弹水平市区的碳排放回弹效应持续攀升，区域内部差异有所扩大。其中西部地区最为显著。从极化现象看，各地区持续呈现“一个主峰，多个相对弱侧峰”的分布形态，存在一定程度的极化现象，但影响不稳定。

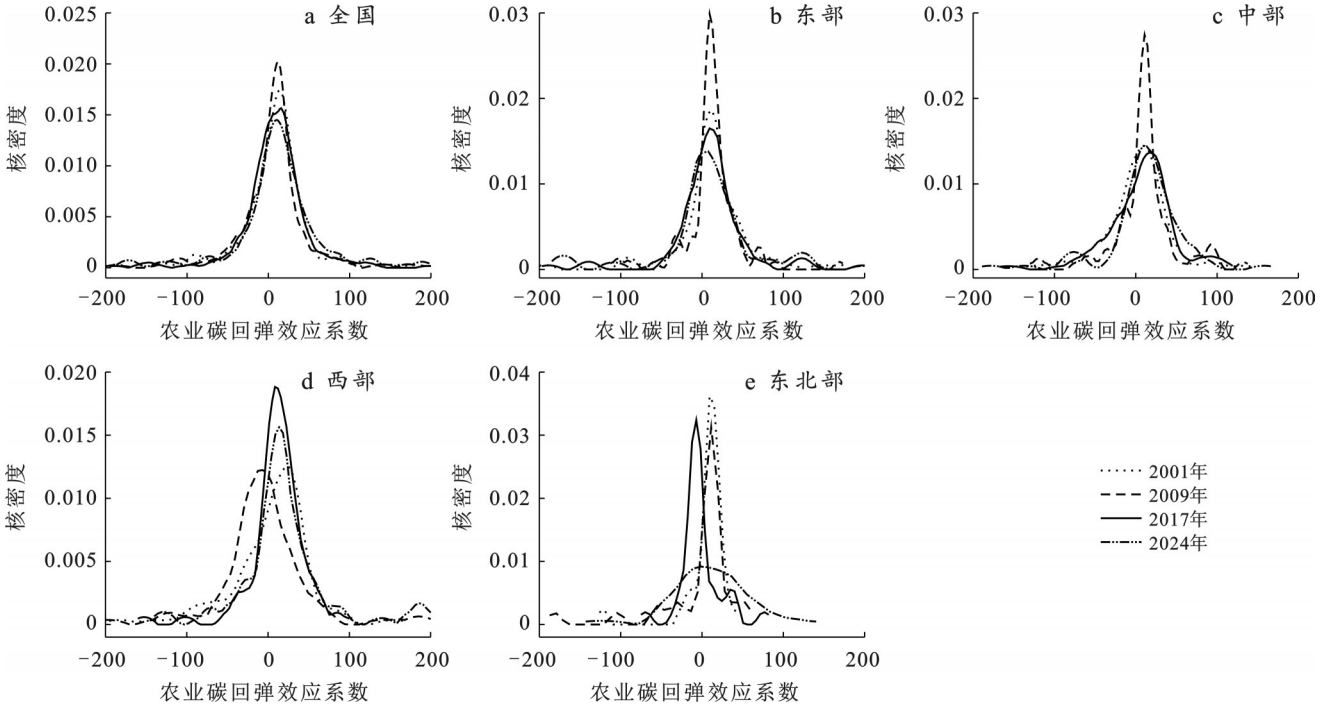


图1 不同区域农业碳排放回弹效应核密度分布

Fig.1 Kernel density distribution of agricultural carbon emission rebound effects in different regions

2.2.2 基于Moran's *I*指数的空间演变趋势

基于地理反距离权重矩阵，测算全国农业碳排放回弹效应的全局莫兰指数（表2）。全局Moran's *I*指数在−0.011～0.018范围内波动，所有年份中有9个年份Moran's *I*值为正值且$p<0.1$，表明该阶段内各市区农业碳排放回弹效应存在显著的空间正相关特征。此外，仅有2004年全局莫兰指数显著为负，其余年份未通过显著性检验。

绘制2001，2009，2017和2024年LISA集聚图，揭示农业碳排放回弹水平的局部空间集聚特征（如图2所示）。2001年，空间集聚特征不明显，各类集聚区零散且数量少；2009年，“高-高”与“低-高”型集聚主要分布在东、中部，“高-低”和“低-低”型集中在西部。其中“高-高”型范围最广，连片分布于东部及中部农业主产区，通过空间溢出效应带动周边形成碳排放回弹集聚。2017年，集聚格局显著重构。“高-高”集聚大幅收缩至西南局部；“低-低”型重心转移至华北，形成连片低值集聚带；“高-低”集聚区连片铺展于华北与东北地区；“低-高”集聚整体萎缩，仅在华南、西南及华东沿海留存少量局部单元。2024年格局再重构，“高-低”集聚连片分布于华南、华中地区；南方“低-低”集聚范围大幅扩张；对比前期，南方高值集聚规模扩大，表明其回弹效应凸显，协同减排重点需向南方倾斜。

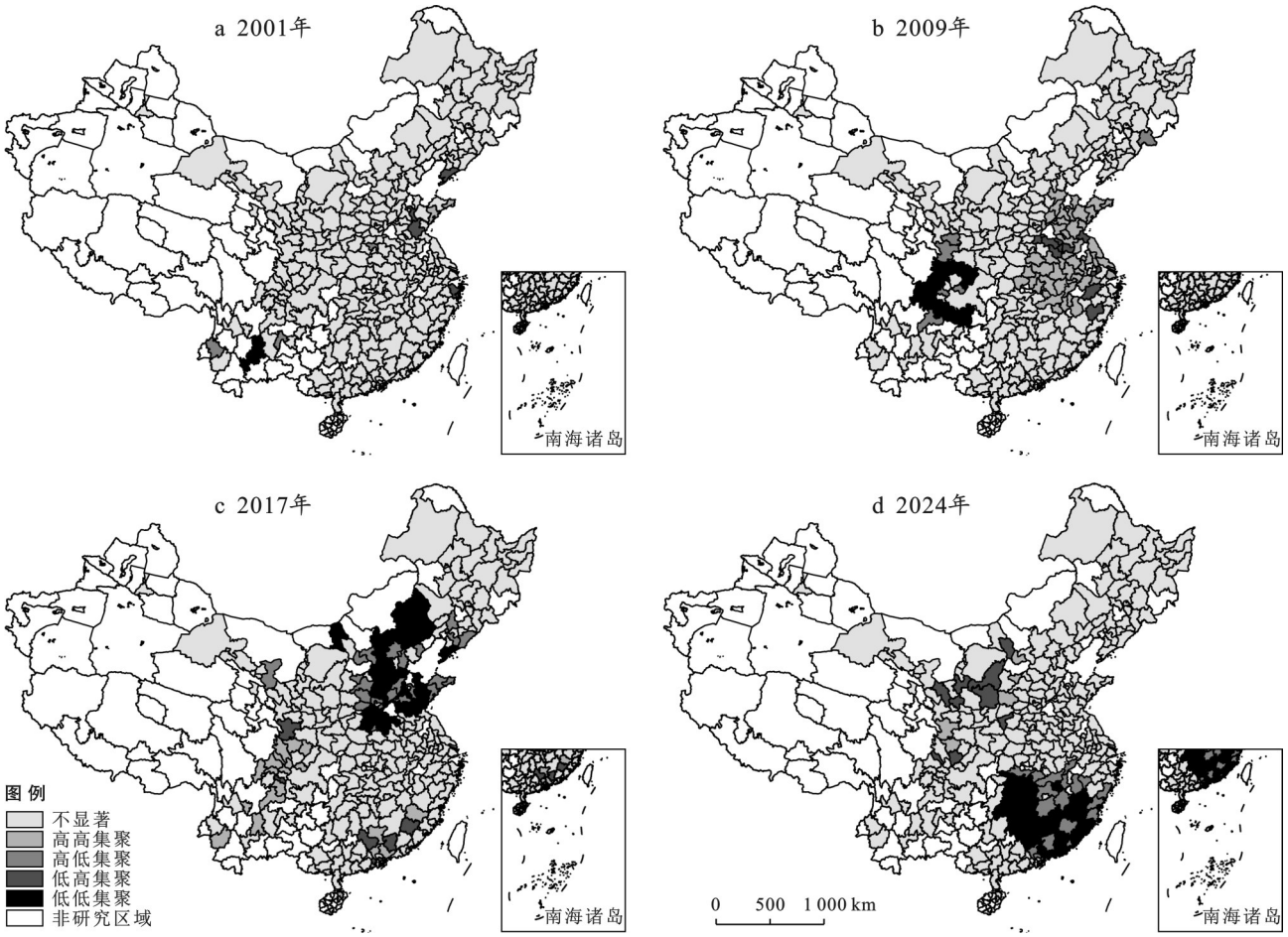
2.2.3　基于Markov链分析的状态演变趋势

为分析农业碳排放回弹状态的内部流动方向与转移特征,引入马尔科夫链转移矩阵,采用四分位法将其划分为低水平(状态Ⅰ)、中低水平(状态Ⅱ)、中高水平(状态Ⅲ)和高水平(状态Ⅳ)4种类型。传统马尔科夫链结果如表3所示。各类别对角线上的概率值并没有显著高于非对角线上的概率值,农业碳排放回弹效应的发展处于低水平、中低水平、中高水平、高水平的市区在一年后维持原等级的概率分别为0.381,0.340,0.316和0.355,“俱乐部趋同”现象不明显,说明系统处于一种较不稳定的状态,在这种状态下更容易受到外部干扰和内部整理的影响,从而发生转移。进一步研究发现,所有元素的值均不为零,可见不同类型具有“跨越式”跃迁发展的可能性,农业碳排放回弹效应转型不是一个相对稳定持续的进程,在短时间内可以实现跨越式发展。因此,各市区应该利用该特点,通过制定和实施相关的政策来引导农业碳排放回弹水平的变化,这有助于将农业碳排放回弹水平从高水平向着低水平转移,同时,也要注意在政策实施的过程中实际效果的影响,防止农业碳排放回弹水平反弹。

表2　农业碳排放回弹效应的全局莫兰指数

Table 2　Global Moran's index for agricultural carbon emission rebound effects

年份	莫兰指数	Z值	p值	年份	莫兰指数	Z值	p值
2001	−0.003	0.114	0.455	2013	−0.008	−0.763	0.223
2002	0.003	1.285	0.099	2014	0.004	1.365	0.086
2003	−0.004	−0.049	0.480	2015	0.009	2.198	0.014
2004	−0.011	−1.354	0.088	2016	−0.001	0.580	0.281
2005	−0.008	−0.783	0.217	2017	0.017	3.742	0.000
2006	0.006	1.737	0.041	2018	−0.005	−0.206	0.418
2007	−0.005	−0.305	0.380	2019	−0.007	−0.591	0.277
2008	−0.009	−0.967	0.167	2020	0.018	4.074	0.000
2009	0.008	2.069	0.019	2021	0.009	2.293	0.011
2010	−0.007	−0.497	0.310	2022	−0.001	0.544	0.293
2011	−0.003	0.209	0.417	2023	0.001	0.786	0.216
2012	0.005	1.693	0.045	2024	0.002	1.004	0.158



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作。底图无修改。空白区域为非研究区域。数据严重缺失的地级市(主要集中于西藏、青海、新疆)以及港澳台地区未纳入本次研究。

图2　中国农业碳排放回弹水平LISA集聚图

Fig.2　LISA cluster maps of agricultural carbon emission rebound levels in China

表3 农业碳排放回弹效应的传统马尔科夫转移概率矩阵
Table 3 Traditional Markov transition probability matrix for agricultural carbon emission rebound effects

类型	碳排放回弹效应等级				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	观测值
Ⅰ	0.381	0.237	0.183	0.200	1 501
Ⅱ	0.199	0.340	0.272	0.188	1 565
Ⅲ	0.191	0.248	0.316	0.245	1 569
Ⅳ	0.212	0.196	0.237	0.355	1 483

注:状态Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ分别代表农业碳排放回弹效应低水平、中低水平、中高水平、高水平,按年度样本四分位数划分;行代表t期状态,列代表$t+1$期状态;观测值为对应初始状态的样本 年度观测数量。

将空间因素考虑在内,引入空间地理反距离矩阵,建立空间马尔可夫转移概率矩阵,结果详见表4。①空间效应在各地区农业碳排放回弹水平中起着重要作用,不同滞后条件下的转移概率矩阵存在显著差异,表明各地区农业碳排放回弹水平变化并非孤立存在,而是受周围地区水平高低的影响。②相较于传统马尔科夫链,考虑空间溢出效应后,虽然部分滞后类型下各转移矩阵对角线概率值仍为行内最高,但整体"等级锁定"的强度并未显著提升,对角线元素的最小值甚至低于传统马尔可夫链的对角线基准值0.316,且在Ⅰ类滞后类型中这一现象最为明显,说明适中的空间环境对打破状态固化具有一定作用。③同一滞后类型对不同初始等级的影响存在异质性,以高水平滞后为例,初始等级为Ⅳ,Ⅲ,Ⅱ的地区向下转移一级的概率依次递减(0.255,0.253,0.207),表明转移概率不仅取决于空间滞后条件,还与自身初始等级密切相关。

2.3 农业碳排放回弹效应的地区差异

2.3.1 总体差异与区域内差异

采用Dagum基尼系数进一步分析农业碳排放回弹的区域差异及其来源。如图3所示,2001—2024年全国农业碳排放回弹的总体基尼系数呈现"先波动下降,后显著回升"的变化态势,由2001年的0.468下降至2022年的0.368,但2024年回升至0.589,表明近年来空间差异再度扩大。从区域内部的空间差异程度来看,整体呈现:中部>西部>东北部>东部的基本格局。从变动趋势来看,2001—2022年东、中部基尼系数整体波动下降,降幅分别为39.5%和34.3%,但2023—2024年均出现明显回升。西部基尼系数呈振荡上升态势。东北部基尼系数介于0.321~0.614,整体呈现扩大趋势。以上结果表明,中国农业碳排放回弹效应具有显著的空间分异特征。东、中部地区内差异虽曾有所缩小,但近年来差异重新扩大;而西部与东北地区的分异程度则呈现持续扩大的趋势。

2.3.2 区域间差异及贡献率

图4为4大区域间基尼系数和区域差异来源贡献率。样本期内区域间基尼系数以中-东北部最大(均值0.478),其他依次为中-西(0.475)、西-东北(0.472)、东-中(0.468)、东-西(0.462)、东-东北(0.461)。从变动趋势看,各区域对基尼系数均呈现交替波动特征,波动幅度先收窄后放大。2001—2022年各组合基尼系数整体呈波动下行态势,区域差异逐步收窄,至2022年多数组合降至0.377以下低位;2023—2024年基尼系数急剧攀升,普遍跃升至0.540以上,区域差异显著扩大,其中涉及东北与西部的组合增幅最大。从贡献率来看,虽然在观测期内,3者的贡献率呈现出此消彼长的变化趋势,区域内差异、区域间差异和超变密度的年均贡献分别为27.28%,35.05%和37.67%,超变密度是农业碳排放回弹不均衡的主因,为精准制定区域减排政策提供了科学依据。

表4 农业碳排放回弹效应的空间马尔科夫转移概率矩阵
Table 4 Spatial Markov transition probability matrix for agricultural carbon emission rebound effects

空间滞后类型	类型	碳排放回弹效应等级				
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	观测值
Ⅰ	Ⅰ	0.359	0.228	0.217	0.196	562
	Ⅱ	0.223	0.392	0.223	0.162	278
	Ⅲ	0.217	0.260	0.285	0.238	277
	Ⅳ	0.224	0.178	0.213	0.385	343
Ⅱ	Ⅰ	0.347	0.289	0.170	0.195	277
	Ⅱ	0.184	0.325	0.312	0.179	570
	Ⅲ	0.187	0.281	0.324	0.209	278
	Ⅳ	0.234	0.216	0.246	0.304	171
Ⅲ	Ⅰ	0.436	0.230	0.176	0.159	296
	Ⅱ	0.198	0.334	0.271	0.196	398
	Ⅲ	0.173	0.221	0.339	0.266	548
	Ⅳ	0.197	0.205	0.230	0.369	396
Ⅳ	Ⅰ	0.396	0.216	0.145	0.243	366
	Ⅱ	0.207	0.329	0.245	0.219	319
	Ⅲ	0.200	0.253	0.303	0.245	466
	Ⅳ	0.209	0.194	0.255	0.342	573

注:空间滞后类型Ⅰ—Ⅳ为地级市周边邻域农业碳排放回弹效应水平(低水平-高水平);状态Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ代表本地市域自身农业碳排放回弹效应等级;行代表t期本地状态,列代表$t+1$期本地状态;观测值为对应分组下样本-年度观测数量。

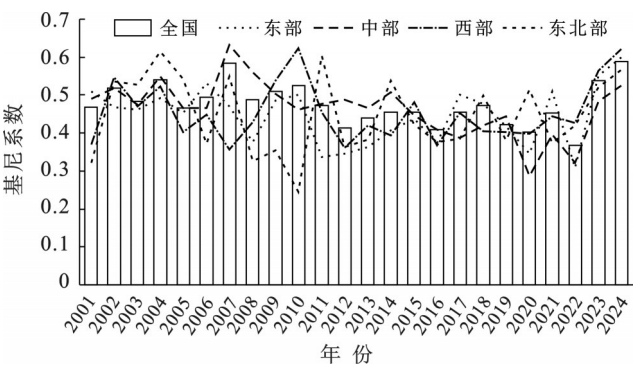


图3 农业碳排放回弹总体及区域内基尼系数
Fig.3 Overall and regional Gini coefficients for agricultural carbon emission rebound

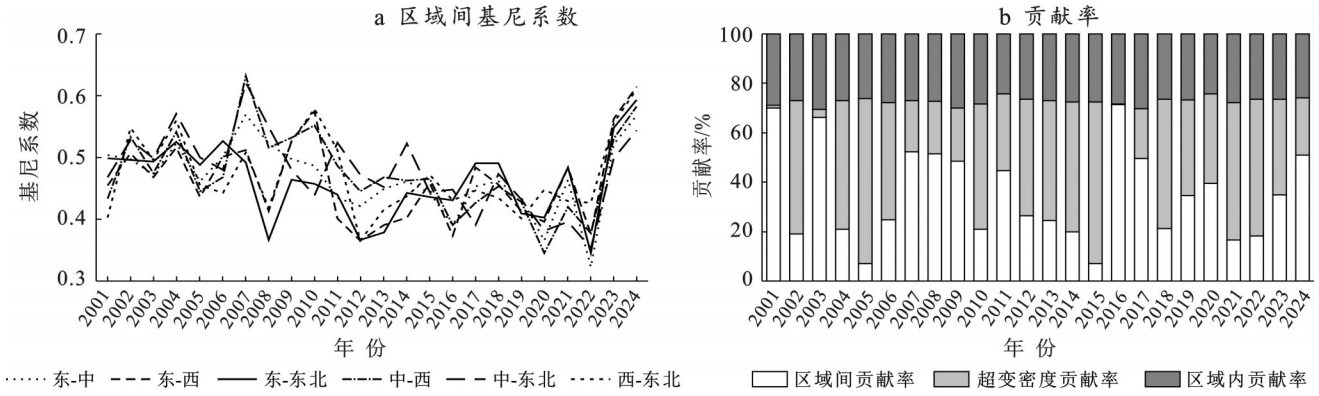


图4　中国4大区域农业碳排放回弹区域间差异与贡献率

Fig.4　Interregional differences and contribution rates of agricultural carbon emission rebound in four major regions of China

2.4　农业碳排放回弹效应差异的驱动因素

2.4.1　QAP相关性分析

表5为全国、农业功能分区及地理分区下各变量与农业碳排放回弹差异的QAP相关关系。被解释变量与各解释变量的相关系数均为正值,除东北地区农地经营规模差异的相关性较低外,其余均通过1%显著性检验。这表明农业经济水平、农地经营规模、种植结构及农业机械动力的差异与农业碳排放回弹差异存在正向关联。为进一步探究各因素的实际影响,本文采用QAP回归分析揭示其作用程度。

表5　农业碳排放回弹效应差异的QAP相关性分析结果

Table 5　QAP correlation analysis of differences in the agricultural carbon rebound effect

变量	相关系数							
	全国	粮食主产区	粮食主销区	粮食产销平衡区	东部	中部	西部	东北部
农业经济水平	0.313***	0.353***	0.319***	0.412***	0.394***	0.369***	0.379***	0.446***
农地经营规模	0.356***	0.404***	0.350***	0.392***	0.392***	0.321***	0.558***	0.062*
种植结构	0.515***	0.518***	0.499***	0.648***	0.560***	0.413***	0.738***	0.691***
农业机械动力	0.430***	0.513***	0.288***	0.568***	0.399***	0.421***	0.645***	0.729***

注:*,**,***分别表示显著性水平为10%,5%和1%。下同。

2.4.2　QAP回归分析

表6为QAP回归结果。全国层面,各解释变量差异对碳排放回弹差异均呈正向影响,其中种植结构影响最强(0.349),其次为农业机械动力(0.143),再次为农业经济水平(0.082)与农地经营规模(0.067)。区域分组呈现显著异质性:粮食主产区各变量均显著正向影响,农业机械动力与种植结构贡献突出;主销区中农地经营规模与机械动力呈显著负向影响,可能因为主销区经济发达,更倾向于采用节能高效的技术和管理模式,规模化和机械化伴随的是更严格的碳排放管控。产销平衡区模型解释力最强(调整R^2=0.428),种植结构与机械动力为核心因素。地理分区方面,东部主要受种植结构与经济水平影响;中部所有变量显著但解释力最低(调整R^2=0.218),说明存在政策、地形等其他影响因素;西部经济水平不显著,差异更多取决于生产方式与种植类型;东北地区经济水平与经营规模呈显著负向关系,机械动力为核心差异来源。综上所述,机械动力与种植结构是核心驱动因素,未来需推广新能源农机与低碳种植模式,建立"农机更新+生态补偿"机制。

表6　农业碳排放回弹效应差异的QAP回归分析结果

Table 6　QAP regression analysis of differences in agricultural carbon rebound effect

变量	标准化回归系数							
	全国	粮食主产区	粮食主销区	粮食产销平衡区	东部	中部	西部	东北部
截距项	−0.001***	−0.001***	−0.005***	−0.001***	−0.002***	−0.005***	0.001***	0.004***
农业经济水平	0.082***	0.085***	0.119***	0.024	0.101***	0.148***	−0.032	−0.166***
农地经营规模	0.067***	0.108***	−0.060*	0.006	0.056**	0.065**	0.150***	−0.123***
种植结构	0.349***	0.234***	0.514***	0.521***	0.468***	0.177***	0.569***	0.250**
农业机械动力	0.143***	0.219***	−0.057**	0.138***	0.001	0.164***	0.111***	0.658***
调整R^2	0.291	0.307	0.255	0.428	0.323	0.218	0.563	0.569
样本数	70 490	25 440	2 070	3 540	6 806	5 852	5 550	930

3 讨 论

本文系统测度中国266个地级市农业碳排放回弹效应，揭示其时空格局、区域差异及驱动机制。整体而言，全国农业碳排放回弹效应长期大于1且持续上升，呈显著“回火效应”，说明农业领域技术进步的减排效果普遍被生产扩张或投入增加所抵消，这与陈佩[3]、黄晓慧等[14]的研究结论相呼应，印证了中国农业“技术增效但排放反弹”的共性问题。区域层面，农业碳排放回弹效应呈中部＞东部＞西部＞东北部的阶梯分布，东、中部持续表现为“回火效应”，东北地区阶段性出现“过度储存效应”，该异质性主要源于农业结构与投入差异，拓展了现有全国尺度研究的区域解释维度。动态演进上，碳排放回弹效应状态流动性较强，核密度曲线显示市区间绝对差异扩大，Markov链分析表明“俱乐部趋同”不明显，与贾锐宁等[10]的“路径依赖”结论存在差异，推测与农业部门受自然条件、政策干预及气候波动影响大、状态稳定性弱相关；Dagum基尼系数分解显示，超变密度是区域差异的主要来源，为差异化政策制定提供科学依据。驱动因素分析表明，种植结构、农业机械动力等均显著影响碳排放回弹效应，与黄恒君等[16]、Huang等[26]研究基本一致，进一步夯实了农业碳排放回弹驱动机制的研究基础，也为农业低碳发展与水土保持协同推进提供理论参考。

为进一步提高中国农业碳减排成效、抑制碳排放回弹效应，提出以下建议。

（1）推动农业低碳技术进步。聚焦碳排放回弹核心驱动因素，分区域开展技术研发与落地，提升技术减排实效：东、中部重点攻关农机节能、低碳耕作配套技术，适配规模化农业生产需求，破解“回火效应”技术瓶颈；西、东北地区重点研发小型低碳农机、节水降耗技术，贴合本地农业生产条件，降低技术应用门槛。

（2）因地制宜优化农业生产模式。东、中部引导高碳模式（如水稻连作）向低碳转型，推广节水节肥与保护性耕作，对减少复种或休耕农户给予生态补偿；西部稳定旱作规模，发展集雨补灌与地膜减量替代，防止规模扩张引发回弹；东北巩固黑土地保护与水稻间歇灌溉，严控水田扩张，对维持低碳生产者给予年度奖励。建立跨区域交流机制，促进经验扩散。

（3）健全核算标准与监测预警体系。制定农业碳排放核算标准，将农业碳排放回弹效应纳入现有碳排放统计体系，实现核算精准化。同时，试点建设“农业碳排放回弹动态监测平台”，实时掌握回弹动态，为精准调控提供数据支撑。

（4）建立激励约束机制。对采用低碳经济的经营主体给予信贷支持；对回弹指数持续偏高，无改善趋势的地区，探索征收回弹调节费或暂停低碳补贴；对保持“过度储存效应”的东北县市给予专项奖励。

4 结 论

（1）从整体与区域特征来看，中国各市区农业碳排放回弹效应整体偏高，存在“回火效应”。在区域层面，东、中部地区农业碳排放回弹水平相对较高，且在所有年份都表现为“回火效应”；西部和东北地区农业碳排放回弹效应较低，部分年份表现为“过度储存效应”。

（2）从时空演变特征来看，中国各市区农业碳排放回弹效应整体呈上升态势，市区之间的绝对差异存在扩大趋势，农业碳排放回弹“俱乐部趋同”现象不明显，存在“跨越式”跃迁发展的可能性。

（3）从空间差异分解来看，全国总体差异呈现“上升—下降”的波动趋势，中部地区的组内差异最大，农业碳排放回弹效应差异主要来源于超变密度。

（4）从差异形成机理来看，各解释变量在不同区域水平上的驱动力量存在差异，但农业机械动力和种植结构是驱动中国农业碳排放回弹效应的主要因素。

参考文献（References）

[1] 温涛，孙鹏翔，张林.中国农业碳排放的动态演进与区域格局[J].经济地理，2024，44(10)：165-175.
Wen Tao, Sun Pengxiang, Zhang Lin. Dynamic evolution and regional pattern of agricultural carbon emissions in China [J]. Economic Geography, 2024, 44 (10): 165-175.

[2] 侯力，田佳蔚.农村劳动力转移、农地规模经营与农业碳排放[J].人口学刊，2026，48(2)：116-128.
Hou Li, Tian Jiawei. Rural labor force transfer, agricultural land large-scale operation and agricultural carbon emissions [J]. Population Journal, 2026, 48(2): 116-128.

[3] 陈佩.农业碳排放回弹及机制分析：基于农业技术进步的视角[J].经济与管理，2024，38(5)：85-92.
Chen Pei. Agricultural carbon emission rebound and mechanism analysis: Based on the perspective of agricultural technological progress [J]. Economy and Management, 2024, 38(5): 85-92.

[4] Saunders H D. The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth [J]. The Energy Journal, 1992, 13 (4): 131-148.

[5] 徐建卫，邓光耀.中国分行业水资源消耗的回弹效应研究[J].统计与决策，2022，38(15)：66-70.
Xu Jianwei, Deng Guangyao. Study on rebound effect of water resources consumption by sectors in China [J]. Sta-

tistics & Decision, 2022,38(15):66-70.

[6] 胡东兰,申颢,刘自敏.中国城市能源回弹效应的时空演变与形成机制研究[J].中国软科学,2019(11):96-108.
Hu Donglan, Shen Hao, Liu Zimin. Study on the spatial-temporal evolution and formation mechanism of energy rebound effect in Chinese cities [J]. China Soft Science, 2019(11):96-108.

[7] 李健,刘舒琪,王晓祺.中国交通运输碳回弹效应的时空演进特征及机制[J].资源科学,2024,46(9):1737-1752.
Li Jian, Liu Shuqi, Wang Xiaoqi. Spatiotemporal evolution characteristics of carbon rebound effect in China's transportation industry and mechanism [J]. Resources Science, 2024,46(9):1737-1752.

[8] 李金铠,孙合草,张瑾.基于SML指数的环境回弹效应分析:模型与测算[J].中国环境管理,2021,13(2):102-109.
Li Jinkai, Sun Hecao, Zhang Jin. Analysis of environmental rebound effect based on the SML index: Model and measurement [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021,13(2):102-109.

[9] 许莹莹,崔正星.中国工业用水回弹效应的测算[J].统计与决策,2021,37(3):121-124.
Xu Yingying, Cui Zhengxing. Calculation of rebound effect of industrial water in China [J] .Statistics & Decision, 2021,37(3):121-124.

[10] 贾锐宁,邵帅,杜克锐,等.中国碳回弹效应的时空格局、动态演进及驱动因素:基于改进的碳排放随机前沿模型的实证考察[J].中国软科学,2022(12):23-34.
Jia Ruining, Shao Shuai, Du Kerui, et al. Spatial-temporal pattern, dynamic evolution, and driving factors of carbon rebound effect in China: Based on improved stochastic frontier model of carbon emission [J]. China Soft Science, 2022(12):23-34.

[11] 郭立祥,岳书敬.数字经济是否推动了碳排放"双控":基于碳回弹效应的视角[J].贵州社会科学,2024(5):127-136.
Guo Lixiang, Yue Shujing. Does digital economy promote "double control" of carbon emissions: From the perspective of carbon rebound effect [J]. Guizhou Social Sciences, 2024(5):127-136.

[12] 肖仁桥,肖阳.数字金融对碳回弹的影响及其空间溢出效应[J].西安财经大学学报,2024,37(3):38-54.
Xiao Renqiao, Xiao Yang. The impact of digital finance on carbon rebound and its spatial spillover effect [J]. Journal of Xi'an University of Finance and Economics, 2024,37(3):38-54.

[13] 徐依婷,穆月英,侯玲玲.水资源稀缺性、灌溉技术采用与节水效应[J].农业技术经济,2022(2):47-61.
Xu Yiting, Mu Yueying, Hou Lingling. Water scarcity, adoption of irrigation technologies and water conservation [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2022(2):47-61.

[14] 黄晓慧,杨飞,陆迁.粮食主产区农业碳排放回弹效应研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(12):2780-2788.
Huang Xiaohui, Yang Fei, Lu Qian. Research on the rebound effect of agricultural carbon emission based on technological progress in main grain producing areas [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(12):2780-2788.

[15] 郭庆宾,骆康,杨婉蓉.基于技术进步的长江经济带碳排放回弹效应测度[J].统计与决策,2020,36(19):115-117.
Guo Qingbin, Luo Kang, Yang Wanrong. Measurement of rebound effect of carbon emissions in Yangtze River economic belt based on technological progress [J]. Statistics & Decision, 2020,36(19):115-117.

[16] 黄恒君,王醒龙.农业能源碳排放回弹效应:时空演变及影响机制:基于农业技术进步视角[J].统计学报,2024,5(3):24-35.
Huang Hengjun, Wang Xinglong. Agricultural energy carbon emission rebound effect: Spatio-temporal evolution and influencing mechanism: Based on the perspective of agricultural technological progress [J]. Journal of Statistics, 2024,5(3):24-35.

[17] 张自强,徐锐谦.农业气象服务能否打破"杰文斯悖论":来自气象为农服务社会化试点的准自然实验[J].农业技术经济,2026(4):85-105.
Zhang Ziqiang, Xu Ruiqian. Can agricultural meteorological services break the Jevons paradox?: A quasi-natural experiment from the pilot meteorological services for agriculture [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2026(4):85-105.

[18] 斯日吉模楞,曹明磊,李东亮.资源型城市绿色经济效率时空特征及新质生产力驱动机制[J].水土保持通报,2026,46(3):290-304.
Sirijimoleng, Cao Minglei, Li Dongliang. Spatiotemporal characteristics of green economic efficiency and driving mechanisms of new quality productive forces in resource-based cities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(3):290-304.

[19] 尹忞昊,田云,卢奕亨.中国农业碳排放区域差异及其空间分异机理[J].改革,2023(10):130-145.
Yin Minhao, Tian Yun, Lu Yiheng. Regional differences and spatial divergence mechanisms of agricultural carbon emissions in China [J]. Reform, 2023(10):130-145.

[20] Dagum C. Decomposition and interpretation of Gini and the generalized entropy inequality measures [J]. Statistica, 1997,57(3):295-308.

（下转第 347 页）