

中国农业碳排放时空演化与预测研究

苏丽娟¹, 叶泽章¹, 王雅桃¹

(1. 兰州大学经济学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 剖析农业碳排放特征性事实与演变趋势对农业可持续发展和“双碳目标”具有重要意义。本文根据碳源测算 2005—2020 年省级农业碳排放, 采用核密度估计、马尔科夫转移矩阵描绘其动态分布与转移特征, 并基于 LSTM 预测与 Dagum 基尼系数与 ArcGIS 刻画分析农业碳排放区域差异与时空演化。研究发现: ①全国农业碳排放随时间动态分布趋于集中, 东、西部趋于稳定, 中部有极化趋势但差距缩小; ②近邻效应对农业碳排放演化存在多种影响, 不同邻域类型造成影响有差异, 一般表现为相邻省份水平越高, 其向上转移概率越小; ③2005-2060 年中国农业碳排放差异整体呈缩小趋势, 区域间差异将依旧是区域差异的主要来源; ④农业碳排放空间分布呈出河南和山东为中心的扩散趋势, 全国空间重心始终位于河南境内, 集聚态势先减弱后回弹, 各区域重心变化较小而集聚效应不尽相同。

关键词: 农业碳排放; 动态分布; 转移特征; 区域差异; 时空演化

农业既是温室气体排放源, 也是最易遭受气候变化影响的产业, 其碳排放量不容小觑^[1]。全球气候变暖背景下, 绿色低碳农业是经济可持续发展的必然之路, 中国作为农业大国更需关注农业碳排放的作用机理。自十八大以来, 党高度重视我国绿色农业发展, 作为《联合国气候变化框架公约》首批缔约国, 中国一直是全球气候治理的积极支持者, 为更好履行减排责任, 习近平总书记在 2020 年中央农村工作会议上指出“2030 年前实现碳排放达峰、2060 年前实现碳中和, 农业农村减排固碳, 既是重要举措, 也是潜力所在, 这方面要做好科学测算, 制定可行方案, 采取有力措施”, 2021 年印发的《“十四五”全国农业绿色发展规划》将全面推进农业绿色发展作为“十四五”时期农业经济建设领域的系统工程, 并提出了转变农业生产方式、提高农业资源利用效率和增强应对气候变化能力等发展目标, 党的二十大报告也指出“加快发展方式绿色转型”、“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。中国幅员辽阔, 各省经济水平存在较大差异, 气候与土壤类型和农业生产技术等也存在较大差异, 导致农业碳排放存在空间非均衡特征, 这给厘清农业碳排放发展现状和趋势、推进农业绿色发展带来了阻碍。

诸多学者对农业碳排放强度测算、区域差异、时空演变和未来预测等进行了深入研究。测度方面, 主要从农业碳源角度进行测度, 如通过化肥等碳源测算美国农业温室气体^[2,3]、从农地利用、稻田、牲畜肠道发酵和粪便管理等四方面主要碳源测算^[4,5]; 也有学者运用其他方法进行测度, 如生命周期评价法^[6]、农业系统估算方法^[7]、碳循环角度法^[8]; 部分学者着重从具体区域进行研究, 如四川省、江苏省等^[9,10]; 也有学者着重对特定行业进行测度, 如种植业、肉牛养殖等^[11,12]。区域差异和动态分布方面, 部分学者采用泰尔指数研究农业碳排放^[13]或农业碳生产率^[14]的区域差异与时空格局^[15,16], 一些学者则采用基础基尼系数^[17]或 Dagum 基尼系数及其分解方法^[18]进一步研究, 并借助核密度估计研究中国农业碳排放的动态分布^[19,20]。转移特征方面, 已有文献主要采取、序列平稳性检验和协整分析^[21]、马尔科夫转移矩阵^[22]等方法研究。时空演变方面, 学者们通过对农业碳排放空间相关性、空间溢出等研究, 认为我国农业碳排放存在显著的空间效应^[23], 且其主导因素具有阶段性特征^[24], 呈现

作者简介: 苏丽娟 (1982—), 女, 甘肃庆阳人, 兰州大学经济学院, 博士, 副教授, 研究方向为区域经济、能源经济等, E-mail: sulj@lzu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (72034003)、中央高校基本业务费项目 (22lzujbkx017)、甘肃省软科学专项项目 (22JR4Za046)、甘肃省教育厅优秀研究生创新之星项目 (2023CXZX-023)

出“西升、东降、中略降”的空间变化特征^[25]，对周边省具有负空间溢出效应^[26]。也有学者从其他方面研究，如与其它系统“脱钩、耦合”关系^[27]、驱动机制和影响因素研究^[28,29]、增长驱动因素的分解^[30]等。预测方面，既有研究主要运用灰色预测模型进行农业碳排放相关研究，如农业碳减排潜力^[31]、具体区域农业碳排放的预测如湖南省和南京市等^[32,33]、细分行业如种植业碳排放未来趋势^[34]，也有学者运用其他方法进行性研究，如构建计量模型预测^[35]、构建农户行为碳排放评价体系^[36]、Holt-Winter 无季节性模型^[37]、系统动力学方法^[38]等。

中国农业碳排放呈现怎样的动态分布趋势？转移特征如何？未来是否仍有较大差异？如果存在，其时空演化又是怎样的？这些问题的研究有助于深入剖析农业碳排放的特征性事实与演变趋势。纵观既有文献，关于农业碳排放的相关研究的层次多而范围广，但仍有补充空间，以往学者一般仅研究农业碳排放特征性事实的单一方面，在预测方面一般运用灰色预测等传统方法，运用泰尔指数或空间分布描述区域差异，较少考虑样本超变密与未来时空演化。基于现有研究，本文将采用核密度、传统与空间马尔科夫概率转移矩阵刻画其动态分布、转移特征，系统考察全国及东中西农业碳排放特征性事实，采用较先进的 LSTM，借助双层网络与门控机制，更好捕捉历史数据信息和保证数据预测精准度，合理预测未来中国农业碳排放趋势，结合预测数据与 Dagum 基尼系数剖析东中西和四大板块的区域差异，借助 Arc GIS 刻画 2005-2060 年空间格局，通过重心转移与标准差椭圆描绘其时空演化，以期助力政府推动农业可持续发展，以为农业碳减排和“双碳目标”提供绵薄之力。

1 研究方法和数据说明

1.1 研究方法

1.1.1 农业碳排放的测算

本文参考以往研究^[39]，测算农业碳排放时将碳源界定为化肥、农药、农用柴油、农用塑料薄膜、翻耕和灌溉，对应碳排放系数为 0.8956kg/kg、4.9341kg/kg、0.5927kg/kg、5.18kg/kg、312.6kg/km²、19.8575kg/hm²。农业碳排放计算公式如下，其中 y 为农业碳排放总量， p_i 为碳源碳排放系数， y_i 为 i 类碳源消耗量：

$$y = \sum_{i=1}^6 y_i \times p_i \quad (1)$$

1.1.2 核密度估计

本文利用核密度估计全国与东中西农业碳排放的分布位置与形态。假定各省农业碳排放概率函数为 $f(x)$ ，如下式所示，其中 N 表示省份数量， X_i 表示对应观测值， \bar{x} 表示其均值， h 表示带宽，采用高斯核密度函数估计其动态分布：

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - \bar{x}}{h}\right) \quad (2)$$

1.1.3 马尔可夫链转移矩阵

本文引入马尔科夫转移概率矩阵反映农业碳排放的转移特征，将全国 2005—2020 年各省农业碳排放使用四分法分为低、中、中和高水平四个等级^[40]，最终计算出概率矩阵；空间约束的马尔可夫转移矩阵需计算莫兰指数检验是否存在空间相关性，该指数的值域为[-1, 1]，该值为正则存在空间正相关性，否则为负相关性， n 为省份数； y_i 、 \bar{y} 为各省农业碳排放及均值； w_{ij} 为空间权重矩阵。

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

1.1.4 LSTM 长短期记忆网络

LSTM 神经网络最早由 Hochreiter & Schmidhuber (1997)^[41]提出，因出色的时序数据

处理能力,相较于其他模型具有更高的预测精度,被运用于预测时间序列数据^[42,43]。我国农业碳排放变动不仅会受到来自近期的影响,任意历史时期都可能对未来趋势造成冲击,但越远的时间节点造成的影响可能会越小,使用 LSTM 能更充分吸收历史数据信息,过滤冗余信息并进行有效预测。本文借鉴以往文献^[44,45]构造图 1 的框架,其中 X_t 是新传入训练过程的参数信息, h_{t-1} 表示上一次迭代的阶段性结果,遗忘门对 h_{t-1} 中进入激活函数的信息进行筛选, C_{t-1} 和 C_t 为上一个时期和此时期学习结果状态,更新门用于更新状态,最后由输出门控制将有效的信息输出,通过多次迭代修正误差获得较优预测模型。

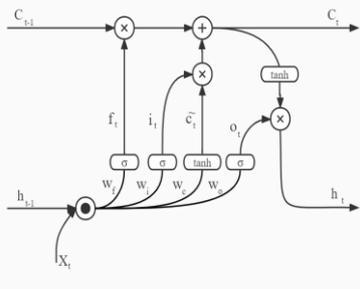


图 1 LSTM 长短期记忆网络框架

Fig.1 LSTM long and short-term memory network framework

1.1.5 区域差异衡量

一方面,本文根据 Dagum (1997)^[46]提出的基尼系数及分解方法揭示中国农业碳排放的区域差异及来源,总基尼系数可分为区域内贡献 G_w 、区域间贡献 G_{nb} 及超变密度贡献 G_t ;另一方面,本文参照以往研究^[47]采用标准差椭圆从空间维度揭示农业碳排放的空间分布格局与时空演化趋势,描绘其地理分布与区域差异。

1.2 变量选取及数据说明

本文中翻耕、灌溉、化肥(按折纯量)、农药、薄膜、柴油数据以当年实际值为准,翻耕为当年农作物播种面积,灌溉为当年有效灌溉面积,化肥为施用量,剩余碳源为实际使用量,数据来自《中国农村统计年鉴(2006-2021)》、《中国统计年鉴(2006-2021)》,受数据可得性限制,未包括中国香港、澳门和台湾地区。

关于预测数据,本文借鉴以往研究进行多次模拟实验,构造 2 层 LSTM 模型,使用前向滚动窗口预测法,滞后阶数选取为 3,训练集为 80%而测试集为 20%,采用 Adam 优化器进行优化训练,初始学习率为 0.005,分层阈值选为 1,选用 piecewise 学习率调整策略,学习率下降周期选为 125,MiniBatch 选为 24,进行 1000 轮训练;训练完毕后进行样本外预测。一方面,本文采用组合瀑布图展示其拟合和预测潜力,每两条相近的曲线代表实际值与拟合预测值,LSTM 不仅能捕捉线性趋势,且能较好抓住非线性关系;另一方面,本文采用四种性能指标发现 LSTM 预测均较为优秀,预测性能结果见图 2。综上所述,本文将选用 LSTM 预测 2021—2060 年各省农业碳排放,并探索其区域差异和时空演化。

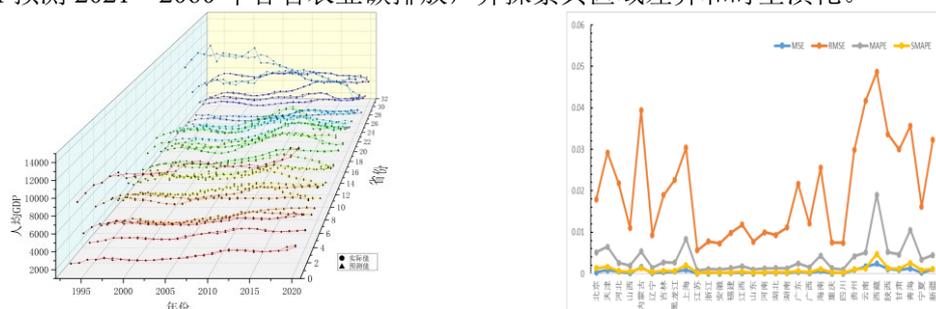


图 2 各省份 LSTM 预测性能

Fig.2 LSTM prediction performance in each province

2 中国农业碳排放动态分布与转移特征

2.1 中国农业碳排放动态分布趋势

本研究基于核密度估计探讨中国农业碳排放分布态势，总体而言，全国及各区域农业碳排放核密度分布呈现整体趋于稳定而内部差距缩小的态势，其中东部与西部趋势更明显，见图 3。具体分来看：①中国农业碳排放核密度分布呈现出曲线主峰较高且高度接近态势，次峰低矮且逐渐消失，表明农业碳排放较为集中；随时间演进核密度曲线呈现右拖尾现象，宽度基本不变且高度逐渐下降，反映出碳排放分布愈加集中，差异有缩小趋势；②东部排放核密度分布主峰高度与位置趋于稳定，右拖尾宽度随时间收窄，逐渐呈现为正态分布趋势，表明东部农业碳排放趋于稳定，内部差异逐渐缩小，可能是东部各省农业的产业升级与结构调整；③中部呈现两极分化趋势，但主峰与次峰宽度呈现收窄趋势，说明区域内部差距缩小，可能是因为农产品主产区如河南农业发展迅速有关；④西部主峰高度逐渐下降且宽度逐渐收窄，整体呈现随时间由左拖尾演化至正态分布趋势，说明西部内部差距逐渐缩小，可能是由于农业技术提升致使农业生产效率提高。

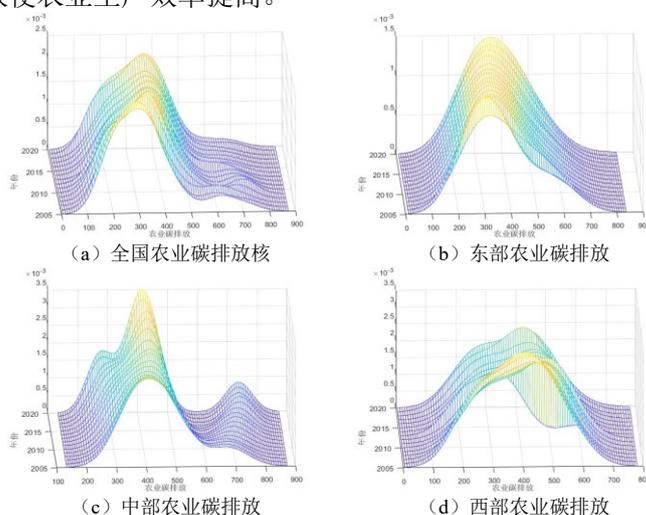


图 3 全国及东中西动态分布

Fig.3 Dynamic distribution throughout the country and in the East and West

2.2 动态转移特征

2.2.1 非约束下农业碳排放动态转移分析

本文一方面采用传统马尔可夫链分析中国农业碳排放转移特征，依据分位数划分为 4 种类型，主对角线表示保持原状态的概率，非对角线上数值则表示不同类型间转移概率，结果见表 1。具体来看，2005-2020 年中国农业碳排放具有以下特征：①各省农业碳排放发展受原水平的影响较大，主对角线上元素均大于 0.800，除中低类型外均大于 0.900，即四种类型保持原农业碳排放水平的概率较高，其中低、中高与高水平类型更高，说明四种类型均存在集聚现象。②农业碳排放有上升概率高于下降概率，除高水平省份外均存在上升可能性，如中低水平向上转移概率为 0.172，表现出向上发展态势。③农业碳排放短期内难以跨越式转移，转变基本发生于邻近类型，除了中低类型具有较小向上跃迁机率，说明中国农业碳排放的发展具有循序稳定性，可能是农业碳排放主要受影响于自然禀赋与技术水平等，自然禀赋短时间内难以改变，而各省技术水平等改变亦需要长时间积累与发展。

表 1 中国农业碳排放传统马尔科夫转移概率矩阵

Table 1 Traditional Markov transfer probability matrix of China's agricultural carbon emissions

区域	水平等级	低	中低	中高	高
全国	低	0.9828	0.0172	0.0000	0.0000
	中低	0.0085	0.8974	0.0855	0.0085
	中高	0.0000	0.0259	0.9224	0.0517
	高	0.0000	0.0086	0.0345	0.9569

2.2.2 地理邻域约束下农业碳排放动态转移分析

中国农业碳排放可能存在空间集聚特征,因此本文采用邻接空间权重矩阵计算农业碳排放全局莫兰指数和空间马尔科夫转移矩阵剖析农业碳排放空间动态转移特征。考察期内所有年份全局莫兰指数均显著为正,说明具有显著高值集聚特征,相邻省份农业碳排放相互影响;同时锯齿波动走势表明空间集聚性的波动性,见表2。农业碳排放的发展不仅受到内部生产资料的投入和制度等因素影响,同时与周边地区产业转移、资源共享等密切相关,本文引入空间滞后项,研究不同邻域类型对农业碳排放趋同演化的影响,见表3,通过对比可发现:

表2 中国农业碳排放全局莫兰指数

Table 2 Global Moran index of agricultural carbon emissions in China

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Moran's	0.315	0.314	0.304	0.293	0.286	0.276	0.262	0.254	0.135	0.224	0.206	0.195	0.196	0.190	0.184	0.183
p 值	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.060	0.008	0.013	0.017	0.016	0.018	0.021	0.021

①近邻效应对农业碳排放演化存在多种影响。相同考察期内空间转移概率矩阵结果与传统矩阵转移结果存在差异,说明近邻类型对转移特征具有明显影响,抑制作用表现为低水平省份若与高水平类型相邻,会抑制其向上转移,体现为 $P_{14|1}=1$ 而 $P_{14}=1$;促进作用表现为低水平省份与中高水平相邻,会受到促进作用,表现为 $P_{12|2}=0.0286$ 而 $P_{12}=0.0172$;邻近类型可能具有双向影响,最终变化方向由双方强度决定,如中低水平与高水平类型相邻,同时受到促进与抑制作用,促进作用使向下转移概率下降,即 $P_{21|1}=0$ 而 $P_{21}=0.0085$,抑制作用使上升机提高,即 $P_{23|1}=0$ 而 $P_{23}=0.0855$,最终呈现保持中低类型的几率增加,即 $P_{22|1}=1$ 而 $P_{22}=0.8974$ 。

②不同邻域类型的影响一般表现为邻高抑制,邻低则促进。较高邻域类型有助于周边地区农业碳排放降低,较低邻域类型使其提升,如中低类型向中高类型发展过程中,更高邻近类型有抑制作用,较低邻近类型则相反,体现为 $P_{23|1}=0 < P_{23}=0.0855 < P_{23|4}=0.3333$,可能是区域协调、产业结构调整和产业转移等原因,农业主产区、工业枢纽、服务业中心等功能定位愈加深入,工业枢纽和服务业中心地区对农业主产区具有空间溢出效应,而这些地区往往是较低的类型,如广东、上海等,使得农业主产区农业规模愈为扩大,因此向上转移几率更高。

③不同邻域背景使农业碳排放转移过程中的概率不尽相同。一般与水平更高省份相邻,将降低其向上转移概率。如中低类型向中高类型转移时,相邻类型等级越高其概率越小,概率体现为 $P_{23|1}=0 < P_{23|2}=0.0855 < P_{23|3}=0.1081 < P_{23|4}=0.3333$;但存在例外,如低水平类型向中低类型转移时,抑制作用不成立,概率体现为 $P_{12|1}=P_{12|3}=P_{12|4}=0 < P_{12}=0.0286$,可能原因是较高水平邻域与低水平类型省份的技术等发展梯度差相对较小,更利于区域间要素与产业转移。

表3 2005-2020年中国农业碳排放空间马尔科夫转移概率矩阵

Table 3 Spatial Markov transfer probability matrix of agricultural carbon emissions in China

邻近类型	水平等级	低	中低	中高	高
高	低	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	中低	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
	中高	0.0000	0.0909	0.9091	0.0000
	高	0.0000	0.0143	0.0000	0.9857
中高	低	0.9714	0.0286	0.0000	0.0000
	中低	0.0164	0.8852	0.0820	0.0164
	中高	0.0000	0.0408	0.9388	0.0204
	高	0.0000	0.0000	0.0294	0.9706
中低	低	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	中低	0.0000	0.8919	0.1081	0.0000
	中高	0.0000	0.0000	0.9167	0.0833
	高	0.0000	0.0000	0.6000	0.4000
低	低	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	中低	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000
	中高	0.0000	0.0000	0.8750	0.1250
	高	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

3 中国农业碳排放动态时空演化分析

3.1 中国农业碳排放区域差异

本文基于东中西视角，使用 Dagum 基尼系数展示中国农业碳排放的区域差异演化，并通过指数分解从区域内和区域间展示区域差异的变化规律，其次通过四大板块再次研究区域差异的变化规律以丰富研究视角，见图 4-5。

3.1.1 中国东中西部碳排放区域差异

2005-2060 年中国农业碳排放 Dagum 基尼系数总体呈下降趋势，由 2005 年 0.4287 降至 2060 年 0.3941，总体差异呈缩小趋势，子群间差异和子群内差异变化幅度较大，期初子群间贡献率是主要贡献来源，而后波动下降被超变密度反超，随后再度上升成为主要来源，表明区域间差异是区域差异主要表现特征，东中西区域间差异有波动但整体较为稳定，区位优势对农业碳排放影响较大。东部和中部子群内差异平稳下降，由 2005 年 0.4852 和 0.2586 降至 2060 年 0.4608 和 0.2387，降幅为 5.039% 和 7.703%；西部子群内差异波动上升，最终变化幅度较小，由 2005 年 0.3633 升至 2060 年 0.3642，涨幅 0.2339%；其中东部子群内差异是最大贡献来源，中部最小。子群间差异波动较大，除较早时期中-西差距之外，子群间差异水平总体保持稳定，整体呈现为互相靠近，中-西子群间差异稳步下降，中后期基本与东-中差距持平，2060 年下降幅度将达到 17.81%，说明无论当下还是将来，中-西差异都是我国农业碳排放差异重要来源，东-中子群间差异先下降后上升，降成为差异的重要来源。

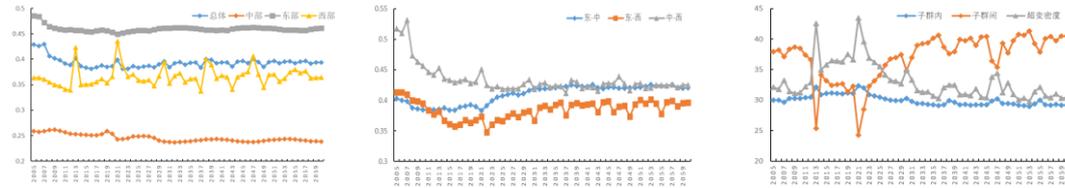


图 4 中国东中西部农业碳排放差异演化

Fig.4 Evolution of the difference in agricultural carbon emissions between East, Central and West China

3.1.2 中国四大板块碳排放区域差异

四大板块与东中西相似，农业碳排放 Dagum 总基尼系数呈下降趋势，说明区域差异总体呈缩小趋势；四大板块子群内贡献率相对稳定，子群间差异和子群内差异波动性强，期初子群间贡献率是主要贡献来源，波动下降被超变密度反超，随后波动上升再度成为主要贡献来源，再度表明子群间差异逐渐成为主要表现特征，同样证明了区位优势对农业碳排放的影响。子群内差异整体呈现下降趋势，东部和中部子群内差异呈现为平稳下降趋势，由 2005 年 0.5006 和 0.2614 降至 2060 年 0.4896 和 0.2602，降幅分别为 2.190% 和 0.4780%；东北与西部子群内差异波动上升，最终变化幅度差异较大，由 2005 年 0.0675 和 0.3633 升至 2060 年 0.0958 和 0.3641，降幅 42.0959% 和 0.2339%，东部子群内差异是最大贡献来源，东北为最小贡献来源。子群间差异波动较大，子群间差异水平总体保持稳定，整体呈现为逐渐分组互相靠近的趋势。其中，东-西和中-西子群间差异波动下降而中-东缓慢上升，到中后期三个子群间差异基本持平，说明东-西、中-西和中-东子群间差异将是我国农业碳排放差异的重要来源；东北-东子群间差异将平稳下降，处于中游水平；东北-西子群间差异波动缓慢上升而中-东北平缓下降，两者逐渐靠拢并稳定居于下方。

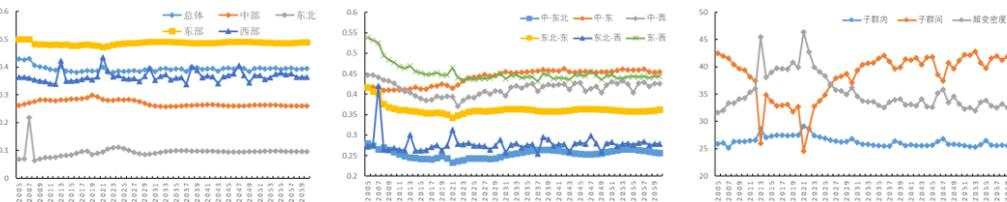


图 5 四大板块农业碳排放差异演化

Fig.5 Evolution of agricultural carbon emission differences among the four major segments

3.2 中国农业碳排放格局演变

3.2.1 中国农业碳排放空间演变格局

本文采用自然断点法按农业碳排放将 31 个省份为高、中高、中低和低水平四个等级，借助 ArcGIS 软件绘制 2005、2020、2030 和 2060 中国农业碳排放空间分布，呈现为以河南和山东为主的“中心-外围”扩散趋势，在 2030 年以前总体达到峰值，2060 年农业碳排放将较以往时期低。具体来看，2005 年各地区农业碳排放普遍较低，高水平仅有河南、河北和山东三省，中高水平有黑龙江等 9 省，其余地区均处于中低水平或低水平；2020 年高水平仅有河南和山东两省，河北降为中高类型，与此同时黑龙江、吉林等 5 省上升为中高类型，剩余 14 省为中低和低类型，农业碳排放与 2005 年相比呈现为增加态势；2030 年高水平省份个数将增至 5 个，中高类型个数降至 13 个，剩余 13 省为中低和低类型，农业碳排放与 2020 年相比呈现总体持平而内部有调整态势；2060 年高水平省份个数将减少至 5 个，且中高类型仅有黑龙江、新疆等 8 省，其余 18 个省份均为中低和低类型，农业碳排放整体空间分布呈现出下降趋势，结果见图 6（本文底图审图号为 GS（2019）1822）。

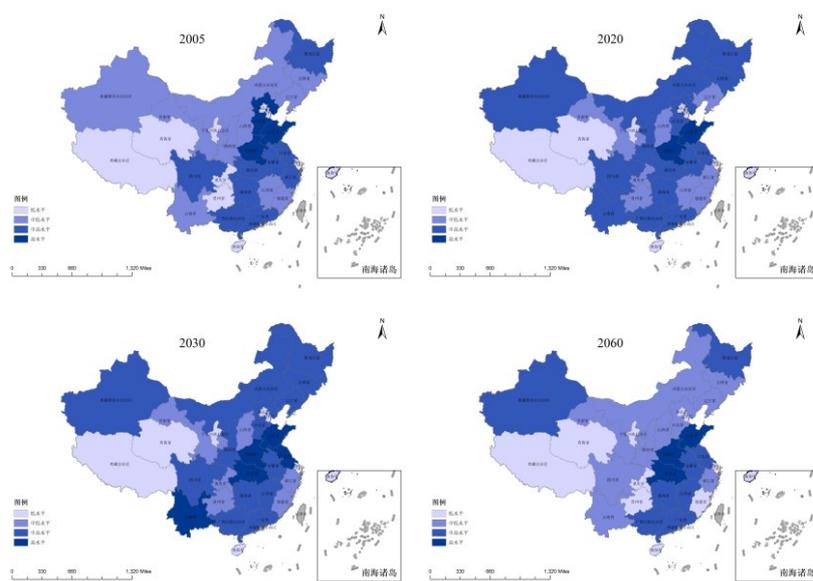


图 6 2005-2060 中国省际农业碳排放时空格局演变

Fig.6 Evolution of spatial and temporal patterns of inter-provincial agricultural carbon emissions in China from 2005—2060

3.2.2 中国农业碳排放时空演变轨迹

为直观剖析中国农业碳排放时空演变趋势，本文绘制 2005—2060 年农业碳排放标准差椭圆和重心转移，从中心性、延展性以及方向性进行分析，结果见图 7。2005—2060 年全国农业碳排放强度空间重心在研究期内始终位于河南，河南作为我国人口大省，劳动力充足，且地处华北平原、黄淮海冲积平原，拥有肥沃的土地资源，其大部分区域属温带季风气候，温和湿润，适宜农作物的生长和产量的提升，再加上地处黄河流域，水源上是天然优势，因此也是我国农业大省和粮食主产区，如小麦产量占全国产量的 1/4；重心移动轨迹方面，2005—2020 年我国农业碳排放重心由东南向西北移动，说明此期间我国农业碳排放的核心分布逐渐向西北移动，而后直到 2060 年，农业碳排放将在河南省西部及西北部徘徊，并有稳定于西北部的趋势，说明未来我国农业碳排放的发展将呈现重点向西北移动的空间格局。标准差椭圆均为东北-西南方向，从 2005-2020 年，椭圆面积不断增大，说明农业碳排放的集聚效应减弱，到 2030 年椭圆面积继续增大，直至 2060 年椭圆面积呈现波动缩小趋势，说明中国农业碳排放的集聚效应有一定回弹。



图7 2005—2060 中国农业碳排放重心轨迹及标准差椭圆

Fig.7 Trajectory and standard deviation ellipse of the center of gravity of China's agricultural carbon emissions, 2005—2060

3.3.3 区域农业碳排放时空演变轨迹

为进一步细致刻画我国农业碳排放时空演化轨迹,本文按东中西和四大板块两种划分方式来描摹区域农业碳排放的演化,结果见图8。2005—2060年西部农业碳排放强度空间重心在研究期内始终位于四川,其随时间逐渐朝着西北偏北方向移动,最终接近四川与甘肃交界处;中部空间重心期初位于河南,其早期朝着东北偏北方向移动至山东境内,而朝着西南偏南回归至河南、山东、江苏和安徽四省交界处;东部空间重心期初位于江苏西北部,随时间朝着东南偏南移动,此后基本位于安徽省内。西部标准差椭圆均为西北-东南方向,椭圆面积先增大而后基本保持不变,说明西部农业碳排放的集聚效应先减弱后维持稳定;中部标准差椭圆均为东北-西南方向,椭圆面积逐渐减小,说明其农业碳排放集聚效应处于加强趋势;东部标准差椭圆也均为东北-西南方向但更接近南-北方向,椭圆面积逐渐增大,说明东部农业碳排放集聚效应处于减弱趋势。

按四大板块分析,2005—2060年西部农业碳排放强度空间重心与上文的西部类似,始终位于四川,随时间沿西北偏北移动,最终位于四川与甘肃交界处;中部重心期初在湖北与河南交界处,随时间在湖北境内沿南移动;东部重心始终“位于”安徽境内,随时间朝南移动;东北重心期则在吉林内沿着东北缓慢移动。标准差椭圆方面:西部农业碳排放标准差椭圆一直为西北-东南方向,面积先增大而后基本不变,说明西部集聚效应先减弱后维持稳定;中部椭圆方向均为西北-东南但更接近南-北,椭圆面积稍有缩小,说明集聚效应有轻度加强;东部椭圆方向由南-北逐渐向东北-西南偏移,椭圆面积基本无变化,说明其集聚效处于稳定;东北椭圆方向均为东北-西南,椭圆面积略有缩小,表明集聚效应有轻度加强。

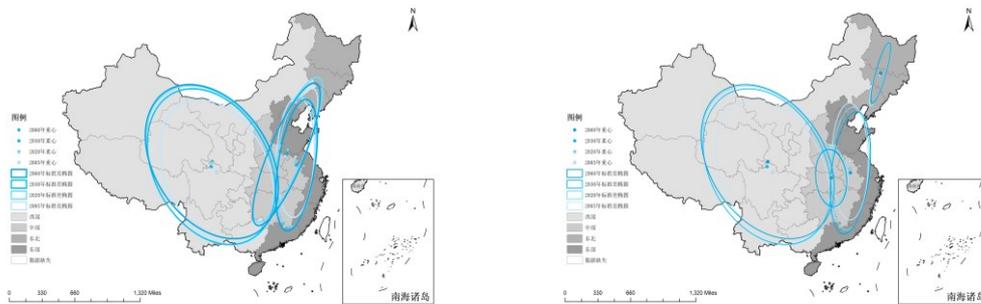


图8 2005—2060年分区域农业碳排放时空演变轨迹

Fig.8 Spatial and temporal trajectory of agricultural carbon emissions by subregion, 2005—2060

4 结论与启示

本文通过化肥等碳源测算全国 2005—2020 年农业碳排放,采用核密度估计刻画其动态分布,通过传统与空间马尔科夫概率转移矩阵分析动态转移特征,并借助 LSTM 预测未来农业碳排放,使用 Dagum 基尼系数展示东中西与四大板块总观察期区域差异,通过重心转移与标准差椭圆描绘 2005—2060 年时空演变趋势。研究发现:(1)全国及各区域的农业碳排放核密度分布呈现出整体趋于稳定内部差距逐渐缩小的态势,其中东部与西部趋势更明显,中部有分化趋势但差距缩小。(2)近邻效应对农业碳排演化转移特征存在多种影响,邻域类型有不同影响,不同邻域背景一般表现为相邻省份水平越高,向上转移概率越小。(3)2005—2060 年中国整体碳排放差异总体呈缩小趋势,东中西分类下子群间差异是区域差异主要来源,东部和中部区域内差异下降,东部是区域内差异最大来源而中部最小,子群间差异波动大但总体稳定;四大板块子群间差异是差异主要来源,东部和中部区域内差异下降,东北与西部区域内差异上升,东部是区域内差异最大来源而东北最小,区域间差异波动大但总体稳定。(4)2005—2060 年中国农业碳排放呈现以河南和山东为主的“中心—外围”扩散趋势,2030 年前达到峰值而 2060 年处于较低时期,重心始终位于河南,标准差椭圆为东北-西南方向,面积先增后减,集聚效应减弱后回弹;按东中西划分,三区域重心轨迹为始终位于四川、由河南先朝东北移至山东后朝西南至河南等四省交界、由江苏朝东南移至安徽,集聚效应分别呈现先减弱后稳定、加强、减弱;按四大板块划分,四区域重心分别保持四川、湖北与河南交界、安徽以及吉林,集聚效分别呈现为减弱后稳定、轻度加强、稳定趋势及轻度加强。

基于上述内容,本文提出如下启示:(1)中国各省自然资源禀赋不同,农业碳排放分布的特点与区域差异将长期存在,不盲目追求数字与表面目标上达标,避免陷入过度竞争的“内卷陷阱”,根据自身农业特点具有针对性制定绿色农业发展策略。(2)建立并不断完善政策体制,一方面,政府牵头制定差异化农业碳减排规划,明确农业碳排放责任主体,使化肥等相关行业厂家充分参与交易;另一方面,通过设立低碳农业专项补贴、税收减免等方式优化支农力度,为先进绿色技术的开发和推广提供资金支持和技术指导。(3)加大区域协调力度:积极倡导合作共赢理念,让各地都充分发挥农业禀赋、技术等优势,把握农业碳排放区域差异,协同发展策略,可按东中西与四大板块采取“对口帮扶”策略,促成共同减排良性互动。(4)加大低碳农业科技研发投入:构建低碳农业发展机制与技术支撑体系,依托低碳技术项目孵化器、科研立项等措施鼓励高校和科研院所等加强农业技术研发,攻克现代农业发展中的技术性瓶颈,提升农业废弃物的回收利用率,如用秸秆制生物燃料等。

参考文献

- [1] 田云,尹恣昊.中国农业碳排放再测算:基本现状、动态演进及空间溢出效应[J].中国农村经济,2022(03):104-127.
- [2] Tristram O West,Gregg Marland. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2002,91(1).
- [3] Joseph Fargione, Jason Hill, David Tilman et al. Land clearing and the biofuel carbon debt[J]. *Science*, 2008, 319 (5867) : 1235-1238.
- [4] 田云,张俊飏,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105.
- [5] 李俊杰.民族地区农地利用碳排放测算及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(09):42-47.
- [6] 张广胜,王珊珊.中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J].农业经济问题,2014,35(07):18-26+110.
- [7] 赵晓强,张元庆.山西省农业温室气体排放探析[J].中国农业资源与区划,2019,40(08):38-44.
- [8] 郭海红,盖凌云.中国农业碳效应时空分异及驱动机理研究[J].宁夏社会科学,2021(05):74-84.
- [9] 卢奕亨,田云,周丽丽.四川省农业碳排放时空演变特征及其影响因素研究[J/OL].中国农业资源与区划:1-14[2023-06-03].
- [10] 陈慧,付光辉,刘友兆.江苏省县域农业温室气体排放:时空差异与趋势演进[J].资源科学,2018,40(05):1084-1094.
- [11] 丁宝根,赵玉,邓俊红.中国种植业碳排放的测度、脱钩特征及驱动因素研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(05):1-11.
- [12] [1]闫佳惠,张越杰.中国肉牛主产区碳排放效率时空演化特征及空间分布格局研究[J].地理科学,2023,43(05):879-888.
- [13] 胡剑波,王青松.基于泰尔指数的中国农业能源消费碳排放区域差异研究[J].贵州社会科学,2019(07):108-117.

-
- [14] R. Wang, Y. Feng. Research on China's agricultural carbon emission efficiency evaluation and regional differentiation based on DEA and Theil models[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, 18(6).
- [15] 夏四友, 赵媛, 许昕, 文琦, 崔盼盼, 唐文敏. 近 20 年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(03): 596-608.
- [16] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国种植业碳排放时空分异研究[J]. *统计与决策*, 2020, 36(15): 92-95.
- [17] 田云, 张俊飏. 中国省级区域农业碳排放公平性研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 36-44.
- [18] 刘华军, 鲍振, 杨骞. 中国农业碳排放的地区差距及其分布动态演进——基于 Dagum 基尼系数分解与非参数估计方法的实证研究[J]. *农业技术经济*, 2013(03): 72-81.
- [19] 王惠, 卞艺杰. 农业生产效率、农业碳排放的动态演进与门槛特征[J]. *农业技术经济*, 2015(06)
- [20] [田云, 张俊飏, 尹朝静, 吴贤荣. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进——基于 31 个省(市、区)2002-2011 年的面板数据分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(07): 91-98.
- [21] 田云, 张俊飏, 丰军辉, 等. 中国种植业碳排放与其产业发展关系的研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(06): 781-791.
- [22] Quande Qin, Huimin Yan, Jie Liu, Xiude Chen, Bin Ye. China's agricultural GHG emission efficiency: regional disparity and spatial dynamic evolution.[J]. *Environmental geochemistry and health*, 2020, 44(9).
- [23] 李秋萍, 李长建, 肖小勇, 等. 中国农业碳排放的空间效应研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(04): 30-35. DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2015.112. 5.
- [24] 何艳秋, 戴小文. 中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(09): 1780-1790.
- [25] 张希栋, 杨程博, 刘静. 我国农业碳排放时空演变特征研究[J]. *环境保护*, 2023, 51(Z1): 42-48. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2023.z1.022.
- [26] 郑阳阳, 罗建利. 农业生产效率的碳排放效应: 空间溢出与门槛特征[J]. *北京航空航天大学学报(社会科学版)*, 2021, 34(01): 96-105.
- 7.
- [27] 陈柔, 何艳秋, 朱思宇, 徐杰. 我国农业碳排放双重性及其与经济协调性研究[J]. *软科学*, 2020, 34(01): 132-138.
- [28] Brian C. Murray. Overview of Agricultural and Forestry GHG Offsets on the US Landscape[J]. *Choices*, 2004, 19(3).
- [29] 徐湘博, 李畅, 郭建兵, 等. 土地转入规模、土地经营规模与全生命周期作物种植碳排放——基于中国农村发展调查的证据[J]. *中国农村经济*, 2022, (11): 40-58.
- [30] 吴贤荣, 张俊飏. 中国省域农业碳排放: 增长主导效应与减排退耦效应[J]. *农业技术经济*, 2017, (05): 27-36.
- [31] 高标, 房骄, 卢晓玲, 等. 区域农业碳排放与经济增长演进关系及其减排潜力研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(01): 13-18.
- [32] 黎孔清, 陈俭军, 马豆豆. 基于 STIRPAT 和 GM(1,1) 模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(02): 345-352.
- [33] 黎孔清, 马豆豆, 李义猛. 基于 STIRPAT 模型的南京市农业碳排放驱动因素分析及趋势预测[J]. *科技管理研究*, 2018, 38(08): 238-245.
- [34] 谢永浩, 刘争. 中国省域种植业碳汇量、碳排放量的时空分异及公平性研究[J]. *世界农业*, 2022, (02): 100-109.
- [35] 王兴, 马守田, 濮超, 赵鑫, 王钰乔, 张海林. 西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(S2): 231-234.
- [36] 冉光和王建洪, 王定祥. 我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究[J]. *农业经济问题*, 2011, 32(02): 32-38+110-111.
- [37] 徐家鹏. 中国农业能源消耗与 CO₂ 排放: 趋势及减排路径——基于 Holt-Winter 无季节性模型和“十三五”的预测[J]. *生态经济*, 2016, 32(02): 122-126.
- [38] 徐磊, 董捷, 张俊峰, 等. 基于 SD 模型的湖北省农业碳排放系统仿真与政策优化[J]. *资源开发与市场*, 2017, 33(09): 1031-1035.
- [39] 伍国勇, 刘金丹, 杨丽莎. 中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(10): 69-78.
- [40] [1] 莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. *地理科学*, 2021, 41(08): 1324-1335.
- [41] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory.[J]. *Neural computation*, 1997, 9(8).
- [42] Choi Jae Young, Lee Bumshik. Combining LSTM Network Ensemble via Adaptive Weighting for Improved Time Series Forecasting[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018
- [43] 欧阳红兵, 黄亢, 闫洪举. 基于 LSTM 神经网络的金融时间序列预测[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(04): 27-35.
- [44] Alex Graves. Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks[M]. Springer Berlin Heidelberg: 2012.
- [45] 胡剑波, 罗志鹏, 李峰. “碳达峰”目标下中国碳排放强度预测——基于 LSTM 和 ARIMA-BP 模型的分析[J]. *财经科学*, 2022(02): 89-101.
- [46] Camilo Dagum. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. *Empirical Economics*, 1997, 22(4)
- [47] 李天籽, 韩沉刚. 武汉城市圈科技金融效率时空特征与趋同演化分析[J]. *经济地理*, 2022, 42(01): 61-69.

Study on the spatial and temporal evolution and prediction of agricultural carbon emissions in China

SU Lijuan¹, YE Zezhang¹, WANG Yatao¹

(1. School of Economics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu)

Abstract: Provincial agricultural carbon emissions were measured from 2005 to 2020 based on carbon sources, and their dynamic distribution and transfer characteristics were depicted using kernel density estimation, Markov transfer matrix, and regional differences and spatial and temporal evolution of agricultural carbon emissions were analyzed based on LSTM prediction, Dagum Gini coefficient and ArcGIS mapping. It is found that: ① the dynamic distribution of national agricultural carbon emissions over time tends to be concentrated, the east and west tend to be stable, and the central part has a polarization trend but the gap is narrowing; ② there are various influences of the proximity effect on the evolution of agricultural carbon emissions, and there are differences in the influences caused by different types of neighborhoods, which are generally manifested in the fact that the higher the level of the neighboring provinces, the lower the probability of their upward transfer; ③ the differences in China's agricultural carbon emissions in the period of 2005-2060 show an overall narrowing trend, and the differences between regions will be reduced in the same period. The overall trend of agricultural carbon emission differences in China from 2005 to 2060 is shrinking, and inter-regional differences will remain the main source of regional differences; ④ The spatial distribution of agricultural carbon emissions shows a diffusion trend centered in Henan and Shandong, with the national spatial center of gravity always located in Henan, and the agglomeration trend weakening first and then rebounding, with small changes in the center of gravity in various regions and different agglomeration effects.

Keywords: agricultural carbon emissions; dynamic distribution; transfer characteristics; regional differences; spatial and temporal evolution