

DOI: 10.5846/stxb201806041258

夏四友, 赵媛, 许昕, 文琦, 宋永永, 崔盼盼. 1997—2016 年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Xia S Y, Zhao Y, Xu X, Wen Q, Song Y Y, Cui P P. Spatiotemporal dynamics and driving factor analysis of agricultural carbon emissions rate in China from 1997 to 2016. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

# 1997—2016 年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素

夏四友<sup>1,3</sup>, 赵媛<sup>1,2,3,\*</sup>, 许昕<sup>1,3</sup>, 文琦<sup>4</sup>, 宋永永<sup>5</sup>, 崔盼盼<sup>1,3</sup>

1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

2 南京师范大学金陵女子学院, 南京 210097

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

4 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021

5 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

**摘要:** 研究农业碳排放率时空格局演变及驱动因素对指导农业碳减排和实现农业低碳化发展具有重要意义。本文对 1997—2016 年中国 31 个省域的农业碳排放率进行测度, 在此基础上采用 ESTDA 框架和 GWR 模型从时空关联视角对其时空动态演变特征及驱动因素进行分析。研究结果表明: (1) 中国农业碳排放率空间正相关性呈减弱趋势, 农业碳排放率空间差异逐渐扩大。 (2) 中国农业碳排放率的时空格局动态变迁路径差异明显, 局部空间结构和空间依赖方向上都具有较强的稳定性。 (3) 协同增长型省域数量呈现减少趋势, 表明中国农业碳排放率的空间格局整合性下降且由协同增长主导型向协同与竞争并存的格局转变。 (4) 农业碳排放率具有较强的局部空间关联模式和空间转移惰性, 表现为一定的路径依赖或空间锁定特征。 (5) 农业碳排放率驱动因素的空间非均衡联动区域性特征显著, 农村经济发展水平的影响程度从南向北依次递减, 居民收入状况和种植结构的分布趋势为从东向西依次递增, 耕地面积构成状况对东北地区农业碳排放率的提升作用高于中西部地区, 耕地规模对农业碳排放率具有负向作用, 回归系数从东南向西北依次递增。

**关键词:** 农业碳排放率; 时空动态; LISA 时间路径; GWR 模型; 中国

## Spatiotemporal dynamics and driving factor analysis of agricultural carbon emissions rate in China from 1997 to 2016

XIA Siyou<sup>1,3</sup>, ZHAO Yuan<sup>1,2,3,\*</sup>, XU Xin<sup>1,3</sup>, WEN Qi<sup>4</sup>, SONG Yongyong<sup>5</sup>, CUI Panpan<sup>1,3</sup>

1 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Jinling College, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

4 College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

5 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

**Abstract:** Studying the evolution of the spatiotemporal pattern of agricultural carbon emissions rate and their driving factors and realising the development of low agricultural carbonisation is highly significant in helping guide the carbon reduction of agriculture. This study calculated the agricultural carbon emissions rate in 31 provinces of China from 1997 to 2016. To do this, the Exploratory Time-space Data Analysis (ESTDA) framework and the Geographically Weighted Regression (GWR) model were used to investigate the spatiotemporal dynamic evolution characteristics and driving factors from the perspective

基金项目: 国家自然科学基金重点基金项目 (41430635); 国家自然科学基金项目 (41661042)

收稿日期: 2018-06-04; 网络出版日期: 2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoyuan@njnu.edu.cn

of spatiotemporal connection. The results showed that (1) the positive spatial correlation of China's agricultural carbon emissions rate is weakening, and the spatial variation of inter-provincial agricultural carbon emissions rate shows an expanding trend, (2) the spatial and temporal pattern of China's agricultural carbon emissions rate has obvious differences in dynamic transition paths, and they have strong stability in both local spatial structure and spatial dependence, (3) the number of synergistic growth provinces shows a decreasing trend, indicating that the spatial pattern of agricultural carbon emissions rate is declining and the transition changed from a synergistic growth-oriented type to a coexistence of synergy and competition, (4) the agricultural carbon emissions rate has a strong local spatial correlation model and spatial transfer inertia, which is characterised by path-dependence or spatial lock-in, and (5) spatial disequilibrium linkage characteristics of driving factors of agricultural carbon emissions rate are significant, and the effect of economic development level decreases gradually from south to north. The distribution pattern of residents' incomes and planting structure increases from east to west. The effect of cultivated land area contributes significantly to the increase in the carbon emissions rate of agriculture in northeast China. The scale of cultivated land has a negative effect on the carbon emissions rate of agriculture, and the regression coefficient gradually increases from southeast to northwest.

**Key Words:** agricultural carbon emissions rate; spatiotemporal dynamics; LISA time path; GWR model; China

温室效应引起的全球气候变暖是当前人类社会可持续发展面临的巨大挑战,尤其是人类活动产生的温室气体是导致气候变化的罪魁祸首<sup>[1-2]</sup>。近百年来地球表面年均气温上升了约0.6℃,当气温上升5—6℃时,地球将面临深重的灾难<sup>[3]</sup>,发展低碳经济、节能减排俨然已成为解决全球气候变暖备受关注的 newPath。研究表明农业排放的CO<sub>2</sub>在人为温室气体排放总量中占21%—25%,已成为温室气体排放的重要排放源之一<sup>[4-5]</sup>。中国农业源温室气体排放约占全国温室气体排放总量的17%,其中农业排放的CH<sub>4</sub>和NO<sub>2</sub>分别占全国总量的50%和92%<sup>[6-7]</sup>,且自1978年以来中国农业碳排放以年均5%的速度持续上升<sup>[8]</sup>。农业源温室气体排放比重与增速不容小觑,面对中国碳减排的约束性目标,农业更不能“独善其身”,需不断降低其碳排放强度,提高单位碳产出率以推动中国农业低碳化发展和实现整体碳减排目标。

国外学者较多关注农业碳源和碳排放的影响因素研究,如Lal<sup>[9]</sup>对农业碳排放影响因素进行分析,发现地区间农业排放量存在较大差异主要是由于不同耕作方式引起;Johnson<sup>[10]</sup>对主要农业碳源进行分析,认为农用物资废弃物和农作物燃烧是农业碳排放的重要来源;Lin<sup>[11]</sup>和Jiang<sup>[12]</sup>通过研究指出灌溉、翻耕、农业柴油、农膜、农药及化肥等因素与农业碳排放有重要关系;Tasman<sup>[13]</sup>通过对比不同国家间的农业碳排放,发现不同的农业生产方式是导致国家间农业碳排放存在差异的重要原因。国内学者从农业碳排放量测算<sup>[14-15]</sup>、影响因素分解及区域差异<sup>[16-18]</sup>、农业碳足迹<sup>[19-20]</sup>、低碳视角下农业生态补偿<sup>[21-22]</sup>、农业碳排放绩效<sup>[3,23]</sup>与碳生产率<sup>[24]</sup>等方面进行了大量实证探讨。然而上述研究大多将研究区视为相互独立的均质单元,较少考虑农业碳排放的空间依赖性和异质性。近年来,采用空间分析方法对农业碳排放的时空格局特征进行研究的成果日益增多。如吴贤荣等<sup>[25]</sup>对中国农业碳减排的空间关联特征进行分析,发现一个省域的农业碳减排潜力与其所处的环境及相邻省域的发展情况具有一定相关性。张志高等<sup>[26]</sup>对河南省农业碳排放时空演化特征进行研究,发现全省农业碳排放空间分布呈较为明显的集聚特征。陈儒等<sup>[27]</sup>对中国区域农业碳补偿时空格局进行分析,得出了中国农业碳排放与碳汇的空间分布格局均发生一定变动的结论。程琳琳等<sup>[24]</sup>对中国农业碳生产率的空间分异特征进行分析,认为我国农业碳生产率区域间“异质化”与区域内“均质化”的趋势显现。范大莎等<sup>[28]</sup>对东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征进行研究,发现东北三省农田生态系统碳排放量的全局空间正相关整体呈逐渐增强的趋势。

上述研究为持续推进农业碳排放的深入研究提供了很好的科学参考和借鉴,但总结发现:(1)已有研究大多割裂了时间过程的连续性,导致对农业碳排放空间结构变迁的时间过程探讨不足。而Rey等提出的探索性时空数据分析(Exploratory Time-space Data Analysis, ESTDA)框架可以从时空关联角度探讨农业碳排放率

的时空格局问题,弥补当下忽略时间维度的不足。(2)在影响因素分析方面,既有研究多是基于时间序列数据建立起的全局模型,如面板回归分析<sup>[14,23]</sup>、灰色关联分析<sup>[16,18]</sup>、因素分解<sup>[7,17]</sup>等方法,缺乏空间考量,导致对区域内部农业碳排放的空间异质性的解释力度不够。基于此,本文采用 ESTDA 框架对 1997—2016 年中国农业碳排放率的时空动态特征进行分析,并结合地理权重回归( Geographically Weighted Regression, GWR)模型对中国农业碳排放率的驱动因素进行探讨,以为各省域因地制宜地制定农业发展与碳减排政策提供参考。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 农业碳排放量和碳排放率测算

本文从农业直接碳排放源视角出发,构建农业碳排放源指标体系(表 1),在参考田云等<sup>[15]</sup>构造的农业碳排放公式的基础上,农业碳排放量计算公式可表示为:

$$CE = \sum_{i=1}^n c_i = \sum_{i=1}^n e_i \times \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:  $CE$  为农业碳排放总量;  $e_i$  为碳源  $i$  的量;  $\varepsilon_i$  为碳源  $i$  的碳排放系数。各碳源指标的含义详见参考文献<sup>[3,14]</sup>,各碳源对应的碳排放系数和参考文献来源见表 1。

表 1 农业碳排放源及对应的碳排放系数

Table 1 Carbon emissions coefficient of agricultural carbon emission sources

碳源 Carbon source	排放系数 Coefficient	数据参考来源 References source
化肥 Fertilizer (kg CE/kg)	0.896	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
农药 Pesticide (kg CE/kg)	4.934	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
农膜 Mulching film (kg CE/kg)	5.180	IREEA(南京农业大学农业资源与生态环境研究所)
柴油 Diesel (kg CE/kg)	0.593	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)
水稻 Rice (g CE/(m <sup>2</sup> ·天))	3.136	Wang <sup>[29]</sup> 、Matthews <sup>[30]</sup> 、Cao <sup>[31]</sup>
灌溉 Irrigation kg(C)·hm <sup>2</sup>	266.480	West 等 <sup>[32]</sup>
翻土 Ploughing (kg CE/km <sup>2</sup> )	312.600	IABCAU(中国农业大学农学与生物技术学院)
猪 Pig (kg CE/(头·年))	34.091	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)
牛 Cow (kg CE/(头·年))	415.910	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)
羊 Sheep (kg CE/(头·年))	35.182	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)

基于各省域农业碳排放总量和农业总产值,农业碳排放率可表示为:

$$CR = AGDP / CE \quad (2)$$

式中:  $CR$  为农业碳排放率;  $AGDP$  为农业总产值;  $CE$  为农业碳排放量。为了便于对比和分析,参照 IPCC 2007 年第四次评估报告的结果<sup>[33]</sup>,将  $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $N_2O$  统一换算成标准 C,其中 1t  $CO_2$  中含有 0.273t 标准 C,1t  $CH_4$ 、 $N_2O$  所引发的温室效应分别等同于 6.818t 和 81.273t 标准 C 所产生的温室效应。

#### 1.1.2 全局空间自相关法

采用全局空间自相关法对中国农业碳排放率进行全局自相关分析,从全局视角考察农业碳排放率在空间上的相关程度。鉴于该方法应用已较为成熟,在此不再赘述,具体原理及步骤详见参考文献<sup>[34]</sup>。

#### 1.1.3 LISA 时间路径

LISA(Local Indicators of Spatial Association)时间路径是基于 LISA 坐标在 Moran 散点图中的时间迁移特性,来刻画省域农业碳排放率在局部区域范围内的时空协同变化以及确定碳排放率局部空间差异的时空动态性,以实现省域碳排放率及其滞后随时间的成对移动,通过融入时间和空间维度,使静态的 LISA 实现动态的

连续表达<sup>[35]</sup>,可以用来反映中国农业碳排放率的局部时空协同变化特征。省域  $i$  的农业碳排放率在 Moran's  $I$  散点图中的时间路径可看作一组向量 $[(y_{i,1}, yL_{i,1}), (y_{i,2}, yL_{i,2}), \dots, (y_{i,t}, yL_{i,t})]$ <sup>[36]</sup>。其中,  $y_{i,t}$  为  $i$  省在  $t$  年的农业碳排放率标准化值,  $yL_{i,t}$  为  $i$  省在  $t$  年的空间滞后量。LISA 时间路径的几何特征通常用相对长度 ( $\tilde{N}_i$ ) 和弯曲度 ( $D_i$ ) 表示, 二者的计算公式分别为<sup>[37]</sup>:

$$\tilde{N}_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}, D_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,t}, L_{i,T})} \quad (3)$$

式中:  $n$  为省域单元数量;  $T$  为年度间隔;  $L_{i,t}$  为  $i$  省在第  $t$  年的 LISA 坐标  $(y_{i,t}, yL_{i,t})$ ;  $d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$  为  $i$  省从第  $t$  年到  $t+1$  年移动距离;  $d(L_{i,t}, L_{i,T})$  为  $i$  省从第  $t$  年到末年移动距离。  $\tilde{N}_i$  越大, 农业碳排放率移动长度越长, 表明农业碳排放率具有更加动态的局部空间依赖关系和局部空间结构, 即农业碳排放率 Moran's  $I$  散点随时间推移的迁移路径稳定性较差;  $D_i$  越大, 农业碳排放率弯曲度越大, 表明农业碳排放率呈现更加动态的局部空间依赖方向和更加波动的增长过程, 同时自身农业碳排放率随时间推移增幅越显著或波动越剧烈, 反之则受到的影响越小, 波动越平稳。

#### 1.1.4 LISA 时空跃迁

LISA 时空跃迁是 Rey 将 Moran's  $I$  散点图中各空间单元在特定时间间隔内的移动距离、方向、凝聚等属性嵌入传统马尔可夫链中, 提出的用于揭示地理现象的空间依赖性的一种方法, 可用来描述 Local Moran's  $I$  散点图在不同局部类型间演化的过程<sup>[38-39]</sup>。Rey 将时空跃迁划分为  $Type_0$ ,  $Type_1$ ,  $Type_2$  和  $Type_3$  四种类型<sup>[40]</sup>。其中  $Type_0$  表示省域自身与相邻省域间不发生形态间的跃迁;  $Type_1$  表示省域自身跃迁, 但邻域不变, 包括  $HH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HL_{t+1}$ ;  $Type_2$  表示省域自身不变, 但邻域跃迁, 包括  $HH_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LH_{t+1}$ ;  $Type_3$  表示省域与邻域都跃迁, 该类型又可分为  $Type_{3A}$  ( $HH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HH_{t+1}$ ) 和  $Type_{3B}$  ( $HL_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow HL_{t+1}$ ), 前者表示省域与邻域的跃迁方向一致, 后者表示二者的跃迁方向相反。Rey 采用时空流动与时空凝聚来表征研究对象的空间格局路径依赖和锁定特征<sup>[41]</sup>, 二者可表示为:

$$\text{时空流动}(SF): SF = \frac{Type_1 + Type_2}{m} \quad (4)$$

$$\text{时空凝聚}(SC): SC = \frac{Type_1 + Type_{3A}}{m} \quad (5)$$

式中:  $Type_1$ 、 $Type_2$  和  $Type_{3A}$  分别表示  $Type_1$ 、 $Type_2$  和  $Type_{3A}$  的跃迁数; 在本文中,  $m = (2006-1997) \times 31 = (2016-2007) \times 31 = 279$ 。

#### 1.1.5 GWR 模型

GWR 是在回归参数中引入地理空间位置信息, 基于邻近观测值的子样本数据信息进行回归估计, 是对普通最小二乘法回归 (Ordinary Least Squares Regression, OLS) 模型进行了改进和扩展, 具有可以形象地展示空间结构分异, 反映各研究变量在空间上存在依赖性和空间分异规律等优点<sup>[42]</sup>。本文采用 GWR 构建中国农业碳排放率驱动因素空间差异回归模型, 揭示各因素对农业碳排放率差异化的影响规律, 模型设定形式为<sup>[43]</sup>:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{m=1}^n \beta_m(u_i, v_i) x_{im} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中,  $y_i$  为第  $i$  空间单元的农业碳排放率;  $(u_i, v_i)$  是空间单元  $i$  的地理坐标;  $\beta_0(u_i, v_i)$  表示回归方程的截距;  $\beta_m(u_i, v_i)$  为空间单元  $i$  的第  $m$  个自变量的回归系数,  $x_{im}$  为空间单元  $i$  的第  $m$  个自变量;  $\varepsilon_i$  为误差项。GWR 采用 ArcGIS10.2 软件计算。

#### 1.2 变量选取与数据来源

根据数据的可得性, 同时借鉴已有研究成果<sup>[14,24]</sup>。本文选取农业碳排放率为因变量, 自变量从以下 5 个

方面选取:农业经济发展水平,取可比价表示的农林牧渔总产值与农村总人口之比;农村居民收入情况:取农村居民可支配收入;种植结构:以(种植业总产值-畜牧业总产值)/农林牧渔业总产值为衡量标准;耕地面积构成情况:以(旱地面积+水浇地面积)/总耕地面积为衡量标准;耕地规模:以农村人均耕地面积为准。

本文所构建的农业碳排放率指标数据及影响因素数据均来自《中国农村统计年鉴》(1998—2017)、《中国统计年鉴》(1998—2017)及各省市统计年鉴等。

## 2 中国农业碳排放率时空动态格局分析

### 2.1 全局空间格局变化特征

采用 GeoDa 软件计算 1997—2016 年中国农业碳排放率的全局 Moran's  $I$  指数(表 2),从全局考察中国农业碳排放率的空间格局特征。

表 2 中国农业碳排放率全局 Moran's  $I$  指数

Table 2 Global Moran's  $I$  index of agricultural carbon emission rate in China

年份 Year	Moran's $I$	$z$	$p$	年份 Year	Moran's $I$	$z$	$p$
1997	0.527	5.183	0.001	2007	0.566	5.335	0.001
1998	0.561	5.684	0.001	2008	0.541	5.135	0.001
1999	0.528	5.290	0.001	2009	0.525	4.982	0.001
2000	0.571	6.050	0.001	2010	0.531	4.842	0.001
2001	0.610	6.140	0.001	2011	0.519	4.875	0.001
2002	0.566	5.535	0.001	2012	0.524	4.698	0.001
2003	0.568	5.443	0.001	2013	0.513	4.889	0.001
2004	0.548	5.404	0.001	2014	0.499	4.742	0.001
2005	0.517	5.411	0.001	2015	0.494	4.425	0.001
2006	0.496	5.469	0.001	2016	0.482	4.479	0.001

中国农业碳排放率呈显著的空间正相关关系和空间集聚规律。1997—2016 年农业碳排放率的全局 Moran's  $I$  指数均为正且在 5% 水平上显著(表 2),说明中国农业碳排放率存在显著的空间集聚规律,即农业碳排放率较高(低)省域在空间上趋于邻近分布。从全局 Moran's  $I$  的变化趋势看,研究期内中国农业碳排放率的全局 Moran's  $I$  指数波动下降,到 2016 年达到最小值(0.482),说明中国农业碳排放率的空间趋同性不断减弱,空间集聚程度渐次减弱。

### 2.2 LISA 时间路径几何特征

选取 1997—2006 和 2007—2016 年 2 个时段进行 LISA 时间路径分析,以 2 个时段的时间路径相对长度(弯曲度)均值的 50%、100% 和 150% 对计算结果进行归一化处理,将时间路径相对长度(弯曲度)由低到高划分成低相对长度(低弯曲度)、较低相对长度(较低弯曲度)、较高相对长度(较高弯曲度)、高相对长度(高弯曲度)4 种类型,并运用 ArcGIS10.2 软件对 LISA 时间路径相对长度(弯曲度)进行可视化表达(图 1、图 2)。

从相对长度看,中国农业碳排放率的局部空间结构具有较强的稳定性。具体而言,1997—2006 年高相对长度省域包括北京、天津、山东、山西和上海,这些省域局部空间结构具有强烈的不稳定性;黑龙江、吉林、辽宁、河南和浙江为较高相对长度省域,局部空间结构具有较强的动态性;云南、四川、贵州、重庆、湖南、湖北和江西为低相对长度省域,具有最稳定的局部空间结构;其他省域为较低相对长度,局部空间结构较稳定。2007—2016 年高相对长度的省域数量保持不变,但呈现由上海向西部的陕西转移态势,其他省域保持不变,可能的原因是“西部大开发”战略的实施,为陕西省的农业发展提供了政策保障,同时也导致农业碳排放率上升,此外,2005 年以后国家全面免除农业税,一方面调动了农业生产积极性,同时受农用物资(农药、化肥、农膜等)投入的增加、耕作结构的调整、生产技术等因素的影响,导致陕西省农业碳排放率局部空间结构具有强烈的动态性。较高相对长度的省域数量呈现增加态势,但向西部的新疆和南部的福建和海南转移。低相对长

度的省域数量由 7 个减少到 4 个,逐步向南部的广西和东部的安徽迁移,说明这些省域的局部空间结构最稳定,主要是因为这些省域有着相似的农业碳排放率。2 个时段处于低相对长度和较低相对长度的省域分别有 21 和 20 个,分别占全部省域的 67.74% 和 64.52%,表明中国省域具有较稳定的农业碳排放率局部空间结构。

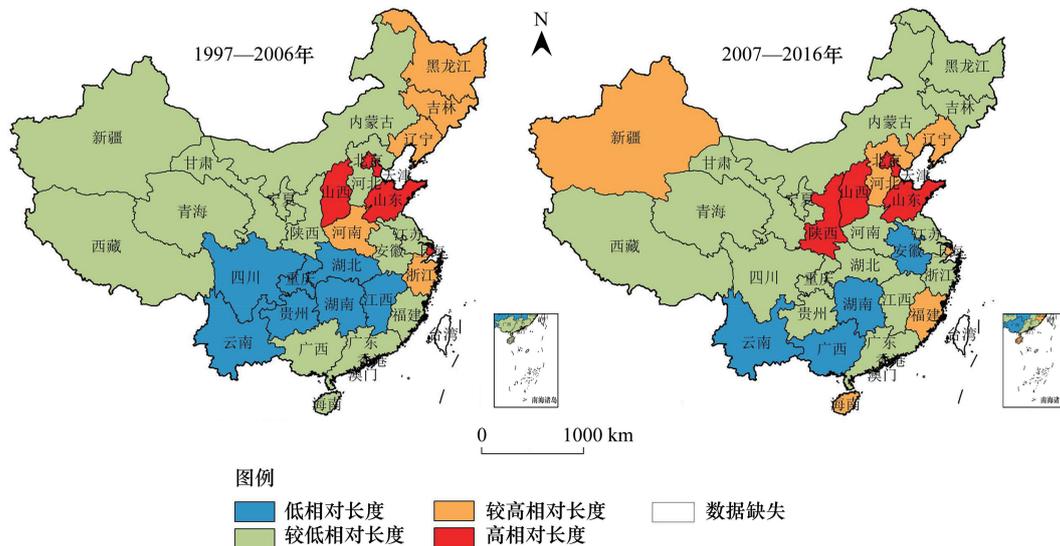


图 1 LISA 时间路径相对长度  
Fig.1 The relative length of the LISA time path

从弯曲度看,中国农业碳排放率局部空间依赖变化过程较稳定。1997—2006 年高弯曲度省域包括北京、天津、上海、安徽和重庆,这些省域的农业碳排放率增长和局部空间依赖变化过程波动性最强;黑龙江、山东、江苏、河南、湖北和贵州属于较高弯曲度省域,其农业碳排放率增长和局部空间依赖变化波动性较强;辽宁、浙江和福建为低弯曲度省域,这 3 省的农业碳排放率增长和局部空间依赖变化过程最稳定;其余省域均属于较低弯曲度省域,碳排放率增长和局部空间依赖变化过程波动性较弱。而在 2007—2016 年,辽宁和云南演变成高弯曲度省域,在空间依赖方向上具有最强波动性的省域呈减少趋势;较高弯曲度的省域数量保持 6 个不变,但演化为新疆、甘肃、广西、广东、湖北和山东;低弯曲度省域数量由 3 个增加到 8 个,呈现明显上升趋势。从空间分布上看,高弯曲度省域向西南和东北迁移,较高弯曲度省域出现向西部和南部转移态势,较低弯曲度

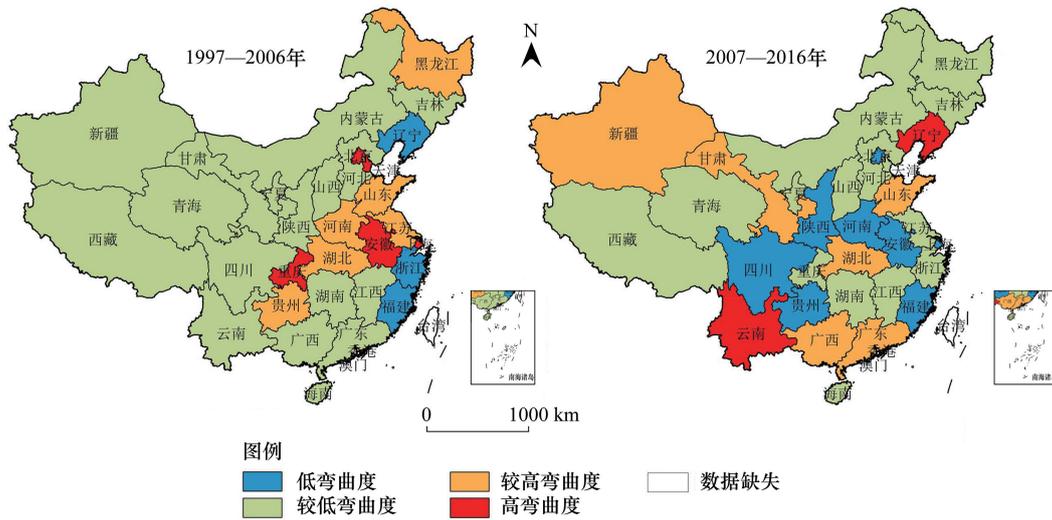


图 2 LISA 时间路径弯曲度  
Fig.2 The tortuosity of the LISA time path

省域在空间分布的破碎化趋势明显,低弯曲度省域出现向中西部地区扩散。

### 2.3 LISA 时间路径转移方向

基于移动方向平均水平将其分成 4 种类型:赢-赢型( $0^{\circ}$ — $90^{\circ}$ ),输-赢型( $90^{\circ}$ — $180^{\circ}$ ),输-输型( $180^{\circ}$ — $270^{\circ}$ ),赢-输型( $270^{\circ}$ — $360^{\circ}$ )。其中,赢-赢型表示省域及相邻省域的农业碳排放率具有高增长趋势,输-赢型表示省域农业碳排放率呈低增长,而相邻省域呈高增长趋势;输-输型表示省域及相邻省域的农业碳排放率均呈低增长趋势;赢-输型表示省域农业碳排放率呈高增长而相邻省域呈低增长态势。赢-赢型和输-输型也叫协同增长型,表示省域及其相邻省域农业碳排放率呈整合的空间动态性。

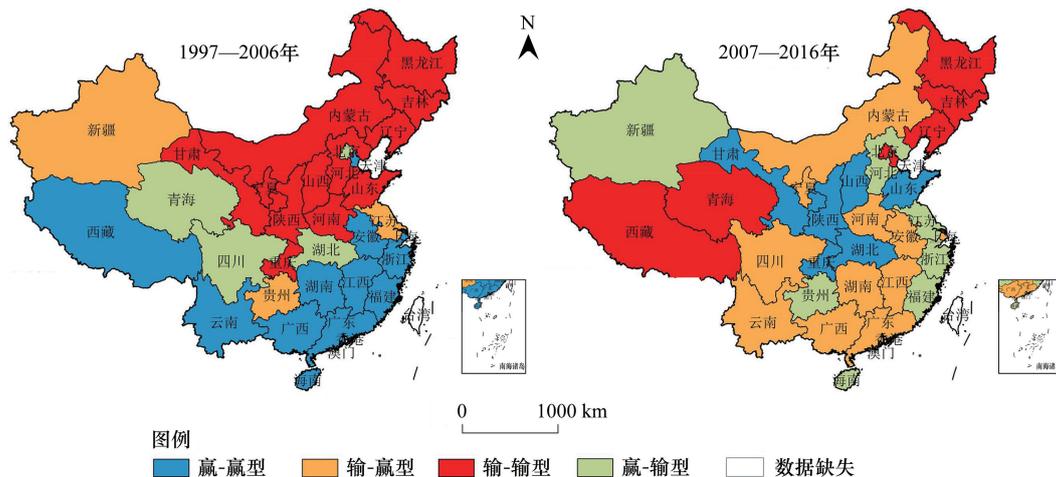


图 3 LISA 时间路径移动方向

Fig.3 The movement direction of the LISA time path

从 LISA 转移方向看,中国农业碳排放率空间格局变化的空间整合性呈减弱趋势,协同与竞争并存的格局日益凸显。1997—2006 年天津、上海、安徽、浙江、福建、江西、湖南、广东、广西、云南、西藏和海南等 12 个省域属于赢-赢型省域;输-输型的省域也有 12 个,分别为黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山东、河南、山西、陕西、宁夏、甘肃和重庆。表明在该时段内中国农业碳排放率空间格局演化表现为明显的协同增长主导型,空间整合性较强。2007—2016 年赢-赢型的省域减少为 6 个,且分布在山东、湖北、山西、陕西、甘肃和重庆,整体出现向北部转移的态势,原因是随着“西部大开发”和“中部崛起”战略的实施,这些省域的农业取得较快发展,也导致碳排放率增加较快;黑龙江、吉林、辽宁、北京、天津、西藏、青海 7 省域为输-输型省域,在空间分布上呈现向西部扩散态势。协调增长型省域从 1997—2006 年的 24 个下降到 2007—2016 年的 13 个,表明中国农业碳排放率由协同增长主导型向协同与竞争并存的格局转变,空间整合性呈现下降态势。

### 2.4 农业碳排放率 LISA 时空跃迁分析

LISA 时间路径分析仅能揭示 LISA 坐标的变化趋势,而不能反映农业碳排放率坐标中局部空间关联类型的相互转移。因此,本文进一步采用 Rey 提出的转移概率矩阵和时空跃迁来描述中国农业碳排放率局部空间关联类型的转移特征和演化过程(表 3)。

中国农业碳排放率的转移惰性、路径依赖和锁定特征明显。最普遍的跃迁是类型  $Type_0$ ,多数省域在 1997—2006 和 2007—2016 两个时间段内均未发生显著的时空跃迁(表 3),2 个时间段内 Moran's  $I$  散点保持在同一象限内( $Type_0$ )的概率达 96.8%和 96.4%,即在 2 个时间段内 Moran's  $I$  散点图的空间稳定性(时空凝聚)分别为 0.968 和 0.964,除 1997—2006 年间  $HH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HH_{t+1}$  的迁移概率为 0.012 和 0.006 外,其他  $Type_3$  的跃迁均为 0,表明中国农业碳排放率分布具有较强的转移惰性,即农业碳排放率的空间格局表现出路径依赖和锁定特征,多数省域均未发生显著的时空跃迁,农业碳排放率空间分布的凝聚很强,空间格局稳定,各省域在短期内难以改变其当前的农业碳排放率分布状况。

表 3 Local Moran's  $I$  时空跃迁矩阵Table 3 Space-time transition matrices of Local Moran's  $I$ 

时段 Period	$t/t+1$	HH	LH	LL	HL	类型 Type	数量 Number	比例 Proportion	SF	SC
1997—2006 年	HH	0.975	0.000	0.012	0.012	Type0	268	0.961	0.032	0.968
	LH	0.091	0.773	0.136	0.000	Type1	3	0.011		
	LL	0.006	0.006	0.981	0.006	Type2	6	0.022		
	HL	0.050	0.000	0.000	0.950	Type3	2	0.007		
2007—2016 年	HH	1.000	0.000	0.000	0.000	Type0	269	0.964	0.036	0.964
	LH	0.000	0.943	0.057	0.000	Type1	6	0.022		
	LL	0.000	0.014	0.966	0.020	Type2	4	0.014		
	HL	0.000	0.000	0.088	0.912	Type3	0	0.000		

### 3 中国农业碳排放率影响因素分析

#### 3.1 模型对比与参数检验

综上所述,中国农业碳排放率空间分布呈显著的空间正相关特征,表明以普通线性回归最小二乘法对中国农业碳排放率驱动因素进行分析,得到的结果有可能存在偏差。为了验证此结论,本文选取农业经济发展水平、农村居民收入情况、种植结构、耕地面积构成情况和耕地规模 5 个因素为自变量,农业碳排放率为因变量构建 OLS 模型和 GWR 模型进行对比(表 4),可知 GWR 模型调整后的拟合优度 ( $R^2$  Adjusted) 为 0.669,大于 OLS 模型调整后的拟合优度 (0.655),且局部回归模型的标准化残差值的范围在  $[-1.95, 1.81]$ ,各省域的局部回归模型均能通过残差检验。进一步对残差进行空间自相关性检验,得到 Moran's  $I = 0.048$ ,  $p = 0.298$ ,残差的空间分布呈现随机分布状态,说明整个 GWR 模型能较好地解释各变量对农业碳排放率的影响,基于 GWR 模型得到的结论更合理。

表 4 OLS 模型和 GWR 模型参数估计及检验结果对比

Table 4 Parameter estimation and test results of the the OLS model and GWR model

变量 (OLS) Variable (OLS)	回归系数 Regression coefficients	$p$	模型参数 (GWR) Model parameters (GWR)	数值 Value
经济发展水平 Economic development level	1.788	0.001	Bandwidth	3367110.168
居民收入状况 Residents' income	2.401	0.000	Residual Squares	4.330
种植结构 Planting structure	1.360	0.062	Effective Number	7.445
耕地面积构成 Status of cultivated land area	2.133	0.000	Sigma	0.428
耕地规模 The scale of cultivated land	-2.258	0.000	AICc	48.694
常数项 Constant	-2.941	0.000	$R^2$	0.740
$R^2$ Adjusted	0.655	-	$R^2$ Adjusted	0.669

#### 3.2 各变量对农业碳排放率空间格局影响的演化特征

(1) 农业经济发展水平对农业碳排放率空间格局影响演化特征。农业经济发展水平对农业碳排放率空间格局影响较大且空间差异明显,从回归结果看,农业经济发展水平的提高对提升地区农业碳排放率有显著的正向促进作用,且农业经济发展水平的影响程度由南向北逐步递减。东北三省农业经济发展已取得长足进步,随着新疆绿洲农业的发展和农业现代化进程持续推进,传统高碳排放生产方式逐渐被取代,导致东北三省和新疆农业碳排放率受农村经济发展水平的回归系数小,农业经济水平的改善对农业碳排放率的提升带动作用较小;以西南地区、南部沿海和中部地区的湖南为代表的南部地区受到的影响则较大,这些地区处于传统农业向现代农业、粗放型农业向集约型农业转变的过渡转型期,农业经济发展对化肥、农药依赖性强,导致回归

系数较大,对农业碳排放率提升的作用较大。

(2)农村居民收入状况对农业碳排放率空间格局影响演化特征。农村居民收入状况与农业碳排放率影响最大且呈正相关关系。从回归系数的空间分布看,农村居民收入状况与农业碳排放率的回归系数从东向西形成带状分布格局,即基本呈现以东南部地区为核心,向西北部地区依次递增。具体来看,以新疆、青海和西藏为代表的中国西部地区各省份受影响相对较大,以上海、浙江和福建为代表的东部沿海省份受农村居民收入状况的影响较小。农村居民收入状况在一定程度上反映了农村发展水平,东部沿海地区农村经济优势明显,农村居民收入水平高,为促进农业发展的低碳化、绿色化和集约化提供了经济基础;而广大西部落后地区农村居民可支配收入水平整体较低,相较于东部地区农业现代化和集约化发展的经济基础较薄弱,农业的粗放型和规模化经营必然依赖大量农用物资投入,导致回归农村居民收入状况对农业碳排放率的影响较大。

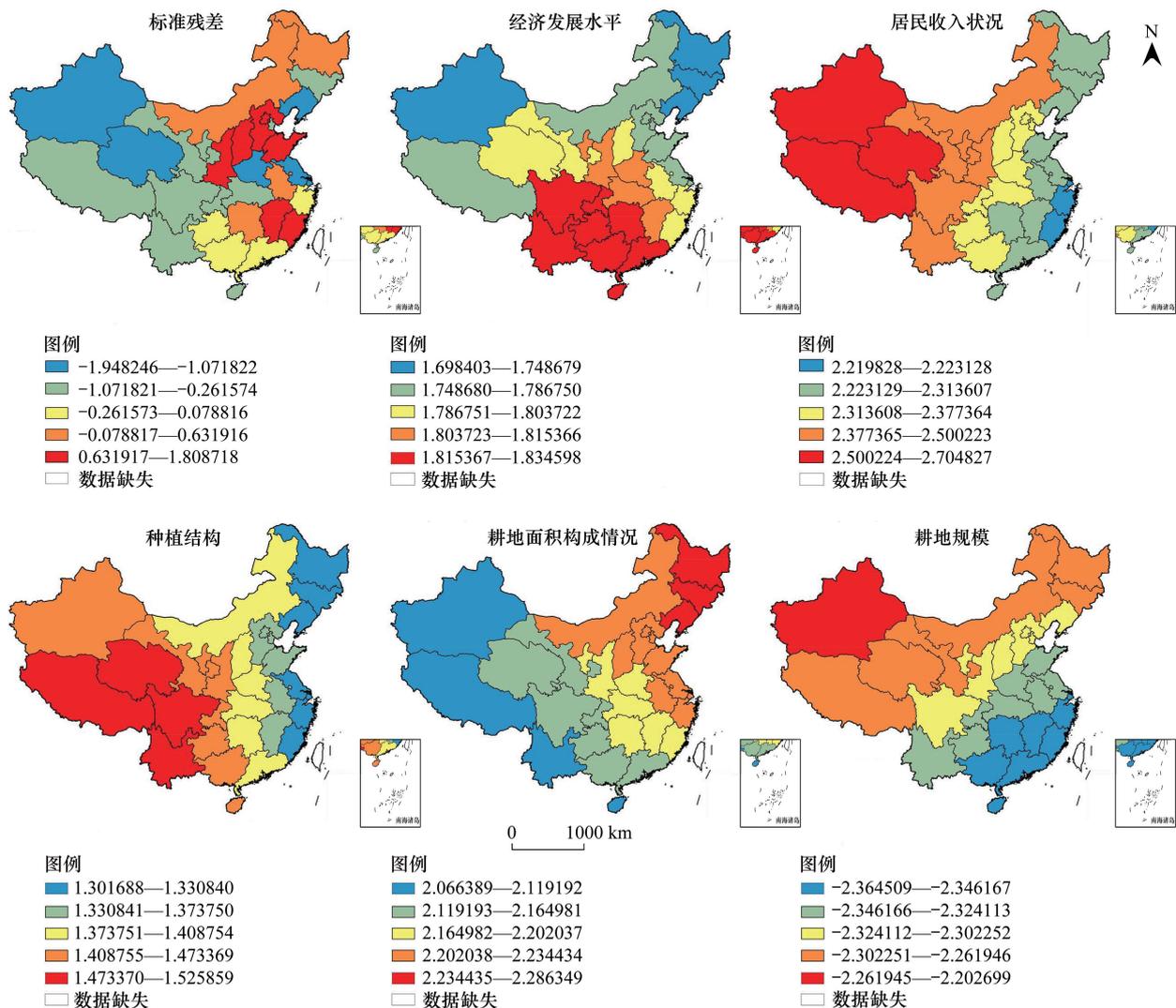


图 4 GWR 模型标准化残差和回归系数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the standardized errors and regression coefficients in the GWR model

(3)种植结构对农业碳排放率空间格局影响演化特征。种植结构与农业碳排放率的回归系数为正,较其他影响因素的回归系数小,且呈现自东向西逐步递增态势,在空间分布上表现出“两低值区、一高值区”的态势,两低值区集中在东北三省和以上海市、江苏省、浙江省和福建省为核心的东部沿海省域;一高值区集中在西南地区的云南、四川、西藏和西北地区的青海。与广大西部地区相比,东部沿海地区经济作物和渔业在农业种植结构中占比较大,农业碳排放量较小,而农业生产总值较农业碳排放增长快,导致种植结构对农业碳排放

率的影响处于低位态势,而广大西部地区的种植结构以种植业与畜牧业为主,而种植业与畜牧业是主要的农业碳排放源,在农药、化肥和农膜等农业生产物资大量投入和养殖规模不断扩大的情况下,导致这些地区种植结构对农业碳排放率的回归系数处于高位水平。

(4)耕地面积构成状况对农业碳排放率空间格局影响演化特征。耕地面积构成状况对农业碳排放率空间格局影响程度仅次于农村居民收入状况且呈现正相关关系,从回归系数的空间分布来看,新疆、西藏、云南和海南等西部地区和南部沿海耕地面积构成状况对农业碳排放率影响较小,中部地区其次,东部沿海地区受到的影响较大,其中东北三省受耕地面积构成状况的正向作用最强,整体表现出由东北向西南逐步递减态势。当前我国基本形成了以“旱地为主水田为辅水浇地次之”的耕地面积格局,由于种植作物的特殊性与单一性,水田经济效益较高,旱地或水浇地较之会导致更多的碳排放,因而旱地面积越大,农业碳排放率越低。东北平原、华北平原、长江中下游平原地区多属季风气候,降水充沛,水田农业较为发达,对农业碳排放率的提升作用明显;而广大西部地区旱地与水浇地面积之和占总耕地面积的比重较大,会导致更多的碳排放,在农业碳排放增加而农业经济水平较低的情况下,对于提升农业碳排放率的作用较小。

(5)耕地规模对农业碳排放率空间格局影响演化特征。耕地规模对农业碳排放率的回归系数为负,表明耕地规模对农业碳排放率起抑制作用。从回归系数空间分布上看,回归系数表现为沿东北西南走向的由东南向西北递增的态势,回归系数低值区主要分布在上海、浙江、福建、广东、广西、海南、湖南和江西等省域,高值区主要分布在新疆,其余地区基本上从南向北受耕地规模的影响程度依次增强。东南沿海作为我国城镇化与工业化的前沿阵地,随着城镇化与工业化的快速推进,一方面农村人口数量呈现减少趋势,同时大量耕地被占用导致全国耕地面积逐年萎缩,农村人均耕地规模总体呈现弱下降趋势,因此耕地规模对农业碳排放率的负向作用最明显,而以新疆为代表的中国西北地区各省份和东北的黑龙江、吉林因耕地规模较大,城镇化与工业化进程较东南沿海慢,耕地规模对农业碳排放率的负向作用较小。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

(1)1997—2016年中国农业碳排放率具有显著的空间正相关关系和空间集聚特征。即具有较高农业碳排放率的省域单元之间倾向于相互临近集聚,具有较低农业碳排放率的省域单元之间倾向于相互临近集聚;从农业碳排放率全局 Moran's  $I$  指数的演变态势看,农业碳排放率的空间趋同性不断减弱,农业碳排放率空间差异逐渐扩大。

(2)研究期内中国农业碳排放率的局部空间结构和局部空间依赖演化过程有较强的稳定性。具体表现在:1997—2006年和2007—2016年农业碳排放率 LISA 时间路径相对长度处于低相对长度和较低相对长度的省域分别有 21 和 20 个,占比 67.74%和 64.52%;同期 LISA 时间路径弯曲度处于低相对弯曲度和较低相对弯曲度的省域分别有 20 和 23 个,占比 64.52%和 74.19%,表明中国农业碳排放率的局部空间结构和空间依赖过程稳定性较强。

(3)中国农业碳排放率空间格局变化的空间整合性呈减弱趋势,由协同增长主导型向协同与竞争并存的格局转变。具体表现在:1997—2006年天津、上海、安徽、浙江、福建、江西、湖南、广东、广西、云南、西藏、海南、黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山东、河南、山西、陕西、宁夏、甘肃和重庆 24 个省域属于协同增长型。而 2007—2016年协同增长省域下降为 13 个,分别为山东、湖北、山西、陕西、甘肃、四川、黑龙江、吉林、辽宁、北京、天津、西藏、青海。

(4)中国农业碳排放率的空间格局表现出路径依赖和锁定特征。主要表现在 1997—2006年农业碳排放率 Moran's  $I$  散点保持同一象限内的概率达 96.8%,2007—2016年为 96.4%,即两个时段内 Moran's  $I$  散点图的空间稳定性(时空凝聚)分别为 0.968 和 0.964,表明中国农业碳排放率的局部空间关联模式存在较强的稳定性,省域要改变自身的农业碳排放率类型非常困难,即具有一定的路径依赖或空间锁定特征。

(5) 多个变量表明 GWR 模型拟合优度高于 OLS 模型,各变量对农业碳排放率影响的非均衡联动局域性和空间异质性特征显著。农村经济发展水平对农业碳排放率的影响程度从南向北依次递减;居民收入状况和种植结构的回归系数分布趋势从东向西依次递增;耕地面积构成状况对东北地区农业碳排放率提升的促进作用高于中西部地区;耕地规模对农业碳排放率具有负向作用,回归系数从东南向西北依次递增。

#### 4.2 讨论

(1) 农业碳排放率由于不同地区之间的农业生产物资投入、农业经济发展状况等的不同而存在差异。根据地理学第一定律,地理事物或现象在空间分布上都是有联系的,且邻近事物或现象之间的联系程度随距离的增加而减弱。空间自相关能够表示某地区的地理位置不仅影响其自身的农业碳排放率,同时也会影响其邻域的农业碳排放率。在这种情况下,以农业碳排放率为切入点,从地理学视角考察中国农业碳排放的空间格局具有一定的意义。从研究结果来看,中国农业碳排放率具有明显空间正相关关系,但其空间集聚程度渐次减弱,可能与我国区域农业发展条件和农业产出的区域差异扩大化有关。一方面随着城市化和工业化的快速推进,耕地“非农化”和农业生产“非粮化”现象愈加显著,对农业生产构成严重威胁,同时农业生产的低碳化、绿色化和现代化转型亟需革新农业生产技术,降低农药、化肥和农膜等生产物资的投入。在众多因素的作用下,导致中国农业碳排放率的空间差异逐渐扩大。农业碳排放率的空间聚集程度具有一定波动性,在一定程度上表明中国各省域农业物资投入、农业经济产出乃至农业政策具有一定波动性。

(2) LISA 时间路径几何特征表明,中国农业碳排放率的局部空间结构和局部空间依赖演化过程有较强的稳定性。因此要根据各省域农业碳排放率的实际情况因地制宜地制定和实施差异化的农业碳减排政策。对于农业碳排放率较低省域,要打破农业碳排放率局部空间结构和局部空间依赖演化过程的稳定过程,使其向高农业碳排放率转变。这些省域一方面要以农业产业结构优化为核心,科学规划农业产业布局,探索现代农业发展新模式,同时要加大农业科技研发和推广力度,促使农业发展由要素投资驱动转向技术创新驱动,保证农业产出的提高,另一方面要重视加快农业领域低碳科技创新步伐,适当减少农药、化肥和农膜等农用物资的使用量,增施有机肥,推广种植绿肥作物,因地制宜地发展农业产值高的低碳农业、生态农业,以降低农业发展进程中碳排放的增长速度和碳排放强度,提高农业碳排放率。而对于农业碳排放率高省域,要保持农业碳排放率的局部空间结构和局部空间依赖演化过程的稳定性,尽可能的向更高农业碳排放率方向转变。这些省域要利用自身经济优势,在保持高排放率的基础上继续优化农业生产资料配置,提高农用物资的利用率,进一步减少传统农业的比重,大力发展农业产值高的休闲农业、生态农业和都市农业等,以提高农业生产的多功能性,使其向碳排更少的方向发展。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 张振龙,孙慧,苏洋.中国西北干旱地区农牧业生态系统碳排放的空间分布与演变趋势.生态学报,2017,37(16):5263-5272.
- [ 2 ] 宋博,穆月英,侯玲玲.农户专业化对农业低碳化的影响研究——来自北京市蔬菜种植户的证据.自然资源学报,2016,31(3):468-476.
- [ 3 ] 吴昊玥,何艳秋,陈柔.中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究——基于 SBM-Undesirable 模型与面板单位根检验.中国生态农业学报,2017,25(9):1381-1391.
- [ 4 ] 林而达.气候变化与农业可持续发展.北京:北京出版社,2001.
- [ 5 ] 黄晓敏,陈长青,陈铭洲,宋振伟,邓艾兴,张俊,郑成岩,张卫建.2004—2013 年东北三省主要粮食作物生产碳足迹.应用生态学报,2016,27(10):3307-3315.
- [ 6 ] Rebolledo-Leiva R, Angulo-Meza L, Iriarte A, González-Araya M C. Joint carbon footprint assessment and data envelopment analysis for the reduction of greenhouse gas emissions in agriculture production. Science of the Total Environment, 2017, 593-594: 36-46.
- [ 7 ] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解.中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [ 8 ] 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.农业经济问题,2011,(2):32-38.
- [ 9 ] Lal R. Carbon emission from farm operations. Environment International, 2004, 30(7): 981-990.
- [ 10 ] Johnson J M F, Franzluebbers A J, Weyers S L, Reicosky D C. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. Environmental

- Pollution, 2007, 150(1): 107-124.
- [11] Lin B Q, Fei R L. Regional differences of CO<sub>2</sub> emissions performance in China's agricultural sector: A malmquist index approach. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 33-40.
- [12] Jiang J J, Ye B, Xie D J, Li J, Miao L X, Yang P. Sector decomposition of China's national economic carbon emissions and its policy implication for national ETS development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 855-867.
- [13] ACIL Tasman Pty Ltd. *Agriculture and GHG Mitigation Policy: Options in Addition to the CPRS*. New South Wales: Industry & Investment NSW, 2009.
- [14] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 李鹏. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用. *资源科学*, 2014, 36(1): 129-138.
- [15] 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. *资源科学*, 2012, 34(11): 2097-2105.
- [16] 郭旋, 张良茂, 胡荣桂, 宋明伟. 华中地区种植业生产碳排放驱动因素分析. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(5): 695-701.
- [17] 王劫, 朱朝枝. 农业碳排放的影响因素分解与脱钩效应的国际比较. *统计与决策*, 2018, (11): 104-108.
- [18] 李博, 张文忠, 余建辉. 碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素. *经济地理*, 2016, 36(9): 150-157.
- [19] 刘宇峰, 原志华, 郭玲霞, 孙铂, 孔伟, 唐淑慧. 中国农作物生产碳足迹及其空间分布特征. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2577-2587.
- [20] 张鹏岩, 何坚坚, 庞博, 逯承鹏, 秦明周, 卢谦成. 农田生态系统碳足迹时空变化——以河南省为例. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 3050-3060.
- [21] 陈儒, 姜志德. 中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(4): 87-97.
- [22] 陈儒, 姜志德. 农户低碳农业生产生态补偿标准研究. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(9): 63-70.
- [23] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于 Malmquist-luenberger 指数与空间计量的实证分析. *经济地理*, 2015, 35(4): 142-148, 185-185.
- [24] 程琳琳, 张俊飏, 田云, 周晓时. 中国省域农业碳生产率的空间分异特征及依赖效应. *资源科学*, 2016, 38(2): 276-289.
- [25] 吴贤荣, 张俊飏, 程琳琳, 田云. 中国省域农业碳减排潜力及其空间关联特征——基于空间权重矩阵的空间 Durbin 模型. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(6): 53-61.
- [26] 张志高, 袁征, 李贝歌, 张宏亮, 张玉, 郑美洁. 基于投入视角的河南省农业碳排放时空演化特征与影响因素分解. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(10): 152-161.
- [27] 陈儒, 邓悦, 姜志德. 基于修正碳计量的区域农业碳补偿时空格局. *经济地理*, 2018, 38(6): 168-177.
- [28] 范大莎, 杨旭, 吴相利, 周嘉, 茹艺. 东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征及驱动因素研究. *环境科学学报*, 2017, 37(7): 2797-2804.
- [29] Wang M X, Dai A G, Shen R X. CH<sub>4</sub> emission from a Chinese rice paddy field. *Journal of Meteorological Research*, 1990, 4(3): 265-275.
- [30] Matthews E, Fung I, Lerner J. Methane emission from rice cultivation: Geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(1): 3-24.
- [31] Cao M K, Dent J B, Heal O W. Methane emissions from China's paddyland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 55(2): 129-137.
- [32] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [33] IPCC. *The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [34] 吴文佳, 蒋金亮, 高全洲, 蒋海兵. 2001—2009 年中国碳排放与碳足迹时空格局. *生态学报*, 2014, 34(22): 6722-6733.
- [35] Ye X Y, Rey S. A framework for exploratory space-time analysis of economic data. *The Annals of Regional Science*, 2013, 50(1): 315-339.
- [36] Murray A T, Liu Y, Rey S J, Anselin L. Exploring movement object patterns. *The Annals of Regional Science*, 2012, 49(2): 471-484.
- [37] Ye X Y. *Comparative Space Time Dynamics*[D]. California: University of California, 2010: 34-39.
- [38] Rey S J. Spatial empirics for economic growth and convergence. *Geographical Analysis*, 2001, 33(3): 195-214.
- [39] Elhorst J P. Matlab software for spatial panels. *International Regional Science Review*, 2014, 37(3): 389-405.
- [40] 程叶青, 王哲野, 马靖. 中国区域创新的时空动态分析. *地理学报*, 2014, 69(12): 1779-1789.
- [41] Rey S J. Spatial analysis of regional income inequality//Good Child M, Janelle D, eds. *Spatially Integrated Social Science: Examples in Best Practice*. Oxford: Oxford University Press, 2004: 280-299.
- [42] 沈体雁, 冯等田, 孙铁山. *空间计量经济学*. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [43] 徐建华. *地理建模方法*. 北京: 科学出版社, 2010.