

# 中国农业碳生产率的分布演进与空间俱乐部收敛研究

程琳琳<sup>1,2</sup> 张俊飏<sup>1,2\*</sup> 曾杨梅<sup>1,2</sup> 吴贤荣<sup>1,2</sup>

(1. 华中农业大学 经济管理学院, 武汉 430070;

2. 湖北农村发展研究中心, 武汉 430070)

**摘要** 利用核密度函数、收敛理论及空间计量方法对1997—2012年我国大陆31省区的农业碳生产率分布演进规律、收敛趋势、聚类状况和俱乐部特征等进行探究。结果表明:1)全国及三大地区农业碳生产率均呈现明显的增长态势,省域间差异扩大,空间分布上逐渐不均衡化,且由较为明显的“一主三小”的四峰格局演变为“一主一次”的双峰格局,具有多个地区集聚的可能。2)全国农业碳生产率整体不存在 $\sigma$ 收敛迹象,而东西部农业碳生产率存在较为明显的 $\sigma$ 收敛现象。3)我国农业碳生产率呈现绝对 $\beta$ 趋同特征,但收敛速度相对较小,仅有0.65%;同时,空间自相关指数进一步证实我国省域农业碳生产率存在集聚现象,且4个象限不同集聚类型地区的 $\beta$ 收敛系数全为负,但仅有H-H和L-L两组表现出较为显著的空间俱乐部收敛趋势。

**关键词** 碳排放;农业碳生产率;绝对 $\beta$ 收敛;空间俱乐部收敛

中图分类号 X 22

文章编号 1007-4333(2016)07-0121-12

文献标志码 A

## Analysis on the dynamic evolution and spatial club convergence of national agricultural carbon productivity

CHENG Lin-lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun-biao<sup>1,2\*</sup>, ZENG Yang-mei<sup>1,2</sup>, WU Xian-rong<sup>1,2</sup>

(1. College of Economics & Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Rural Development Research Center, Wuhan 430070, China)

**Abstract** Kernel density function, convergence theory and spatial econometrics were employed to investigate the convergence trend, agglomeration situation, the spatial club convergence and dynamic evolution of distribution of agricultural carbon productivity in 31 provinces of China from 1997 to 2012. The results show that: 1) Agricultural carbon productivity in all regions was notably increased. the spatial distribution of national agricultural carbon productivity became imbalanced gradually. And, four-peak pattern turned into bimodal pattern, and there was a possibility of agglomeration phenomena in multiple regions. 2) Taking national agricultural carbon productivity as a whole, there were no signs of  $\sigma$  convergence, but in eastern and western regions, agricultural carbon productivity is evident in convergence phenomenon. 3) National agricultural carbon productivity displayed absolute  $\beta$  convergence with relatively slow convergence speed 0.65%. Meanwhile, spatial autocorrelation index further confirmed that the agglomeration phenomenon existed in Chinese provincial agricultural carbon productivity, and the  $\beta$  coefficients of different types of regions in four quadrants were all negative, but only two groups, H-H and L-L, exhibited relatively significant space club convergence trend.

**Keywords** carbon emissions; agricultural carbon productivity; absolute  $\beta$  convergence; spatial club convergence

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71333006); 国家自然科学基金资助项目(71273105, 41371520); 中央高校基本科研业务费专项基金(2013YB12); 国家社会科学基金资助项目(14CJY031)

第一作者: 程琳琳, 博士研究生, E-mail: ch07012210@163.com

通讯作者: 张俊飏, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农业经济理论与政策、资源与环境经济, E-mail: zhangjb513@126.com

随着温室气体问题日益严重,人类的生存与发展面临着诸多挑战,碳减排势在必行,而低碳经济毫无疑问成为世界各国发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。中国作为世界上最大的碳排放国家<sup>[2]</sup>,要实现2020年单位GDP碳排放强度较2005年下降40%~45%的约束性发展目标,意味着碳生产率需在近几年内提升近1倍<sup>[3]</sup>。面对如此背景,唯有不断提升碳生产率,即提高每单位碳排放所产生的经济产出,才能实现碳减排和保持经济增长这一双重目标<sup>[4]</sup>以及二者之间的“脱钩”<sup>[5]</sup>。与工业等经济部门相比,尽管农业温室气体排放相对较少,但其已成为主要排放源之一<sup>[6]</sup>,且其所拥有的减排潜力<sup>[7]</sup>以及由碳生产率提高所带来的正外部效应不容低估。因此,逐步缓解资源与环境对农业经济发展的约束,不断提高农业碳生产率,实现农业低碳、绿色发展,才是应对气候变化与推动现代农业可持续发展的关键所在<sup>[8]</sup>。

碳生产率一词最早由Kaya等<sup>[9]</sup>于1993年提出,是指一定时期内一国GDP与碳排放量的比值。尽管其构成较为简单,为碳排放强度的倒数,但其可用于衡量单位碳排放量所产生的经济效益,并体现低碳经济发展的双重目标<sup>[10]</sup>。其原因在于在当前资源约束日益趋紧的现实条件下,当碳被定价以及碳排放量被逐渐限制时,碳排放(空间)对全要素生产率的作用与劳动和资本基本无异,均是一种稀缺的要素,那么它将从投入要素视角更好地诠释社会经济发展所面临的新约束条件。尽管我国碳生产率在逐年提升,但东中西部地区由于所处经济发展水平和阶段的差异,各自的碳生产率也不同,甚至对于具有同样脱钩条件的不同省区来说,这种差异依然显现<sup>[11]</sup>。同时,由于各省区间产业结构偏好、能源结构、技术进步率等差异,省区间碳生产率往往趋近于各自的稳态而非统一水平<sup>[12]</sup>。此外,碳生产率在地域上具有较强的局部集聚特征,属于不同集聚形式的省区碳生产率也不同,在此情况下,集聚生产将会产生规模效应,并显著优于分散生产,集聚动态的外部性则成为改善碳生产率以及缩小碳生产率差异的重要机制,有助于碳生产率趋同的实现<sup>[13]</sup>。

目前碳排放相关研究主要集中于工业领域,关于农业碳排放的研究相对较少,但该领域的研究也已由最初单纯考察全国或地区农业碳排放测算<sup>[14]</sup>、区域差异与演进特征<sup>[15]</sup>、时空比较与因素分解<sup>[16]</sup>、与经济增长关系<sup>[17]</sup>等方面,逐渐转向农业碳排放绩

效与全要素生产率<sup>[18]</sup>、减排潜力与减排成本<sup>[19]</sup>及公平性<sup>[20]</sup>等方面。除此之外,也不乏其他特定视角下农业碳排放<sup>[21-22]</sup>、农业碳足迹<sup>[23-24]</sup>及农业碳生产率<sup>[25]</sup>等领域的研究,不过数量仍较少。不可否认,这些研究极大丰富了我国农业碳排放研究体系,为研究内容的进一步扩展与研究深度的延伸奠定了坚实基础。但稍显不足的是,当前关于农业碳排绩效与碳生产率的相关研究仍较少且视角较为单一,其中学界对于农业碳排绩效方面的研究是将农业碳排放这一非期望产出与用农业总产值表示的期望产出共同纳入农业经济核算体系内,进而考察中国低碳农业绩效状况、减排潜力和边际减排成本以及空间收敛状况等。碳生产率的研究则以工业领域为主,农业领域涉及甚少或仅存在于渔业等少数产业,这与农业碳生产率概念所具有的意义和作用有所不符,更使得难以客观、准确地把握中国低碳农业的发展状况以及科学度量单位农业碳排放所产生的农业产值,故应对其给予足够的重视。

由于我国不同区域的资源禀赋与经济发展等存在较大差异,东中西部经济增长的不均衡性以及所形成“俱乐部收敛”格局<sup>[26]</sup>,其农业碳排放水平与碳生产率也必然有所差异,那么这两方面是否也存在俱乐部收敛迹象,需要进一步验证。与此同时,碳减排目标、交易原则及碳排空间等方面的确定,与碳排放量和碳生产率的分布格局、变化趋势及收敛性等密切相关<sup>[27]</sup>。尽管农业碳生产率并非衡量一国或一地区低碳农业发展与产出的唯一指标,但其对于保障我国农业经济的持续发展以及碳减排目标的实现具有不可忽视的作用。制定科学、合理的碳减排政策与措施,更需要对农业碳生产率的变动轨迹和收敛趋势等特征有一个较为清晰的认知。鉴于当前鲜有文献关注空间地理因素与农业碳生产率的关系以及考虑我国农业碳生产率是否存在着明显的收敛趋势与地理集聚现象或地域性特征等现实,本研究将运用收敛理论和空间自相关分析等方法,重点考察我国省域农业碳生产率的变动趋势、聚类状况和收敛特征,旨在揭示地理空间因素对农业碳生产率差距缩小的作用,并为合理制定区域性和全国协调性的碳减排政策提供一定的理论基础。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

收敛理论最早主要用于揭示技术进步对经济增

长差距的影响<sup>[28]</sup>，现已广泛应用于其他问题的研究。通常在考虑收敛问题时，主要存在3种假说，即 $\sigma$ 收敛、 $\beta$ 收敛和俱乐部收敛，其中 $\beta$ 收敛又可分为绝对 $\beta$ 收敛和条件 $\beta$ 收敛<sup>[29]</sup>。为更好地把握区域间农业碳生产率差距及动态变化趋势，本研究将从时间和空间2个维度，分别对农业碳生产率的 $\sigma$ 收敛、绝对 $\beta$ 收敛和空间俱乐部收敛进行考察。

### 1.1.1 绝对 $\beta$ 收敛

参照Jobert等学者<sup>[30]</sup>的研究，构建农业碳生产率绝对收敛普通面板模型，具体形式如下：

$$\ln(C_{it}/C_{i,t-1}) = \alpha_{it} + \beta \ln(C_{i,t-1}) + \epsilon_{it} \quad (1)$$

式中： $C_{it}$ 为*i*地区*t*时期的农业碳生产率； $\alpha$ 和 $\beta$ 为待估参数； $\epsilon_{it}$ 为随机误差项。那么，若 $\beta$ 的系数显著为负，则表明存在绝对收敛趋势，且收敛速度为 $v = -\ln(1+\beta)/t$ 。反之，则不存在收敛迹象。

### 1.1.2 空间自相关指数

空间自相关分析主要用以显示和识别各地区间某一属性等是否具有一定的相互作用，如空间依赖性与异质性。通常主要利用Moran指数和G指数对某一属性的空间相关性进行测度，由于Moran指数是较早且成熟的自相关检验方法，其较G指数能更好地鉴别正负相关性并揭示空间自相关类型等，结合研究对象与研究目的，在此将采用Moran指数对农业碳生产率的空间关联性和差异性进行考察，其具体公式为：

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

式中： $y_i$ 和 $y_j$ 分别为*i*和*j*的观察值，本研究中分别代表*i*地区和*j*地区的农业碳生产率； $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ ； $W_{ij}$ 为空间权重矩阵，表示地区*i*和地区*j*的空间关系。本研究采用邻接空间权重矩阵对区域间邻接关系进行度量，即当区域*i*与区域*j*相邻时， $W_{ij}$ 为1；反之则为0。基于此，构建我国大陆31省区的空间权重矩阵，但由于海南省的独特地理位置，此处将海南设定为仅与广东邻近。

从式(2)不难发现，Moran指数*I*的取值范围为 $[-1, 1]$ ，当其属于 $(-1, 0)$ 时，相邻地区的农业碳生产率存在空间差异性，且越接近于-1，两者之间的差异性越显著；相反，取值为 $(0, 1)$ 则表示邻近区域间存在高度相似性，取值越趋近于1，其属性的相关

程度越高；当然，当其取值为-1和1时，则分别表示完全正相关和完全负相关。同时，根据一地区与其邻域的关系，可将Moran's *I*散点图的4个象限依次划分为“高-高”集聚、“低-高”集聚、“低-低”集聚和“高-低”集聚4类，在本研究中分别表示高碳生产率的地区被其他高碳生产率地区所包围、低碳生产率的地区被其他高碳生产率地区所包围、低碳生产率的地区被其他低碳生产率地区所包围和高碳生产率的地区被其他低碳生产率地区所包围。

### 1.1.3 空间计量模型

由于农业碳排放在空间和地域上存在着较为明显的空间关联性和溢出效应，忽略空间因素往往会导致对其进行OLS模型估计会出现偏差<sup>[31]</sup>。为了克服这一问题并较好地考察各省间的关系，本研究采用空间计量模型对农业碳生产率的空间差异及趋同趋势进行分析。与此同时，考虑到本研究对象的特性，拟采用空间滞后模型和空间误差模型对其进行考察，模型具体设定如下：

$$\ln(C_{it}/C_{i,t-1}) = \alpha_{it} + \rho W \ln(C_{it}/C_{i,t-1}) + \beta \ln(C_{i,t-1}) + \epsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln(C_{it}/C_{i,t-1}) = \alpha_{it} + \beta \ln(C_{i,t-1}) + \epsilon_{it} \quad (4)$$

$$\epsilon_{it} = \lambda W \epsilon_{it} + \mu_{it}$$

式中： $C_{it}$ 表示*t*时期*i*地区的农业碳生产率； $\rho$ 为空间自回归系数； $W$ 为 $n \times n$ 阶空间权重矩阵； $\epsilon_{it}$ 为随机误差项向量； $\lambda$ 为 $n \times 1$ 阶截面因变量向量的空间误差系数； $\mu_{it}$ 为正态分布随机误差向量。

由于2个模型基本假定和参数设定不同，各自的内涵及应用也存在差异。一般而言，空间滞后模型可探讨一地区各变量通过空间传导机制对其他地区的影响，即溢出效应；而空间误差模型则假定地区间的相互影响与作用是通过误差项来实现的，地区间由于地理位置不同，其作用方式也会存在差异，区域间外溢是随机冲击作用的结果。 $\lambda$ 为空间误差系数，可较好地度量相邻地区观察值对本地区观察值的影响方向和作用程度。

当然，在模型选择方面，依然按照Anselin<sup>[32]</sup>所提出的判断准则进行决定，即如果在空间依赖性检验中发现，LMERR较LMLAG显著，且Robust—LMERR显著而Robust-LMLAG不显著，那么选择空间误差模型，反之亦然。除此之外，还可借助 $R^2$ 、Log likelihood、Likelihood Ratio、AIC和SC等相关指标对模型进行判断及选择。

## 1.2 数据来源及处理

关于农业碳排放总量的测算,本研究主要从3个方面考察:一是农业生产中由于农用物资投入等引致的碳排放,包括化肥、农药、农膜、农业灌溉以及农用柴油使用等引发的碳排放,其相关排放系数主要来自田云等<sup>[33]</sup>。二是畜禽养殖过程中由肠道发酵和粪便管理系统所产生 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ ,其主要包括牛、羊、马、驴、骡子、猪和家禽等畜禽;由于不同畜禽的饲养周期存在差异,在此根据胡向东等<sup>[34]</sup>和闵继胜等<sup>[35]</sup>对畜禽年均饲养量调整方法进行完善,其相关系数均来自IPCC<sup>[36]</sup>。三是水稻生长过程中所产生的 $\text{CH}_4$ 等温室气体排放,由于我国(不含港、澳、台地区)不同区域间自然条件(光热等)差异明显,导致水稻在同一地区不同生长期或不同地区同一生长期内排放系数有所差异,将参考王明星等<sup>[37]</sup>的研究进行确定。基于此,构建农业碳排放测算公式,具体如下:

$$E = \sum E_i = \sum T_i * \sigma_i \quad (5)$$

式中: $E$ 为农业碳排放总量; $E_i$ 表示各类农业碳源所引致的排放量; $T_i$ 表示各碳源的数量; $\sigma_i$ 表示各碳源的排放系数。在此需要注意的是,由于各类碳源所产生的温室气体并不相同,为便于统计与分析,将对 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 等温室气体统一换算为标准碳。其具体换算标准为1 t  $\text{CH}_4$ 等同于6.818 2 t C或25 t  $\text{CO}_2$ 产生的温室气体,1 t  $\text{N}_2\text{O}$ 等同于81.272 7 t C或298 t  $\text{CO}_2$ 产生的温室气体<sup>①</sup>。

本研究测算农业碳排放量所需的原始数据均出自历年《中国统计年鉴》<sup>[38]</sup>、《中国农村统计年鉴》<sup>[39]</sup>、《中国农业年鉴》<sup>[40]</sup>、《中国畜牧业年鉴》<sup>[41]</sup>、《中国农业统计资料》<sup>[42]</sup>以及部分地方年鉴等。其中,与农地利用相关的化肥、农药、农膜、灌溉面积、机械总动力、水稻种植面积、农作物播种面积和产量等数据资料均以当年实际情况为准,其他与畜禽养殖相关的(如猪、牛、羊、驴、马、骡子、骆驼和家禽等)数据均按出栏率和存栏量进行相应调整,这几方面数据主要来自《中国农村统计年鉴》。鉴于1997年前重庆与四川为合并区域,为保持统计口径等一致性,本研究将仅对1997—2012年的相关数据进行统计与分析。

本研究中所度量的农业碳生产率为每单位农业碳排放所产生的经济效益,与碳排放强度呈反比。其

具体计算公式为:农业碳生产率=农业生产总值/农业碳排放量,表示一地区在一定时期内(通常为一年)单位碳排放所产生的农业经济效益。其中,需要注意的是,由于由《中国农村统计年鉴》得到的农业生产总值均为实价计算数据,不能直接用于纵向比较,故在此将其换算为可比价,即以2000年为不变价计算各年农林牧渔总产值,单位为亿元。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 描述性统计分析

#### 2.1.1 农业碳生产率的时序演变分析

基于1.2部分所构建的农业碳生产率测算公式,分别对我国大陆31省区及三大地区农业碳生产率进行测度,详见图1。由图可知,全国(不含港、澳、台地区,以下同。)及三大地区农业碳生产率均呈明显增长态势,尤以2006—2012年表现最为显著;三大地带中,东部地区农业碳生产率最高且增长幅度最大。具体来看,东部地区农业碳生产率值在各地中最高,大致可以2002和2006年为节点划分为三个阶段,且2006年以后上升趋势更加明显,与其他地区的差距逐渐拉大;全国农业碳生产率一直介于东部和中西部地区之间,与中西部水平较为接近;中西部地区与全国农业碳生产率的运动轨迹大致类似,即均以2006年为节点,划分为上升趋势不一的两阶段,且后一阶段增速明显加快。

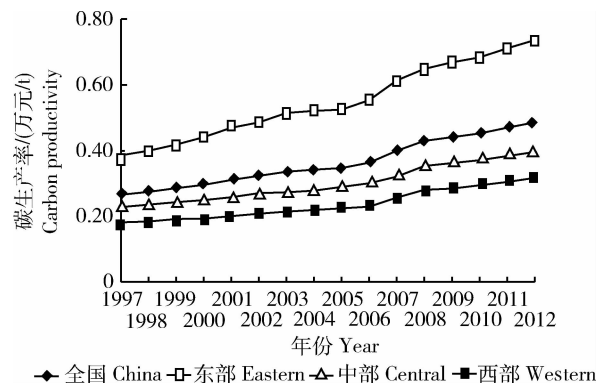


图1 全国及东中西部农业碳生产率变动情况

Fig. 1 Changes in agricultural carbon productivity in mainland China and three regions

#### 2.1.2 农业碳生产率空间分布格局分析

在对全国及各地区农业碳生产率变动趋势具有

① 折算数据来源 IPCC2007 年第4次评估报告。

一定认识的基础上,为进一步揭示其区域格局状况,在此采用自然间断点法对各省区农业碳生产率的实

际数值进行等级划分,共分为 5 个等级(图 2)。

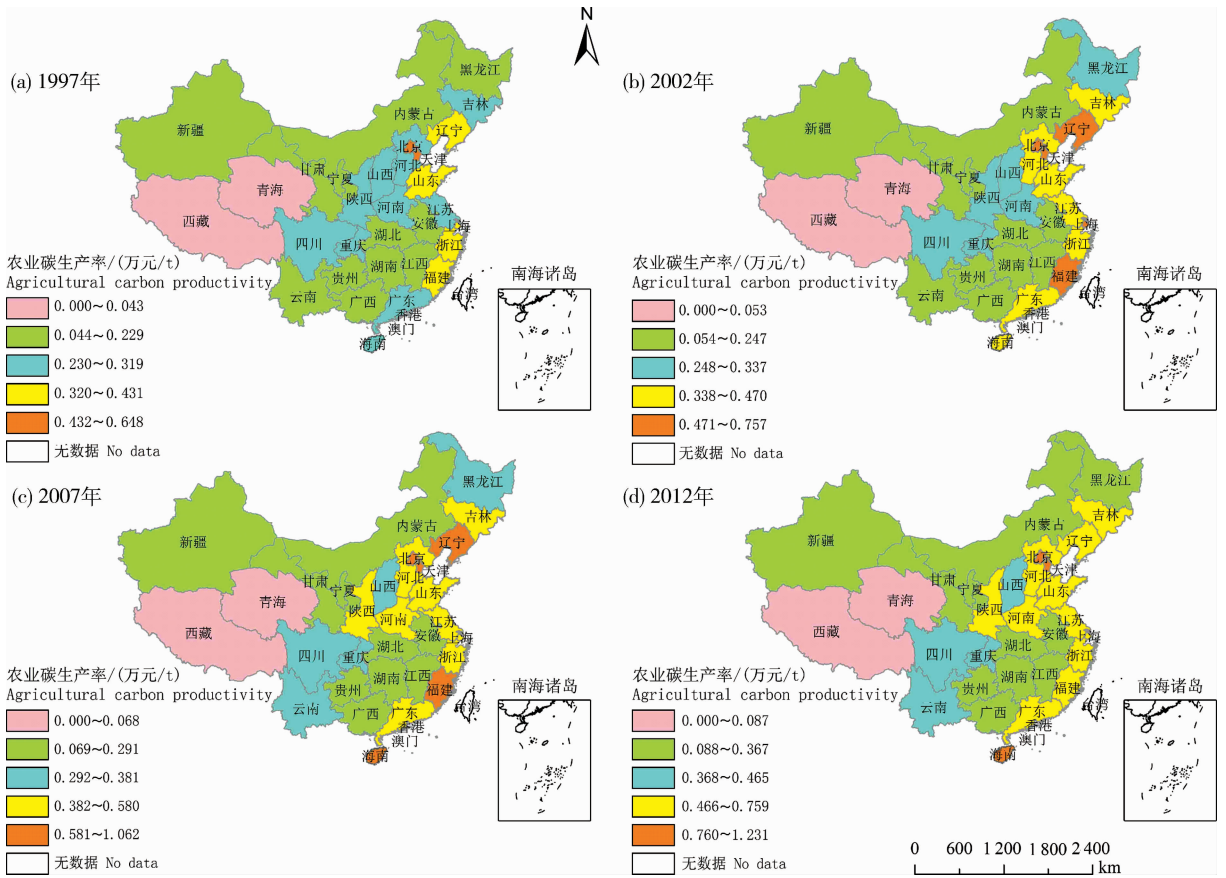


图 2 1997—2012 年部分年份中国大陆 31 省区农业碳生产率分布格局演变趋势

Fig. 2 Distribution pattern changes of agricultural carbon productivity of 31 provinces in mainland China from 1997 to 2012

由图 2 可知,2012 年我国大陆 31 省区农业碳生产率呈现“中高值为主,低值为辅”的分布格局,大部分省区农业碳生产率在 0.368 万元/t 以上。具体来看,高值区和较高值区以东部沿海省区为主,其碳生产率均在 0.466 万元/t 以上;中值区数量相对较少,主要以四川、云南、重庆和山西为代表,其值为 0.368~0.465 万元/t;较低值区主要分布在中西部的广大地区,总数达 11 个,其碳生产率在 0.088~0.367 万元/t 之间;而仅有青海和西藏的数值在 0.087 万元/t 以下。相比 2007 年,除个别省份(辽宁、福建、黑龙江)外,2012 年农业碳生产率区域分布状况并未出现较大变动,尽管数值有所上升,但格局相对稳定。2007 年与 2002 年相比而言,亦仅有微小变动(海南、云南、陕西和河南),但 2002 年较 1997 年却表现出明显的变动轨迹,尤以东部沿海地区变动最为剧烈。纵观 1997—2012 年我国大陆 31

省区农业碳生产率的变动轨迹(特别是进入新世纪后),不难发现,除个别省份外,我国东中西三大地区农业碳生产率“区域间异质化,区域内同质化”趋势较为明显。总体而言,我国大陆 31 省区农业碳生产率地区分化趋势不断加深,但区域内部省区差距日益缩小,这与我国现阶段的梯度发展格局大致吻合。

### 2.1.3 中国农业碳生产率演进分析

利用核密度函数对农业碳生产率演进趋势进行估计,为了避免出现离群值的现象,在此对农业碳生产率进行对数转换,转换后的结果如图 3 所示。由图可知,1997—2012 年密度函数中心有较为明显的右偏迹象,波峰逐渐扁平,变化区间逐步增大,这表明省域农业碳生产率地区差距有不断扩大趋势;同时,波峰亦有显著变化,即由较为明显的“一主三小”的四峰格局演变为“一主一次”的双峰格局,前后差

异明显。具体而言,1997年密度函数较为陡峭,存在“一主三小”的四峰格局,变化区间较为紧凑,说明该时期我国各省区农业碳生产率分布较为集中,存在较为明显的地区集聚现象,而且是多个区域不同类型的集聚。与1997年相比,2002年密度函数变为“一主一次”的双峰格局,其双峰值较1997年均有所缩小,密度中心整体向右小幅移动,变化区间有所扩张,这说明该时期内地区集聚现象有所减弱,且地区间差距仍在逐渐扩大。2007年较2002年密度函数中心继续向右偏移,峰值进一步缩小,变化区间继续扩张,且“一主一小”双峰格局消失,变为“一主一次一小”三峰格局,尽管右侧波峰较不凸显。与2007年相比,2012年密度函数中心再度右移,且变为双峰格局,主峰值基本保持不变,次峰值出现小幅回升趋势,与前三阶段有所差别。由此不难发现,考察期内我国大陆各省区农业碳生产率逐渐分化,地区差距扩大的趋势较为明显,且存在多个地区集聚(可能为多种类型集聚)的可能性,空间分布上逐渐不均衡化,具有产生空间俱乐部趋势。

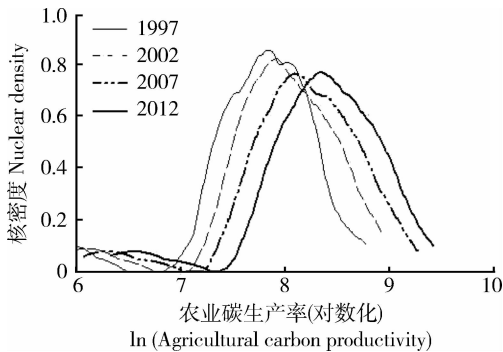


图3 1997—2012年部分年份中国大陆地区农业碳生产率演进趋势

Fig. 3 Evolution trend of agricultural carbon productivity in mainland China from 1997 to 2012

## 2.2 农业碳生产率增长的收敛检验

### 2.2.1 农业碳生产率的标准差收敛检验

农业碳生产率的标准差收敛,可以解释为不同地区农业碳生产率的标准差随时间不断推移而逐渐趋小的过程。在此构建农业碳生产率 $\sigma$ 收敛模型,其具体形式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_{it} - \bar{C}_t)^2} \quad (6)$$

式中: $\sigma$ 为农业碳生产率标准差, $C_{it}$ 为*i*地区*t*时期农业碳生产率, $\bar{C}_t$ 为样本均值。相应地,如果在T

年内,满足 $\sigma_{t+T} < \sigma_t$ ,则表明这*n*个省域间农业碳生产率存在 $\sigma$ 收敛现象,反之,则表示发散。图4展示了1997—2012年我国大陆31省区及东、中、西部农业碳生产率 $\sigma$ 收敛状况。

由图4可知,1997—2012年期间我国大陆31省区农业碳生产率差距不断扩大,整体不存在 $\sigma$ 收敛迹象,但2007—2012年存在阶段性 $\sigma$ 收敛趋势。具体来看,大致可划分为3个阶段,其中前两阶段(1997—2003年和2003—2007年)为波动上升期,第三阶段(2007—2012年)为持续下降期;尽管前两阶段农业碳生产率差异程度不断拉大,但二者在发散速度上有明显区别,后者明显快于前者;与前两阶段不同的是,第三阶段为样本考察期内仅有的持续收敛期,即 $\sigma$ 值由2007年0.6335持续降至2012年的0.6159,与1997年基本一致,收敛趋势较为明显。

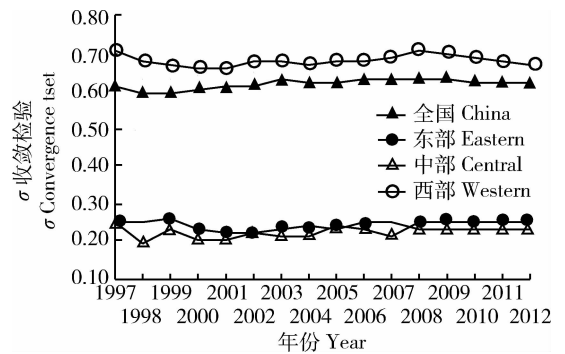


图4 中国大陆及东中西部农业碳生产率 $\sigma$ 收敛检验  
Fig. 4  $\sigma$  convergence test of agricultural carbon productivity in mainland China and its three regions

就三大地区而言,1997—2012年东部和西部农业碳生产率的标准差均呈缩减态势,整体存在较为明显的 $\sigma$ 收敛现象,而中部地区内部差距不断扩大。具体而言,东部各省农业碳生产率整体差异较小,尽管2002—2007年和2008—2012年期间均有小幅上扬趋势,但整体上呈下降态势,存在 $\sigma$ 收敛;中部地区不存在收敛迹象,即 $\sigma$ 值在由1997年的0.2550反复波动降至2007年0.2170后,2008—2012年表现出持续缓慢增长态势,并再次达到样本考察期的历史最高点0.2555,省域间差距逐渐拉大;西部地区农业碳生产率整体差异最大,且省域间差异缩小迹象凸显,即其 $\sigma$ 值变动轨迹可划分为持续下降期(1997—2000年和2008—2012年)和波动上升期(2000—2008年),其中2008—2012年的下降速度

明显快于 2000—2008 年的上升速度， $\sigma$  收敛趋势明显。

2.2.2 中国农业碳生产率的绝对  $\beta$  收敛检验

进一步对农业碳生产率的绝对  $\beta$  收敛状况进行检验。表 1 报告了全国 1997—2012 年农业碳生产率绝对收敛的普通面板固定效应模型估计结果。为准确把握不同阶段农业碳生产率的收敛状况，在此将相关数据以 5 年为期划分为 3 个时间跨度进行考察。正如前文 1.1.1 部分所提，若  $\beta$  值显著为负，则可判定该阶段存在绝对  $\beta$  收敛，否则不存在绝对  $\beta$

收敛。总体而言，1998—2012 年期间全国农业碳生产率的  $\beta$  系数为 -0.092 4，并通过了 1.00% 的显著性检验，表明存在绝对  $\beta$  收敛趋势，其收敛速度为 0.65%；分阶段来看，除 2003—2007 年省域农业碳生产率差异未缩小外，其他 2 个阶段农业碳生产率的收敛系数均为负，且通过 1.00% 的显著性检验，收敛速度分别高达 4.40% 和 7.59%，远高于整个考察期内的整体收敛速度。这也说明，当农业经济发展到一定程度时，单位农业碳排所带来的农业经济效益的收敛速度大致会出现明显加快的迹象。

表 1 1997—2012 年不同时期农业碳生产率的绝对  $\beta$  收敛结果

Table 1 Absolute  $\beta$  convergence results of agricultural carbon productivity at different periods from 1998 to 2012

时期 Period	变量 Variable	系数 Coefficient	标准误差 Standard Error	T 值 T Value	P 值 P Value
1997—2002	$\alpha$	1.571 0	0.405 1	3.903 0	0.000 2
	$\beta$	-0.197 3	0.051 8	-3.809 4	0.000 2
2003—2007	$\alpha$	-0.627 0	0.674 2	-0.930 0	0.354 2
	$\beta$	0.083 5	0.084 4	0.990 0	0.324 1
2008—2012	$\alpha$	2.639 8	0.284 3	9.283 7	0.000 0
	$\beta$	-0.315 7	0.034 5	-9.140 7	0.000 0
1998—2012	$\alpha$	1.068 4	0.115 6	9.244 2	0.000 0
	$\beta$	-0.092 4	0.014 4	-6.426 2	0.000 0

2.2.3 中国农业碳生产率的空間俱乐部收敛检验

1) 空间相关性。由 2.2.2 部分可知，我国大陆 31 省区农业碳生产率在时间上存在绝对  $\beta$  收敛趋势，那么其空间分布状况又是如何？是否的确存在一定的集聚现象或极化现象，使得不同区域间差异明显，但区域内彼此趋同呢？为此，将探究各省份农业碳生产率的空间关联性与异质性，以准确把握其

收敛趋势等特征。基于此，首先利用 Moran 指数对 1997—2012 年省域农业碳生产率的全局空间自相关性进行测算，结果见表 2。由表可知，样本考察期内农业碳生产率全局 Moran 指数均在 0.380 1 以上，最高甚至达 0.474 3，且均通过了 1.00% 的显著性检验，这意味着省域间农业碳生产率在空间上并非相互独立，而是存在高度正相关性和集聚现象。

表 2 1997—2012 年中国大陆 31 省区农业碳生产率全域自相关性检验结果

Table 2 General-autocorrelation of agricultural carbon productivity of 31 provinces in mainland China from 1997 to 2012

年份 Year	Moran's I	Z 值 Z value	P 值 P value	年份 Year	Moran's I	Z 值 Z value	P 值 P value
1997	0.474 3	4.376 8	0.001	2005	0.383 8	3.670 8	0.002
1998	0.471 6	4.503 7	0.001	2006	0.380 1	3.748 7	0.001
1999	0.466 0	4.641 7	0.001	2007	0.403 7	4.009 3	0.001
2000	0.473 6	4.144 7	0.001	2008	0.434 3	4.314 4	0.001
2001	0.461 9	4.454 0	0.001	2009	0.441 5	4.247 8	0.002
2002	0.444 9	4.152 0	0.001	2010	0.442 7	4.248 8	0.002
2003	0.440 7	4.349 5	0.001	2011	0.451 1	4.301 7	0.001
2004	0.394 0	3.974 0	0.003	2012	0.442 9	4.401 1	0.001

其次,将考察各省区农业碳生产率的聚类状况。按照各省域农业碳生产率在 Moran's I 散点图的象限归属位置,依次划分高-高聚类(H-H)、低-高聚类(L-H)、低-低聚类(L-L)和高-低聚类(H-L)4类,如表3所示。可以较为清楚地看到,各年份大多数省区均落在第一象限和第三象限(H-H和L-L)内,

1997年和2012年属于这两大象限的省区数量分别高达23个和25个,这在很大程度上表明省域间农业碳生产率在地域上具有类似的属性(如数值的大小等),也预示着在高-高聚类和低-低聚类两组具有空间俱乐部特征的可能性。

2)空间俱乐部收敛结果及分析。为更好地解释

表3 1997—2012年中国大陆31省区农业碳生产率聚类情况

Table 3 Agglomeration types of agricultural carbon productivity of 31 provinces in mainland China from 1997 to 2012

聚类 Agglomeration types	1997年	2002年	2007年	2012年
H-H	海南、吉林、辽宁、天津、河北、上海、北京、山东、江苏、浙江	山东、江苏、浙江、福建、海南、吉林、辽宁、天津、河北、上海、北京	山东、江苏、浙江、福建、海南、吉林、天津、河北、上海、北京	山东、河南、江苏、浙江、福建、海南、辽宁、天津、河北、上海、北京
L-H	内蒙古、安徽、山西	山西、安徽、江西、内蒙古	安徽、江西	山西、安徽、江西
L-L	湖南、云南、贵州、广西、青海、甘肃、四川、黑龙江、新疆、宁夏、西藏、湖北、江西	黑龙江、新疆、宁夏、西藏、湖北、湖南、云南、贵州、广西、青海、甘肃、重庆、四川	黑龙江、新疆、山西、宁夏、西藏、湖北、湖南、云南、贵州、广西、青海、甘肃、内蒙古、重庆、四川	黑龙江、新疆、宁夏、西藏、湖北、湖南、云南、贵州、广西、青海、甘肃、内蒙古、重庆、四川
H-L	福建、广东、陕西、重庆、河南	河南、广东、陕西	河南、广东、辽宁、陕西	广东、吉林、陕西

农业碳生产率空间趋同状况并验证是否存在空间俱乐部迹象,在此以2012年省域农业碳生产率聚类划分状况为依据,对农业碳生产率进行俱乐部收敛检验。在开展空间收敛性检验前,先对农业碳生产率

的空间相关性进行检验,并根据1.1.3部分提出的判断准则选择合适模型。由空间相关性检验结果(表4)可知,不同类型组别可适应的空间计量模型亦有所不同,其中H-H和L-L组适合空间误差模型,

表4 农业碳生产率空间相关性检验结果

Table 4 Spatial correlation test results of agricultural carbon productivity

参数 Parameter	H-H	L-H	L-L	H-L
LM-lag	11.520 6 (0.001 0)	0.184 7 (0.667 0)	31.414 9 (0.000 0)	12.744 5 (0.000 0)
Robust LM-lag	6.511 5 (0.011 0)	0.049 8 (0.823 0)	0.593 2 (0.441 0)	1.277 2 (0.258 0)
LM-error	17.783 0 (0.000 0)	0.156 7 (0.692 0)	32.445 8 (0.000 0)	12.662 1 (0.000 0)
Robust LM-error	12.773 9 (0.000 0)	0.021 8 (0.883 0)	1.624 1 (0.203 0)	1.194 8 (0.274 0)

注:括号内为P值。

Note: Values in the parenthesis represent the probability of different carbon productivity types.



而 L-H 和 H-L 组则应选择空间滞后模型。具体来看, H-H 组和 L-L 组均为正相关组, 且两组的 LM-error 和 Robust LM-error 的显著性明显优于 LM-lag 和 Robust LM-lag; 与此相反, 尽管 L-H 组和 H-L 组的相关检验大部分并未通过显著性检验, 但其 LM-lag 和 Robust LM-lag 模型的显著性略优于 LM-error 和 Robust LM-error, 故应选择空间滞后模型对其进行估计。

表 5 中 4 组不同类型地区的  $\beta$  系数全为负, 但仅有 H-H 和 L-L 组通过了显著性检验, 其他 2 组均不显著, 即 H-H 和 L-L 地区内农业碳生产率差异在空间上具有明显缩小趋势, 而 L-H 和 H-L 地区收敛趋势并不显著。具体来看, H-H 聚类和 L-L 聚类的  $\beta$  系数分别为  $-0.0517$  和  $-0.0384$ , 并均

在 5.00% 的置信水平下显著, 各自的收敛速度分别为 0.35% 和 0.26%; 同时,  $\lambda$  的系数为正, 且通过了 1.00% 的显著性检验, 这说明 2 组区域内农业碳生产率均存在着明显的正向依赖关系, 区域内部省域之间的农业碳生产率水平逐渐趋向一致, 彼此差异逐渐缩小, 空间趋同迹象明显。相应地, L-H 和 H-L 组的  $\beta$  同样均为负数, 但并未通过显著性检验, 即这两大聚类地区内各省农业碳生产率在空间上不存在明显趋同现象。当然, 这也是由这些省份所属集聚类型所决定的, 高(低)值被低(高)包围, 省域间农业碳生产率差异较大。总体而言, 由于不同省份所属空间聚类的差异, 其空间收敛状况也会存在较大差异, 但 H-H 和 L-L 两大聚类地区农业碳生产率的空间俱乐部收敛趋势较为明显。

表 5 农业碳生产率空间俱乐部收敛检验结果

Table 5 Spatial club convergence test results of agricultural carbon productivity

参数 Parameter	H-H		L-H		L-L		H-L	
	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM	SLM	SEM
$\alpha$	0.1927 (0.0724)	0.2312 (0.0468)	0.2064 (0.4575)	0.0928 (0.7317)	0.0542 (0.0742)	0.0767 (0.0286)	0.0009 (0.7828)	0.0230 (0.9010)
$\beta$	-0.0313 (0.0451)	-0.0517 (0.0135)	-0.0208 (0.5577)	-0.0070 (0.8382)	-0.0130 (0.3462)	-0.0384 (0.0149)	-0.0268 (0.3388)	-0.0443 (0.1697)
$\rho$	0.3340 (0.0000)		-0.2361 (0.0458)		0.3330 (0.0000)		-0.2361 (0.0046)	
$\lambda$		0.3809 (0.0000)		0.0700 (0.5859)		0.3361 (0.0000)		0.3607 (0.0000)
$\sigma^2$	0.0017	0.0016	0.0015	0.0016	0.0010	0.0009	0.0015	0.0014
$R^2$	0.1998	0.2537	0.2457	0.2048	0.2009	0.2551	0.2320	0.2759

注: 括号内为 P 值。

Note: Values in the parenthesis represent the probability of different carbon productivity types.

### 3 结论与讨论

本研究运用核密度函数、收敛理论和空间计量模型对我国大陆 31 省区农业碳生产率分布演进与空间俱乐部收敛趋势进行考察, 得到以下结论:

1) 全国(不含港、澳、台地区)及三大地区农业碳生产率均呈现明显增长态势, 且以东部地区农业碳生产率最高, 增长幅度最大; 除个别省份外, 东中西三大地区农业碳生产率“区域间异质化, 区域内同质化”趋势十分明显, 地区差距不断扩大, 空间分布上逐渐不均衡化, 且由较为明显的“一主三小”的四峰

格局演变为“一主一次”的双峰格局, 具有多个地区集聚的可能性。

2) 1997—2012 年期间, 我国大陆 31 省区农业碳生产率差距不断扩大, 整体不存在  $\sigma$  收敛迹象, 但 2007—2012 年存在阶段性  $\sigma$  收敛现象。三大地区中, 东部和西部存在较为明显的  $\sigma$  收敛现象, 而中部地区则不存在。与此同时, 全国农业碳生产率存在较为明显的绝对  $\beta$  收敛趋势, 收敛速度为 0.65%; 分阶段来看, 除 2003—2007 年未出现明显收敛趋势外, 其他时期农业碳生产率的收敛系数均为负, 且通过了 1.00% 的显著性检验, 收敛速度高达 4.40% 和

7.59%，较整个考察期间收敛趋势更加明显。

3) 全局 Moran 指数表明我国大陆 31 个省区农业碳生产率具有高度的空间正相关性，超过 2/3 以上的省区位于第一、三象限，存在着较为明显的集聚现象。对 4 组地区进行空间俱乐部收敛检验，发现 4 组不同类型地区中仅有 H-H 和 L-L 两组系数显著为负，其他 2 组均不显著，即 H-H 和 L-L 聚类地区存在较为明显的空间俱乐部收敛趋势，其收敛速度分别为 0.35% 和 0.26%。

碳生产率衡量的是单位碳排放带来的经济产出。在发展低碳经济的大趋势下，要实现碳减排与经济增长的双赢目标，应逐步将碳生产率指标作为衡量国民经济各部门发展的依据以及我国应对气候变化的核心内容。当然，由于各省区农业经济增长率不同，部分地区可以抵消或部分抵消由经济增长所带来的碳排放，而另一部分省区却并不具备该“优势”，那么就需根据各地区农业经济发展状况以及农业碳生产率所属聚类及地域性趋同状况，将农业碳生产率较低省区的“相对减排”和较高地区的“绝对减排”结合起来，以推动兼具地域差异性和全国协调性的碳减排合作机制的形成。

尽管已证实我国大陆 31 个省区农业碳生产率存在一定的趋同迹象，但由于各省域间资源禀赋、社会经济发展条件及政策环境等方面所在的差异性，将导致其空间收敛的路径和速度有所差异，这有待继续探讨，也是本研究进一步需要做的工作。

## 参 考 文 献

- [1] 鲁丰先,王喜,秦耀辰,闫卫阳. 低碳发展研究的理论基础[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(9): 8-14  
LU F X, Wang X, Qin Y C, Yan W Y. Theoretical basis of low-carbon development research[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(9): 8-14 (in Chinese)
- [2] Peters G P, Marland G, Le Q C, Boden T, Canadell J G, Raupach M R. Rapid growth in CO<sub>2</sub> emissions after the 2008-2009 global financial crisis[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(1): 2-4
- [3] 李小平, 王树柏, 周记顺. 碳生产率变动与出口复杂度演进: 1992—2009 年[J]. 数量经济技术经济研究, 2014(9): 22-39  
Li X P, Wang S B, Zhou J S. Changes of carbon productivity and evolution of export sophistication: 1992 - 2009 [J]. *The Journal of Quantitative and Technical Economics*, 2014(9): 22-39 (in Chinese)
- [4] Beinbocker E, Oppenheim J, Irons B, Lahti M, Farrell D, Nyquist S, Remes J, Naucler T, Enkvist P A. The carbon productivity challenge: Curbing climate change and sustaining economic growth[R]. Sydney: McKinsey Global Institute, 2008
- [5] 吴晓华, 李磊. 中国碳生产率与能源效率省级差异及提升潜力[J]. 经济地理, 2014, 34(5): 105-108  
Wu X H, Li L. The differences and enhancing potential of provincial carbon productivity and energy efficiency [J]. *Economic Geography*, 2014, 34(5): 105-108 (in Chinese)
- [6] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 彭小培, 李娜, 朱志平. 中国农业温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273  
Dong H M, Li Y E, Tao X P, Peng X P, Li N, Zhu Z P. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy [J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 269-273 (in Chinese)
- [7] 田云, 张俊彪. 中国农业碳排放研究回顾、评述与展望[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2014(2): 23-27  
Tian Y, Zhang J B. Research review, comment and prospect of China's agricultural carbon emissions [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2014(2): 23-27 (in Chinese)
- [8] 张永军. 技术进步, 结构变动与碳生产率增长[J]. 中国科技论坛, 2011(5): 114-120  
Zhang Y J. Technical progress, industrial structure and carbon productivity growth [J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2011(5): 114-120 (in Chinese)
- [9] Kaya Y, Yokobori K. *Environment, Energy and Economy: Strategies for Sustainability* [M]. Tokyo: United Nations University Press, 1998
- [10] 付加锋, 庄贵阳, 高庆先. 低碳经济的概念辨识及评级指标体系构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 38-43  
Fu J F, Zhuang G Y, Gao Q X. Conceptual identification and evaluation index system for low carbon economy [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(8): 38-43 (in Chinese)
- [11] 潘家华, 张丽峰. 我国碳生产率区域差异性研究[J]. 中国工业经济, 2011(5): 47-57  
Pan J H, Zhang L F. Research on the regional variation of carbon productivity in China [J]. *China Industrial Economics*, 2011(5): 47-57 (in Chinese)
- [12] 张成, 蔡万焕, 于同申. 区域经济增长与碳生产率: 基于收敛与脱钩效应的分析[J]. 中国工业经济, 2013(5): 18-30  
Zhang C, Cai W H, Yu T S. Regional economic development and carbon productivity: A convergent and decoupling index analysis [J]. *China Industrial Economics*, 2013(5): 18-30 (in Chinese)
- [13] 沈能, 王艳, 王群伟. 集聚外部性与碳生产率空间趋同研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(12): 40-47  
Shen N, Wang Y, Wang Q W. A study on agglomeration externality and spatial convergence of carbon productivity [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(12): 40-47 (in Chinese)

- [14] 田云,张俊飏,李波. 中国农业碳排放研究:测算、时空比较级脱钩效应[J]. 资源科学,2012,34(11):2097-2105  
Tian Y, Zhang J B, Li B. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. *Resources Science*, 2012, 34 (11): 2097-2105 (in Chinese)
- [15] 冉光和,王建洪,王定详. 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(2):32-38  
Ran G H, Wang J H, Wang D X. Study on the changing tendency and Counter-measures of carbon emission produced by agricultural production in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011(2):32-38 (in Chinese)
- [16] 贺亚亚,田云,张俊飏. 湖北省农业碳排放时空比较及驱动因素分析[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2013(5):79-85  
He Y Y, Tian Y, Zhang J B. Analysis on Spatial-temporal difference and driving factors of agricultural carbon emissions in Hubei Province [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2011 (2): 32-38 (in Chinese)
- [17] 李波,张俊飏,李海鹏. 中国农业碳排放与经济关系的实证研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(12):8-13  
Li B, Zhang J B, Li H P. Empirical study on China's agricultural carbon emissions and economic development [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25 (12):8-13 (in Chinese)
- [18] 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[J]. 经济地理,2015,35(4):142-148  
Gao M, Song H Y. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance [J]. *Economic Geography*, 2015, 35 (4): 142-148 (in Chinese)
- [19] 吴贤荣,张俊飏,朱焯,田云. 中国省域低碳农业绩效评估及边际减排成本分析[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(10):57-63  
Wu X R, Zhang J B, Zhu Y, Tian Y. Evaluation of provincial low-carbon agricultural performance and estimation of marginal abatement costs in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(10): 57-63 (in Chinese)
- [20] 田云,张俊飏. 中国省际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  
Tian Y, Zhang J B. Fairness research of agricultural carbon emissions between provincial regions in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23 (11): 36-44 (in Chinese)
- [21] 黄坚雄,陈源泉,刘武仁,郑洪兵,隋鹏,李媛媛,史学朋,聂胜委,高旺盛. 不同保护性耕作模式对农田温室气体净排放的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(14):2935-2942  
Huang J X, Chen Y Q, Liu W R, Zheng H B, Sui P, Li Y Y, Shi X P, Nie S W, Gao W S. Effect on Net greenhouse gases emission under different conservation tillages in Jilin Province [J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2011, 44(14): 2935-2942 (in Chinese)
- [22] 李俊杰. 民族地区农地利用碳排放测算与影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(9):42-47  
Li J J. Research on characteristics and driving factors of agricultural land carbon emissions in provinces of minorities in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(9): 42-47 (in Chinese)
- [23] 黄祖辉,米松华. 农业碳足迹研究:以浙江省为例[J]. 农业经济问题,2011(11):40-47  
Huang Z H, Mi S H. Agricultural sector carbon footprint accounting: A case of Zhejiang, China [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011(11):40-47 (in Chinese)
- [24] 段华平,张悦,赵建波,卞新民. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报,2011,25(5):203-208  
Duan H P, Zhang Y, Zhao J B, Bian X M. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203-208 (in Chinese)
- [25] 许冬兰,王樱洁. 我国沿海渔业碳生产率的区域差异及影响因素[J]. 中国农业大学学报,2015,20(2):284-290  
Xu D L, Wang Y J. Regional Differences and influencing factors of China's coastal fishery carbon productivity [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20 (2): 284-290 (in Chinese)
- [26] 沈坤荣,马俊. 中国经济增长的“俱乐部收敛”特征及其成因研究[J]. 经济研究,2002(1):33-39  
Shen K R, Ma J. The characteristics of “Club convergence” of China's economics growth and its cause [J]. *Economic Research Journal*, 2002(1):33-39 (in Chinese)
- [27] 许广月. 碳排放收敛性:理论假说和中国的经验研究[J]. 数量经济技术经济研究,2010(9):31-42  
Xu G Y. The convergence in carbon dioxide emissions: Theoretical hypotheses and empirical research in China [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2010 (9): 31-42 (in Chinese)
- [28] 潘文卿. 中国区域经济差异与收敛[J]. 中国社会科学,2010(1):72-84  
Pan W Q. The economic disparity between different regions of China and its reduction-an analysis from the geographical perspective [J]. *Social Sciences in China*, 2010(1): 72-84 (in Chinese)
- [29] Barro R J, Sala-i-Martin X. Convergence [J]. *Journal of Political Economy*, 1992, 100(2): 223-251
- [30] Jobert T, Karanfil F, Tykhonenko A. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in the EU: Legend or reality? [J]. *Energy Economics*, 2010, 32(6): 1364-1373
- [31] 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Dubin模型[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(6):53-61  
Wu X R, Zhang J B, Cheng L L, Tian Y. Potential of agricultural carbon reduction under climate change and its

- spatial correlation characteristics in China; Based on the spatial durbin model [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(6): 53-61 (in Chinese)
- [32] Anselin L. Spatial econometrics [M]. In: Baltagi B H. *A Companion to Theoretical Econometrics*. Malden, Massachusetts: Wiley-Blackwell, 2001
- [33] 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 (in Chinese)
- [34] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 247-252  
Hu X D, Wang J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 247-252
- [35] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21-27  
Min J S, Hu H. Calculation of greenhouse gases emissions from agricultural production in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7): 21-27 (in Chinese)
- [36] IPCC. 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agricultural, Forestry and Other Land Use*[M]. Paris: OECD, 2006
- [37] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 600-612  
Wang M X, Li J, Zheng X H. Methane Emission and mechanisms production, oxidation, transportation in the rice fields[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4): 600-612 (in Chinese)
- [38] 国家统计局. 中国统计年鉴(2001—2013)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2013  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *Statistical Yearbook of China (2001—2013)* [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2001—2013
- [39] 国家统计局. 中国农村统计年鉴(2001—2013)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2013  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Rural Statistical Yearbook (2001—2013)* [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2001—2013
- [40] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴(2001—2013)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001—2013  
China Agriculture Yearbook Editorial Committee. *China Agriculture Yearbook (2001—2013)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001—2013
- [41] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 中国畜牧业年鉴(2001—2011)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001—2011  
China Animal Husbandry Yearbook Editorial Committee. *China Animal Industry Yearbook (2001—2011)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001—2011
- [42] 农业部. 中国农业统计资料(2001—2012)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2012  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *China Agricultural Statistical Report (2001—2012)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001—2012

责任编辑: 苏燕