中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

中国种植业碳补偿率区域差异、动态演进及收敛性分析

伍国勇，陈　莹，孙小钧

Regional differences, dynamic evolution, and convergence of the carbon compensation rate of planting industry in China

WU Guoyong, CHEN Ying, and SUN Xiaojun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210225

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低碳绩效测度与动态效应研究——以山东省种植业为例

Low carbon performance measurement and dynamic effects: A case study of the planting industry in Shandong Province

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 581–589

中国畜牧业绿色全要素生产率演变及区域差异研究

Evolution of green total factor productivity and regional disparity in China's husbandry

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(4): 613–622

水足迹视角下陕西省种植业水资源利用评价及经济发展脱钩分析

Decoupling analysis on water resources utilization of planting industry and economic development in Shaanxi Province from the perspective of water footprint

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 153–162

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

Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic con–vergence in China using SBM–Undesirable model and panel unit root test

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1381–1391

基于LUCC的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究

Carbon emission and ecological compensation of main functional areas in Sichuan Province based on LUCC

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 142–152

基于果农受偿意愿的绿肥种植生态补偿标准探讨

Discussion on the ecological compensation standard of green manure planting based on the willingness of fruit farmers to accept

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 448–457

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 10 月 第 29 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2021, 29(10): 1774−1785

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210225

伍国勇, 陈莹, 孙小钧. 中国种植业碳补偿率区域差异、动态演进及收敛性分析 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(10): 1774−1785

WU G Y, CHEN Y, SUN X J. Regional differences, dynamic evolution, and convergence of the carbon compensation rate of planting industry in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10): 1774−1785

中国种植业碳补偿率区域差异、动态演进及收敛性分析*

伍国勇[1,3], 陈 莹[1], 孙小钧[2**]

(1. 贵州大学经济学院 (西部中心) 贵阳 550025; 2. 南京农业大学经济管理学院 南京 210095; 3. 贵州基层社会治理创新高端智库 贵阳 550025)

摘 要: 农业碳排放阻碍绿色农业转型, 探索种植业碳补偿率区域差异、动态演进及收敛性, 可为低碳农业良性发展提供有益指导。本文同时考虑碳源和碳汇, 测算 2002—2018 年中国 31 省、市、自治区种植业碳补偿率, 采用 Dagum 基尼系数分解法考察地区差异, 采用非参数估计中的核密度估计动态演进过程, 借助 σ 收敛、绝对 β 收敛及条件 β 收敛检视收敛性特征。结果表明: 1) 种植业碳补偿率整体相对差异扩大趋势明显。东部地区相对差异扩大, 中部地区和西部地区变化较小; 东—西部、东—中部地区之间增加, 中—西部地区之间减小; 地区间差距是造成种植业碳补偿率差异的主要原因。2) 中国种植业碳补偿率整体呈逐年增大的变动态势, 碳补偿率高值省份有所增多, 省域种植业碳补偿率差异有先减后增的趋势。东部各省种植业碳补偿率在逐渐上升, 绝对差距有所减少, 从两极分化演变为单极化; 中部各省种植业碳补偿率在逐渐上升, 绝对差距有所减小; 西部各省种植业碳补偿率变化较为稳定。3) 全国及东、西部地区的种植业碳补偿率不存在 σ 收敛, 而中部地区不甚明显; 全国、东、中及西部地区绝对和条件 β 收敛均显著。本文的结论强调, 中国种植业碳补偿率的区域异质性凸显, 其时序变化趋势总体上升; 省域间的"追赶效应"显现, 地区间碳补偿率增长的趋同态势明显。因此, 合理制定区域农业绿色发展策略, 积极发挥区域减排潜力是提高种植业碳补偿率的关键。

关键词: 种植业; 碳补偿率; 区域差异; 动态演进; 收敛性

中图分类号: F062.2; S19 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Regional differences, dynamic evolution, and convergence of the carbon compensation rate of planting industry in China*

WU Guoyong[1,3], CHEN Ying[1], SUN Xiaojun[2**]

(1. Economics School, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Economics and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. High-end Think Tank on Grassroots Social Governance Innovation in Guizhou, Guiyang 550025, China)

Abstract: Global warming is an increasingly serious problem. Carbon emissions from agriculture had hindered its transition to green agriculture, and carbon emissions from the planting industry cannot be ignored. Reducing the regional differences and clarifying dy-

* 国家社会科学基金项目 (18CSH036) 和贵州大学一流学科建设项目 (GNYL[2017]002) 资助

** 通信作者: 孙小钧, 主要研究方向为资源与环境经济。E-mail: 2281739924@qq.com

伍国勇, 主要研究方向为农业农村发展与生态经济问题。E-mail: wgyung@qq.com

收稿日期: 2021-04-14 接受日期: 2021-05-27

* This study was supported by the National Social Science Foundation of China (18CSH036) and the First Class Discipline Construction Project of Guizhou University (GNYL[2017]002).

** Corresponding author, E-mail: 2281739924@qq.com

Received Apr. 14, 2021; accepted May 27, 2021

namic evolution and convergence of the carbon compensation rates in the planting industry are conducive to the benign development of low-carbon agriculture. At present, few studies consider both agricultural carbon sources and carbon sinks, and an in-depth analysis of the carbon compensation rate of the planting industry is lacking. Existing studies on the agricultural carbon compensation rate focus only on the spatial effect of agricultural carbon but do not effectively analyze the sources and convergence of regional differences in the carbon compensation rate of the planting industry. Therefore, this study considered both the carbon sources and the carbon sinks and estimated the carbon compensation rate of the planting industry in 31 Chinese provinces (municipalities and autonomous districts) from 2002 to 2018. The Dagum Gini coefficient decomposition method was used to measure and decompose the regional differences, the dynamic evolution process of kernel density with non-parametric estimation was investigated, and the σ-convergence, absolute β-convergence, and conditional β-convergence models were used to test the convergence characteristics of the carbon compensation rate. The results were as follows: (1) The overall relative difference in the carbon compensation rate of the planting industry tended to expand. The relative differences in the eastern region expanded, while the relative differences in the central and western regions showed only little change. The relative differences between the eastern and western regions and the eastern and central regions increased, whereas that between the central and western regions decreased. The regional differences were the main reasons for the differences in the carbon compensation rates of the planting industry. (2) The carbon compensation rate of the planting industry in China increased annually, and the number of provinces with high carbon compensation rates increased. The provincial difference in carbon compensation rate first decreased and then increased. The carbon compensation rate in the eastern provinces increased gradually, and the inter-provincial absolute gap decreased, changing from polarization to unipolarization. The carbon compensation rate in the central provinces increased gradually, and the absolute gap decreased. The carbon compensation rate in the western provinces was relatively stable and showed little change. (3) There was no σ-convergence in the carbon compensation rate of the planting industry in the whole country and the eastern and western regions, but it was not obviously observed in the central region. The absolute and conditional β-convergences were significant in the whole country and the eastern, central, and western regions. The results of this study emphasize that regional heterogeneity in the carbon compensation rate of China's planting industry is prominent and that the temporal trend of carbon compensation rate is generally increasing. The "catch-up effect" among provinces and the convergence trend of the carbon compensation rate growth among regions are apparent. In the future, it will be important to improve the carbon compensation rate of the planting industry to better formulate a green development strategy for regional agriculture and actively reduce regional emissions.

Keywords: Planting industry; Carbon compensation rate; Regional disparity; Dynamic evolution; Convergences

气候变暖是全球性问题, 它威胁人类社会的持续稳定发展, 二氧化碳浓度升高是气候变暖的重要原因之一。因此, 绿色发展成为全球共识[1]。中国作为主要的碳排放国之一, 碳排放量占世界的 28%[2]。为缓解全球气候变暖的严峻形势, 在 2018 年中国提出, 二氧化碳排放在 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰, 单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65% 的目标, 这一目标也是引领全球气候治理和实现美丽中国必须应对的课题[3]。中国 2020 年第一次提出 2060 年前实现碳中和的目标[4]。这意味着中国急需采取更有力的政策和措施来控制碳排放。农业系统碳排放超过全球人为温室气体排放总量的 30%[5], 种植业在中国农业产值中占比超过 50%, 地位极其重要[6], 其碳排放不可忽视, 占中国温室气体排放总量的 16% 左右[7-9]。种植业具有碳汇和碳源双重属性[10], 正确识别中国种植业碳吸收和碳排放的净效应是科学管控种植业碳排放的前提。为此, 本文以种植业碳补偿率为研究对象, 同时考虑农业碳吸收与碳排放的双重效应, 为农业清洁生产提供良策。

农业在农资投入过程中会直接或间接导致温室气体排放[11]。当前, 中国省际层面碳排放转移整体呈明显的空间集群特征[12]。长期来看, 随农业经济发展, 中国农业碳排放强度将下降; 空间上, 东部沿海和中西部部分地区超过农业经济强度高拐点值, 中西部地区则未抵达[13]。由于农业能源消耗是农业碳增量的主要来源[14], 减少化肥、农药等施用可有效减少农业碳排放[15]。进一步, 学者们测度了农业碳生产率发现[16-18], 中国农业碳生产率各省域层面提升趋势、空间上自相关性及溢出效应均明显[16]。其中, 经济发展水平影响显著, 而农户专业化生产、受教育水平、机械化水平、农作物受灾程度和家庭农地经营规模等也会产生影响[17-18]。此外, 在对农作物碳足迹的研究中发现[19-20], 播种面积、化肥及农药投入的减少能有效降低农作物碳足迹, 实现农业碳减排[19]; 复种水平、种植业规模等抑制碳足迹[20]。减少化肥不合理使用[21]、扶持"低效低排"型地区的发展等将有助于农业碳减排[22]。农业也是碳汇, 耕地上农作物通过光合作用能将空气中的二氧化碳固定在土壤中[23]。学者们计算了不同省区净碳汇量发现, 农业源的净碳汇量呈现波动递减趋势[24]; 农业净碳汇效率空间

差异明显[25], 区域间不均衡, 且城镇化及经济发展水平对其具有消极的溢出效应[26]。促进农业绿色发展, 应当同时从减少碳源和增加碳汇两方面着手。农业碳补偿率是农业碳汇量与碳源量之比, 反映了一定区域内生态系统中农作物碳吸收和排放的比例[27]。目前, 鲜有关于农业碳补偿率的研究, 且主要聚焦于县域层面, 以赵荣钦等[28-29]、王刚等[30]、魏燕茹等[31]为主要代表。赵荣钦等[28-29]先后以中原经济区县域单元、河南省为例, 通过核算碳收支, 发现碳补偿率存在空间差异, 经济发达地区碳补偿率低。王刚等[30]以成都市为例, 分析碳收支空间分布特征, 发现碳排放空间差异明显, 分布特征为“东高西低、中心最高”, 碳汇吸收补偿率低, 区域间差异大。魏燕茹等[31]从不同土地利用方式视角探讨了福建省碳收支的空间差异发现, 区域内碳补偿率逐年减小, 经济较发达区域低于经济欠发达区域, 且空间差异明显。此外, 吴昊玥等[32]从全国省域层面对农业碳补偿率的空间效应进行研究, 发现农业碳补偿率区域集聚态势显现, 正向溢出效应显著。

纵观文献, 极少学者采用农业碳补偿率为衡量指标, 同时考虑农业碳吸收、碳排放的双重效应来研究农业生产净碳效应, 缺乏对种植业碳补偿率的相关分析。同时, 学者们对农业碳补偿率的研究仅着眼于农业碳空间效应, 未对种植业碳补偿率地区差异来源与收敛性进行探究。因此, 为进一步拓展已有研究, 本文在测算 2002—2018 年中国 31 省种植业碳补偿率基础上, 利用 Dagum 基尼系数分解法、核密度分析以及收敛性分析方法, 对种植业碳补偿率地区差异、动态演进以及收敛性进行检验与分析。这对发挥种植业减排潜力, 促进农业清洁生产具有重要的理论和实际意义。

1 研究方法与数据来源

1.1 种植业碳补偿率测算

种植业碳补偿率能够衡量区域内生态系统中种植业固碳量占碳排放量的比重。碳补偿率越高, 说明该地区种植业碳汇能力越强[27]。计算公式为:

$$\mathrm{CCR} = \mathrm{CI}/\mathrm{CT} \tag{1}$$

式中: CCR 为种植业碳补偿率, CI 为种植业碳吸收总量, CT 为种植业碳排放总量。

种植业碳汇主要计算农作物光合作用的固碳量, 具体公式为:

$$C = \sum_{i}^{k} C_i = \sum_{i}^{k} L_i \times (1 - W_i) \times \frac{Y_i}{H_i} \tag{2}$$

式中: C 为固碳量, k 为农作物种类数, C_i 为第 i 种农作物固碳量, L_i 为作物合成单位有机质的固碳量, W_i 为平均含水率, Y_i 为经济产量, H_i 为经济系数。以上数据参考田云等[25]和王梁等[33]的研究, 如表 1 所示。

表 1 主要农作物碳吸收率、平均含水量、经济系数和单位碳吸收量

Table 1 Carbon absorption rates, average water contents, economic coefficients and carbon absorption rates of major crops

作物种类 Crop species	主要农作物 Main crop	碳吸收率 Carbon absorption rate	平均含水率 Average moisture content (%)	经济系数 Economic coefficient
粮食作物 Food crops	水稻 Rice	0.414	12	0.45
	小麦 Wheat	0.485	12	0.40
	玉米 Corn	0.471	13	0.40
	高粱 Sorghum	0.450	13	0.35
	谷子 Millet	0.450	14	0.40
	薯类 Tubers	0.423	70	0.70
	豆类 Beans	0.450	13	0.34
经济作物 Grops	棉花 Cotton	0.450	8	0.10
	油菜籽 Rapeseed	0.450	10	0.25
	花生 Peanut	0.450	10	0.43
	甘蔗 Sugarcane	0.450	50	0.50
	甜菜 Beetroots	0.407	75	0.70
	烟草 Tobacco	0.450	85	0.55
园艺作物 Garden crops	蔬菜 Vegetables	0.450	90	0.60
	瓜果 Fruits	0.450	90	0.70

关于种植业碳源, 本文采用目前常用且较权威的 IPCC(2006) 发布的排放因子法。将农药、化肥、农用柴油、农用塑料薄膜、农业播种面积和农业灌溉等投入作为主要碳源以计算种植业碳排放量 (CE)。其公式为:

$$\mathrm{CE} = \sum Q_i \times \gamma_i \tag{3}$$

式中: Q_i 为第 i 种碳源使用量, γ_i 为对应排放系数。

参考李波等[11]研究, 农药、化肥、农用柴油、农用塑料薄膜、农业播种面积和农业灌溉碳排放系数分别为 4.9341 kg·kg^{-1}、0.8956 kg·kg^{-1}、0.5927 kg·kg^{-1}、5.1800 kg·kg^{-1}、312.6000 kg·km^{-2}、25.0000 kg·hm^{-2}。然而, 考虑到农业灌溉中的能源消耗并非都来自火力发电, 故将其排放系数调整为 19.8575 kg·hm^{-2}, 以避免由非火力发电而高估碳排放[17]。

1.2　Dagum 基尼系数分解法

Dagum 基尼系数分解法由 Dagum 于 1997 年提出[34], 相比以往研究地区差异的指标, 如基尼系数、泰尔指数及变异系数等, 该方法具有结论更精准, 且有助于解决地区差异归因问题的优势。因此, 本文运用该方法对中国省际种植业碳补偿率的地区相对差异进行测度, 进而对其进行分解, 以此获知种植业碳补偿率的地区差异构成。Dagum 基尼系数模型如下:

$$G=\sum_{m=1}^{i}\sum_{n=1}^{i}\sum_{j=1}^{K_m}\sum_{h=1}^{K_n}\left|y_{mj}-y_{nh}\right|\Big/2K^2\bar{y} \tag{4}$$

式中: i 为区域 (i=1, 2, 3; 分别表示东部、中部和西部地区), $\bar{y}$为省域碳补偿率均值, K 为省份数, y_{mj} 或 y_{nh} 为地区 m 或 n 内省份 j 或 h 的种植业碳补偿率, K_m 或 K_n 为地区 m 或 n 内省份个数。

G_{mm} 表示地区 m 的基尼系数:

$$G_{mm}=\frac{\sum_{j=1}^{K_m}\sum_{h=1}^{K_m}\left|y_{mj}-y_{mh}\right|}{2K_m^2\overline{y_m}} \tag{5}$$

G_{mn} 则为地区 m 和地区 n 之间的基尼系数:

$$G_{mn}=\frac{\sum_{j=1}^{K_m}\sum_{h=1}^{K_n}\left|y_{mj}-y_{nh}\right|}{K_mK_n(\overline{y_m}+\overline{y_n})} \tag{6}$$

式中: $\overline{y_m}$、$\overline{y_n}$为 m、n 地区内种植业碳补偿率均值。并定义如下变量:

$$p_m=\frac{K_m}{K} \tag{7}$$

$$s_m=\frac{K_m\overline{y_m}}{N\bar{y}} \tag{8}$$

$$D_{mn}=\frac{M_{mn}-N_{mn}}{M_{mn}+N_{mn}} \tag{9}$$

$$M_{mn}=\int_0^{\infty}dF_m(y)\int_0^{Y}(y-x)dF_n(x) \tag{10}$$

$$N_{mn}=\int_0^{\infty}dF_n(y)\int_0^{Y}(y-x)dF_m(x) \tag{11}$$

式中: p_m 为地区 m 的省份份额; s_m 为地区 m 的种植业碳补偿率份额; D_{mn} 为 m 与 n 地区间种植业碳补偿率的相对影响; M_{mn} 为地区间种植业碳补偿率差值, 即 m、n 地区中所有 $y_{mj}-y_{nh}>0$ 的样本值加总的数学期望; N_{mn} 为超变一阶矩, 即 m、n 地区中所有 $y_{mj}-y_{nh}<0$ 的样本值加总的数学期望; 函数 $F_m(F_n)$ 表示 $m(n)$ 地区种植业碳补偿率的累积密度分布函数。

基尼系数 (G) 可分为地区内差距 (G_w)、地区间差距 (G_{nb}) 和超变密度 (G_t) 3 部分, 计算方法如下式:

$$G_w=\sum_{m=1}^{i}G_{mm}p_ms_m \tag{12}$$

$$G_{nb}=\sum_{m=2}^{i}\sum_{n=1}^{m-1}G_{mn}(p_ms_n+p_ns_m)D_{mn} \tag{13}$$

$$G_t=\sum_{m=2}^{i}\sum_{n=1}^{m-1}G_{mn}(p_ms_n+p_ns_m)(1-D_{mn}) \tag{14}$$

$$G=G_w+G_{nb}+G_t \tag{15}$$

式中, p_n 为地区 n 的省份份额, s_n 为地区 n 的种植业碳补偿率份额。

1.3　核密度分析

核密度分析是一种非参数检验法, 相比参数估计稳健性强、模型依赖性弱。本文采用核密度估计法分析种植业碳补偿率的动态演进趋势。计算公式为:

$$f(x)=\frac{1}{nd}\sum_{i=1}^{n}h\left(\frac{X_i-\overline{X}}{d}\right) \tag{16}$$

式中: n 为观测数; d 为带宽; $h(\cdot)$ 为核函数; X_i 为独立同分布的观测值, 即 i 省种植业碳补偿率; $\overline{X}$为观测值的均值。本文采用高斯核函数来分析中国种植业碳补偿率动态演进趋势。

1.4　随机收敛检验法

1.4.1　σ 收敛

σ 收敛是指不同区域种植业碳补偿率的离差随时间推移而变化的情况。若离差随时间推移而不断减小, 则表明不同地区种植业碳补偿率的离散程度也在减小, 即可认为种植业碳补偿率的增长存在 σ 收敛。参考刘帅[35]研究, σ 收敛通常可用变异系数来表示, 计算公式为:

$$\sigma_j=\frac{\sqrt{\left[\sum_i^{n_j}(y_{ji}-\overline{Y}_j)^2\right]\Big/n_j}}{\overline{Y}_j} \tag{17}$$

式中: y_{ji} 是地区 j 内 i 省份的种植业碳补偿率, $\overline{Y}_j$为地区 j 的种植业碳补偿率的均值, n_j 是 j 地区的省份总数。

从式 (17) 可知, 标准差和均值的比值为变异系数, 能度量样本数据的离散状况。若 σ 系数逐渐减小, 说明该地区不同省份间种植业碳补偿率的差异逐渐减小, 从而呈向均值收敛的态势。各变量含义同前。

1.4.2 β 收敛

β 收敛源自新古典经济学理论, 若存在 β 收敛, 则说明低种植业碳补偿率地区的碳补偿率增长速度快于种植业碳补偿率高的地区。β 收敛又有绝对和条件 β 收敛之分, 前者仅考虑其自身的收敛状态, 后者是对多种因素加以控制之后的收敛状态。

1) 绝对 β 收敛模型为:

$$\ln\left(\frac{y_{i,t+1}}{y_{it}}\right)=\alpha+\beta\ln y_{it}+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \tag{18}$$

式中: $\ln\left(\frac{y_{i,t+1}}{y_{it}}\right)$表示种植业碳补偿率的增长率, 利用对数差分计算; y_{it} 是第 i 个省份第 t 时期的种植业碳补偿率; α 是截距项, β 是收敛系数, u_i、v_t、ε_{it} 分别为地区固定效应、时间固定效应和随机误差项。

2) 条件 β 收敛模型为:

$$\ln\left(\frac{y_{i,t+1}}{y_{it}}\right)=\alpha+\beta\ln y_{it}+\delta X+u_i+v_t+\varepsilon_{it} \tag{19}$$

式中: X 是各控制变量, δ 是其系数。若 $\beta<0$ 且显著, 则表明中国种植业碳补偿率存在收敛; 反之, 表明存在发散。其中, 收敛速度 $b=-\ln(1+\beta)$。条件 β 收敛模型是将多种影响因素加入原绝对 β 收敛模型进行控制。本文添加农业财政支出、城镇化率、产业结构、农业机械化、农户文化程度、劳动非农转移、农业经营规模作为控制变量。

1.5 数据来源

文中数据为 2002—2018 年中国 31 省 (市、自治区) 统计数据, 鉴于数据可获得性未包括港、澳、台地区。本文选取水稻 (*Oryza sativa*)、小麦 (*Triticum aestivum*)、玉米 (*Zea mays*)、高粱 (*Sorghum bicolor*) 等主要农作物作为研究对象测算各省种植业碳汇, 相应数据来自国家统计局。其中, 条件 β 模型中条件变量包括: 农业财政支出, 用农林水事务支出占总财政支出的比重表示; 城镇化率, 用城镇人口与总人口之比表示; 产业结构, 用第一产业增加值与地区生产总产值的比值表示; 农业机械化, 用农业机械总动力表示; 农户文化程度, 用农户受教育程度表示; 非农劳动力转移, 用乡村从业人口数与乡村第一产业从业人口数的差值表示; 农业经营规模, 用农作物总播种面积与乡村总人口数的比值表示; 农业经济发展水平, 用农林牧渔业增加值与乡村总人口数的比值表示。对应数据主要来自《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》以及省域统计资料。同时, 部分乡村第一产业从业人员数据缺失, 用第一产业从业人数替代。此外, 文中对部分变量作对数处理。

2 实证结果与分析

2.1 种植业碳补偿率分布特征

根据式 (1)-(3) 测算了 2002—2018 年 31 个省 (市、自治区) 种植业碳补偿率, 考虑篇幅因素, 仅呈列部分年份的测算结果。如表 2 所示, 2002—2018 年种植业碳补偿率均大于 1, 表明各省种植业净效应均为碳汇。横向对比 2018 年各省域种植业碳补偿率发现, 广西种植业碳补偿率最高, 达到 17.45; 吉林位列第 2 位, 其种植业碳补偿率为 12.82; 河南、黑龙江和天津则分别位于第 3~5 位, 其种植业碳补偿率分别为 12.18、11.48 和 11.37。 浙江种植业碳补偿率最低, 仅为 3.09; 倒数第 2 位为西藏, 其种植业碳补偿率为 3.49; 倒数第 3~5 位分别为福建、海南和上海, 其种植业碳补偿率分别为 3.55、4.16 和 4.33。在区域层面, 2002—2018 年中部地区种植业碳补偿率均值最高, 西部地区种植业碳补偿率均值略低于中部地区, 东部地区最低。这说明我国中部地区和西部地区大部分为种植业碳补偿率高值区, 而东部地区主要为种植业碳补偿率低值地区。因此, 要重点关注东部地区种植业碳补偿率, 及时制定多元化策略, 助力实现农业清洁生产。

2.2 种植业碳补偿率地区差异

2.2.1 地区内差异

本文首先利用 Dagum 基尼系数及其分解法测度了 2002—2018 年中国种植业碳补偿率的不平衡和地区差距及演变趋势 (表 3)。表 3 显示, 在整个研究期内种植业碳补偿率基尼系数均值为 0.176, 总体基尼系数显示我国种植业碳补偿率区域差距呈逐渐增大趋势, 由 2002 年的 0.144 逐年上升至 2018 年的 0.215, 升幅达 49.31%。

本文进一步绘制了种植业碳补偿率时序变化趋势 (图 1)。在地区内差距方面, 三大地区内部基尼系数值差异较为明显, 内部差距最大者为西部, 其次是东部和中部。其中, 东部地区基尼系数增长趋势较稳态, 由 0.136 增长为 0.223, 增幅为 63.97%。在中部地区, 基尼系数相对较平稳, 总体保持较稳态的发展

表 2　2002—2018 年中国省域种植业碳补偿率

Table 2　Carbon compensation rate of crops production in each province (city, autonomous region) of China from 2002 to 2018

区域 Region	省份 Province (city, autonomous region)	年份 Year								
		2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018
东部 East	北京 Beijing	5.56	5.51	6.68	7.28	6.98	7.38	5.70	5.73	4.80
	天津 Tianjin	6.33	6.58	6.92	6.73	6.75	6.74	7.03	7.56	11.37
	河北 Hebei	6.50	5.50	5.83	6.80	6.95	7.45	7.54	8.26	9.08
	上海 Shanghai	4.27	4.08	4.02	3.90	3.82	4.25	4.03	3.81	4.33
	江苏 Jiangsu	8.70	8.84	9.07	9.25	9.05	9.20	9.40	9.30	9.83
	浙江 Zhejiang	4.04	3.81	3.98	3.64	3.57	3.58	3.49	3.52	3.09
	辽宁 Liaoning	7.60	8.68	8.26	8.33	7.32	8.30	6.80	8.13	9.19
	福建 Fujian	4.31	4.30	4.12	3.91	3.99	4.07	4.16	4.13	3.55
	山东 Shandong	6.62	7.41	7.70	8.28	8.15	8.45	8.62	8.91	10.20
	广东 Guangdong	7.88	7.34	8.05	7.32	7.55	8.05	8.10	8.17	7.78
	海南 Hainan	7.60	8.12	7.03	6.78	5.33	5.92	5.53	4.52	4.16
	平均 Mean	6.31	6.38	6.51	6.56	6.32	6.67	6.40	6.55	7.04
中部 Central	山西 Shanxi	6.13	7.25	7.54	7.22	7.27	8.07	8.32	8.22	8.76
	吉林 Jilin	11.29	11.91	12.71	12.17	11.20	12.46	12.51	12.75	12.82
	黑龙江 Heilongjiang	7.40	7.24	6.83	8.08	8.56	9.13	9.49	9.09	11.48
	安徽 Anhui	7.87	7.78	8.16	8.28	8.07	8.47	8.64	8.94	10.04
	江西 Jiangxi	6.66	6.88	7.27	7.31	7.12	7.53	7.68	7.65	8.18
	河南 Henan	9.02	9.11	10.32	10.73	10.47	10.57	10.45	10.75	12.18
	湖北 Hubei	7.07	7.70	7.83	7.79	7.80	8.00	8.23	8.02	8.69
	湖南 Hunan	7.43	7.46	7.99	7.90	7.93	8.10	7.92	8.00	8.30
	平均 Mean	7.86	8.17	8.58	8.69	8.55	9.04	9.16	9.18	10.06
西部 Weast	内蒙古 Inner Mongolia	6.30	6.36	6.67	7.47	7.01	7.81	7.94	7.33	9.55
	广西 Guangxi	13.43	13.70	16.67	19.35	17.09	17.95	18.41	17.08	17.45
	重庆 Chongqing	6.55	6.98	6.27	7.41	7.30	7.01	7.05	7.23	6.92
	四川 Sichuan	7.90	8.02	7.31	8.05	8.18	8.18	8.30	8.48	8.98
	贵州 Guizhou	6.19	6.67	6.80	6.29	6.09	5.68	5.69	5.72	5.39
	云南 Yunnan	8.30	8.04	8.06	8.20	7.39	8.02	8.01	7.67	8.37
	西藏 Tibet	5.21	5.16	5.12	4.83	4.15	3.79	3.46	3.26	3.49
	陕西 Shaanxi	6.31	6.83	7.33	7.33	7.03	7.27	6.99	7.03	6.97
	甘肃 Gansu	4.43	4.55	4.33	4.23	4.20	4.33	4.27	4.07	4.81
	青海 Qinghai	5.45	5.69	5.18	6.29	5.71	5.42	5.03	4.78	4.71
	宁夏 Ningxia	6.15	5.80	6.20	5.95	6.06	6.39	6.68	6.64	6.85
	新疆 Xinjiang	8.27	8.33	8.32	9.19	8.96	9.97	8.82	8.52	9.71
平均 Mean		7.04	7.18	7.35	7.88	7.43	7.65	7.55	7.32	7.77

鉴于数据的可获得性, 未包括港澳台地区。In view of the availability of the data, Hong Kong, Macao and Taiwan are not included.

趋势, 且中部地区基尼系数相对其他地区较低。西部地区基尼系数总体呈波动上升的态势。综合而言, 全国种植业碳补偿率的不平衡性具有扩大的趋势, 东、西部地区相对差异扩大, 中部地区相对差异无明显变化。因此, 在提高种植业碳补偿率的过程中, 应该重视区域协调问题。

2.2.2　地区间差异

图 2 描绘了地区之间的基尼系数的变化态势。不难看出, 东、中、西三大地区之间两两组成 3 对地区间差异曲线, 种植业碳补偿率地区之间的差距明显。从差异大小来看, 东部—西部地区间种植业碳补偿率差距最大, 而且研究期内仅其地区间基尼系数每年大于全国整体水平, 其平均基尼系数为 0.190; 从 2006 年开始, 中部—西部省际种植业补偿率相对差距次之, 其平均基尼系数为 0.159; 东部—中部省际种植业补偿率相对差距最小, 其平均基尼系数为 0.155。从演变趋势来看, 东部—西部、东部—中部地区之间相对差异增加, 增幅分别为 26.67% 和 16.54%, 中部—西部地区之间相对差异缩小, 缩减幅度为 7.02%, 表明我国地区间种植业低碳发展并不均衡。

2.2.3　地区相对差异与贡献率

将全国差距进行分解, 可以明晰地区差距的源头及贡献率, 如图 3 所示。研究期内, 种植业碳补偿

表 3 2002—2018 年中国种植业碳补偿率基尼系数及其分解

Table 3 Gini coefficient and decomposition of carbon compensation rate of crops production of China from 2002 to 2018

年份 Year	全国 Nation	地区内 Within the region			地区间 Interregional			贡献率 Contribution rate (%)		
		东部 East	中部 Central	西部 West	东部—中部 East-Central	东部—西部 East-West	中部—西部 Central-West	地区内 Within the region	地区间 Interregional	超变密度 Hypervariable density
2002	0.144	0.136	0.100	0.154	0.133	0.150	0.171	32.045	32.105	35.851
2003	0.147	0.151	0.100	0.144	0.145	0.157	0.179	31.603	36.380	32.017
2004	0.151	0.157	0.089	0.154	0.144	0.160	0.158	31.570	34.580	33.850
2005	0.151	0.153	0.102	0.148	0.150	0.157	0.165	31.339	38.818	29.843
2006	0.165	0.148	0.106	0.183	0.147	0.171	0.173	31.543	35.130	33.327
2007	0.177	0.167	0.094	0.205	0.152	0.196	0.166	32.352	33.207	34.441
2008	0.173	0.152	0.096	0.206	0.146	0.188	0.162	32.150	34.446	33.404
2009	0.168	0.150	0.083	0.202	0.139	0.184	0.144	32.065	33.719	34.216
2010	0.171	0.156	0.086	0.199	0.147	0.185	0.161	31.469	37.530	31.001
2011	0.182	0.157	0.089	0.223	0.147	0.197	0.150	31.639	35.003	33.359
2012	0.179	0.155	0.088	0.220	0.146	0.195	0.149	31.683	35.681	32.636
2013	0.189	0.164	0.094	0.233	0.154	0.206	0.149	31.779	34.741	33.480
2014	0.190	0.168	0.086	0.224	0.162	0.203	0.149	30.826	39.833	29.341
2015	0.190	0.177	0.090	0.218	0.166	0.204	0.147	30.767	39.627	29.606
2016	0.191	0.180	0.091	0.218	0.164	0.206	0.160	30.872	37.040	32.087
2017	0.217	0.224	0.111	0.218	0.203	0.228	0.160	29.702	40.566	29.732
2018	0.215	0.233	0.096	0.227	0.196	0.236	0.156	30.693	34.784	34.523
均值 Mean	0.176	0.166	0.094	0.199	0.155	0.190	0.159	31.417	36.070	32.513

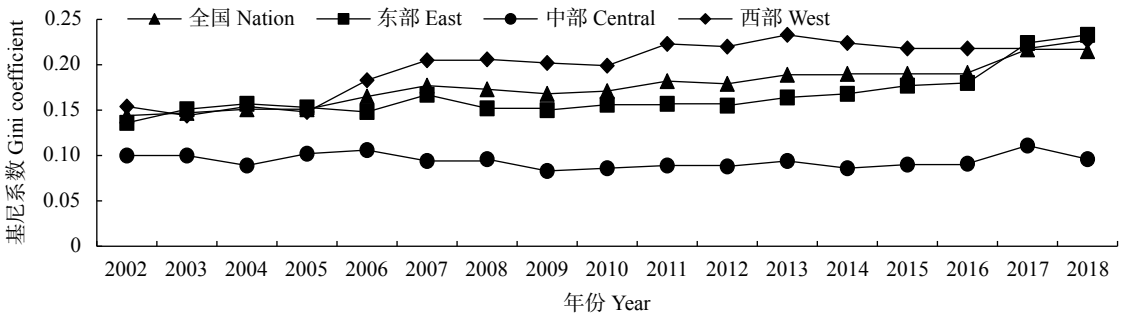

图 1 2002—2018 年中国种植业碳补偿率地区内基尼系数的变化趋势

Fig. 1 Trends in the Gini coefficient within the region of carbon compensation rate of crops production in China from 2002 to 2018

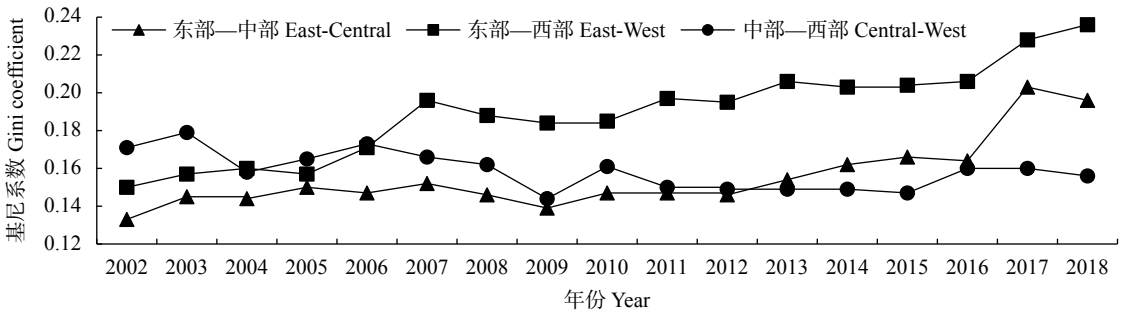

图 2 2002—2018 年中国种植业碳补偿率地区间基尼系数变化趋势

Fig. 2 Trends in interregional Gini coefficients of carbon compensation rate of crops production in China from 2002 to 2018

率地区间差距产生的内在动因发生了变化。从图形的特征可知, 地区内贡献率基本稳定, 超变密度贡献率整体波动下降。地区间贡献率随时间上下波动, 总体呈上升态势, 且占据主导地位, 说明地区间差距是造成种植业碳补偿率差异的主要原因。

2.3 种植业碳补偿率动态演进

本文绘制出 2002 年、2008 年、2013 年和 2018 年全国及东、中、西部区域种植业碳补偿率核密度图, 考察种植业碳补偿率随时间动态演进过程, 详见图 4。

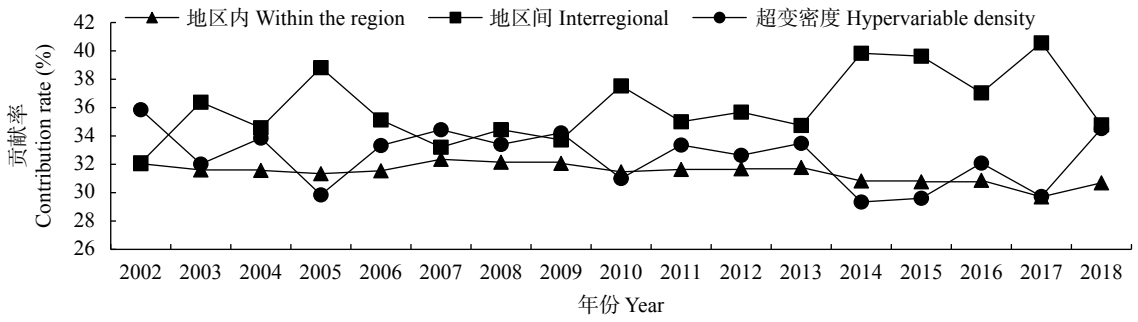

图 3　2002—2018 年种植业碳补偿率地区差距来源贡献率变化趋势

Fig. 3　Trends in the contribution rate in sources of regional disparities of the planting industry from 2002 to 2018

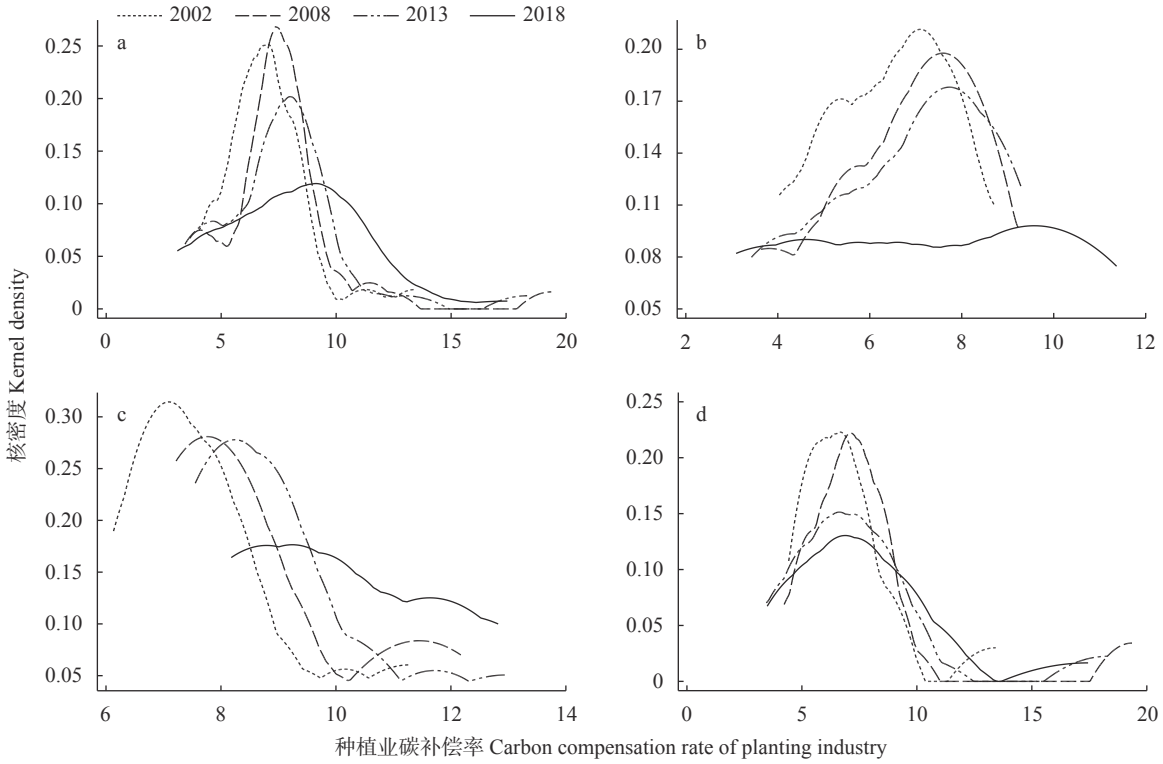

图 4　2002—2018 年全国 (a) 及东部 (b)、中部 (c)、西部 (d) 地区种植业碳补偿率核密度变化

Fig. 4　Changes of kernel density of carbon compensation rate of crops prodcution of the nation (a), and east (b), central (c), and west (d) regions of China from 2002 to 2018

从图 4a 中可知, 2002—2018 年全国种植业碳补偿率的核密度曲线逐渐右移, 表明各省种植业碳补偿率水平逐渐增大, 主峰峰值呈先上升后下降态势。具体而言, 2002—2008 年主峰峰值上升, 表明各省种植业碳补偿率绝对差距有所增大; 2008—2018 年主峰峰值下降, 表明各省种植业碳补偿率绝对差距有所减小。从曲线形态来看, 右拖尾特征明显, 说明碳补偿率较高的省份有所增多。

2002—2018 年东部地区核密度曲线逐渐右移, 表明东部各省种植业碳补偿率在逐渐上升 (图 4b)。主峰峰值逐渐下降, 表明 2002—2018 年东部地区各省种植业碳补偿率绝对差距有所减少。从波峰来看, 东部地区种植业碳补偿率从“双峰”逐渐变为“单峰”, 表明东部地区种植业碳补偿率逐渐由两极分化变为单极化。中部地区核密度曲线逐渐右移, 表明中部各省种植业碳补偿率在逐渐上升 (图 4c)。同时, 主峰峰值逐渐下降, 表明中部各省种植业碳补偿率绝对差距有所减小。从曲线形态来看, 右拖尾特征明显, 说明省域种植业碳补偿率多数处在低值, 少数地区处于高值且这少数高值地区存在显著的地区差异。西部地区核密度曲线基本未移动, 表明西部各省种植业碳补偿率较为稳定, 变化不大 (图 4d)。同时, 2008—2018 年主峰峰值逐渐下降, 表明 2008—2018 年西部地区各省种植业碳补偿率绝对差距有所减少。从曲线形态来看, 右拖尾特征同样明显, 说明西部地区碳补偿率高值省份仍在增加。

2.4 种植业碳补偿率收敛性分析

2.4.1 σ 收敛性检验

依据式 (17), 测算出 2002—2018 年全国及东、中及西部区种植业碳补偿率的 σ 值, 如表 4 所示。整体来看, 2002—2018 年我国种植业碳补偿率的 σ 值总体呈现上升态势, 说明中国各省份之间种植业碳补偿率的增长存在 σ 发散态势, 随着时间推移内部差异不断增大。从三大地区来看, 东部和西部地区种植业碳补偿率的 σ 值呈不断上升的变化趋势, 表明种植业碳补偿率存在发散现象。中部地区即使存在一定幅度的波动, 但长期来看变化不大，内部差异较为稳定。

2.4.2 绝对 β 收敛

式 (18) 检验了全国及东、中、西部地区的绝对 β 收敛情况。表 5 显示, 全国、中部及西部地区的系数 β 均在 P<1% 水平显著为负, 东部地区在 P<5% 水平显著为负。这说明无论是全国还是三大地区层面种植业碳补偿率均具有显著的绝对 β 收敛, 也表明种植业碳补偿率较低的省份能够追赶上较高的省份。随时间推进, 各省份增速逐渐趋同。从收敛速度来看, 中部地区种植业碳补偿率收敛程度最高, 东部种植业碳补偿率收敛程度最低。

2.4.3 条件 β 收敛

进一步, 基于式 (19) 检验了全国及东、中、西部地区是否存在条件 β 收敛。表 6 显示, 对主要变量进行控制后, 全国及三大地区的系数 β 均在 P<1% 水平显著负向通过。这表明种植业碳补偿率条件 β 收敛在全国及三大区域范围内均存在, 也表明各地区种植业碳补偿率的增长呈现趋同态势。同时, 农业财政支出、城镇化率、产业结构、农户文化程度、农业机械总动力、劳动力非农转移、农业经营规模、农业经济发展水平对其影响存在明显的异质性。

农业财政支出仅对东部种植业碳补偿率增长的影响显著为正 (P<5%), 对全国及中、西部地区的影响不显著。农业财政支出不断促进农业基础设施的完善及农业技术水平的改进, 从而提升农业生产效率, 有利于减少农业生产中的碳排放。产业结构显著促进全国和中部地区种植业碳补偿率的增长 (P<1%), 对东部和西部地区影响不显著, 中部地区主要种植粮食作物, 产业结构变迁有利于农业碳减排。

表 4 2002—2018 年中国不同区域种植业碳补偿率 σ 收敛系数

Table 4 σ convergence coefficient of carbon compensation rate of crops production in different regions of China from 2002 to 2018

年份 Year	全国 Nation	东部 East	中部 Central	西部 West
2002	0.2805	0.2533	0.2069	0.3323
2003	0.2805	0.2847	0.2076	0.2953
2004	0.2907	0.2897	0.2023	0.3296
2005	0.2983	0.2824	0.2262	0.3277
2006	0.3412	0.2776	0.2292	0.4307
2007	0.3832	0.3113	0.1938	0.4936
2008	0.3767	0.2938	0.2054	0.4924
2009	0.3544	0.2824	0.1666	0.4685
2010	0.3507	0.2942	0.1746	0.4526
2011	0.3647	0.2994	0.1880	0.4839
2012	0.3633	0.2920	0.1849	0.4809
2013	0.3807	0.3074	0.1991	0.5057
2014	0.3834	0.3089	0.1776	0.5034
2015	0.3731	0.3294	0.1833	0.4743
2016	0.3746	0.3399	0.1901	0.4782
2017	0.4034	0.4217	0.2213	0.4598
2018	0.3968	0.4365	0.1854	0.4702

表 5 2002—2018 年中国种植业碳补偿率绝对 β 收敛结果

Table 5 Absolutely β convergence results of carbon compensation rate of crops prodcution in China from 2002 to 2018

变量 Variable	全国 Nation	东部 East	中部 Central	西部 West
β	-0.292^{***}(−7.931)	-0.140^{**}(−2.449)	-0.442^{***}(−5.060)	-0.400^{***}(−6.252)
常数项 Constant term	0.671^{***} (9.335)	0.319^{***} (3.011)	1.006^{***} (5.599)	0.927^{***} (7.410)
样本量 Sample size	496	176	128	192
R^2	0.0307	0.0648	0.1764	0.0568

、**和*分别表示在P<1%、P<5%和P<10%水平上显著。括号内为t统计量。, ** and * represent significance at the levels of P<1%, P<5%, and P<10%, respectively. Inside parentheses is the t statistic.

表 6　2002—2018 年中国种植业碳补偿率条件 β 收敛结果

Table 6　Conditions β convergence results of crops prodcution in China from 2002 to 2018

变量 Variable	全国 Nation	东部 East	中部 Central	西部 West
β	−0.413*** (−10.401)	−0.409*** (−5.813)	−0.791*** (−7.986)	−0.445*** (−6.496)
农业财政支出 Agricultural financial expenditure	0.003 (0.932)	0.012** (2.193)	−0.001 (−0.206)	−0.000 (−0.051)
城镇化率 Urbanization rate	−0.000 (−0.201)	0.003 (1.574)	0.000 (0.040)	−0.002 (−0.700)
产业结构 Industrial structure	0.009*** (3.395)	0.007 (1.015)	0.011*** (2.417)	0.003 (0.351)
农业机械化 Agriculture mechanization	0.012 (0.958)	0.027 (0.582)	0.075*** (3.387)	0.016 (0.786)
农户文化程度 Farmer education level	−0.112 (−0.933)	0.089 (0.367)	−0.010 (−0.036)	−0.058 (−0.285)
劳动力非农转移 Non-agricultural transfer of labor force	−0.047* (−1.669)	−0.134** (−2.467)	−0.014 (−0.484)	−0.051 (−0.602)
农业经营规模 Agricultural operation scale	0.247*** (5.381)	0.399*** (6.229)	0.078 (0.619)	0.125 (1.000)
农业经济发展水平 Agricultural economic development	−0.096** (−2.476)	−0.280*** (−3.841)	0.076 (0.988)	0.029 (0.289)
常数项 Constant term	1.908*** (5.236)	3.037*** (3.966)	0.552 (0.760)	1.306 (1.444)
样本量 Sample size	496	176	128	192
R^2	0.0193	0.0080	0.1068	0.0440

、**和*分别表示在P<1%、P<5%和P<10%水平上显著。括号内为 t 统计量。, ** and * represent significance at the levels of P<1%, P<5%, and P<10%, respectively. Inside parentheses is the t statistic.

农业机械化仅对中部地区种植业碳补偿率增长的影响显著为正 (P<1%), 对全国及中、西部地区的影响不显著。农业机械的大量使用能提高作物产出效率, 提高农资利用率, 有助于低碳农业发展。城镇化率、农户文化程度对全国及三大地区种植业碳补偿率的增长影响不显著。劳动力非农转移对全国 (P<10%) 和东部地区 (P<5%) 的种植业碳补偿率的增长率有显著的负向影响, 对中部和西部影响同为负向但不显著。众多农村劳动力向非农业部门转移会促使农户采取高碳生产行为, 不利于农业碳减排。农业经营规模对全国和东部地区的种植业碳补偿率的增长率有显著的正向影响 (P<1%), 对中部和西部影响同为正向但不显著。农业经营规模扩大, 规模效应不断凸显, 这能提高农资要素的利用率, 从而减少种植业碳排放。农业经济发展水平对全国和东部地区的种植业碳补偿率的增长率有显著的负向影响 (P<1%), 对中部和西部影响同为负向但不显著。这表明农业经济的迅速发展会使得碳排放增加, 与许多有关农业经济发展与面源污染的研究结果相符, 即我国目前仍处于环境库兹涅拐点左侧, 经济越发展环境越恶化。

3　结论及建议

本文利用 Dagum 基尼系数分解法、核密度以及收敛性分析方法, 使用 2002—2018 年中国 (不含港澳台地区)31 省面板数据, 对种植业碳补偿率地区差异、动态演进及收敛性进行检验与分析。结果显示: 1) 中国种植业碳补偿率相对差异扩大趋势明显, 从地区间差异来看, 东部—西部、东部—中部地区之间相对差异增加, 中部—西部地区之间相对差异减小, 且地区间差距是造成种植业碳补偿率差异的主要原因。2) 中国种植业碳补偿率整体呈逐年增大的变动态势。省域种植业碳补偿率逐年增加, 差异先减后增, 碳补偿率高值省份有所增多。其中, 东部和中部地区种植业碳补偿率逐渐上升, 但绝对差距有所减少。西部地区种植业碳补偿率较为稳定, 变化不大。3) 中国种植业碳补偿率存在明显的 σ 发散, 省域间不均衡。同时, 中国种植业碳补偿率绝对 β 收敛明显, 省域间的“追赶效应”显现。随着时间推移省域间种植业碳补偿率的增速趋同化, 并逐渐收敛于同一稳态均衡值。其中, 种植业碳补偿率在中部地区的收敛程度较高。此外, 中国种植业碳补偿率还存在显著的条件 β 收敛, 而且地区间碳补偿率增长的趋同态势明显。

对此, 本文主要启示如下: 第一, 基于东部地区种植业碳补偿率相对中西部地区较低的事实, 应对其进行重点关注, 结合东部地区实际情况充分借鉴中西部种植业碳补偿率高值地区丰富的低碳发展经验。同时, 各级政府在制定政策时应当考虑地区间的差异性, 深挖差异来源, 因地制宜, 及时制定多元化的符合本地区发展要求的策略, 推进农业生产由高碳逐步向低碳转变。第二, 种植业碳补偿率的地区差异制约了当前中国农业的低碳发展。因此, 为了有效缓解种植业碳补偿率地区差异及其扩大的演变态势, 应立足各地区的种植业低碳发展优势, 着力补齐地区种植业碳减排短板, 缩小种植业碳补偿率的地区差异, 促进农业低碳发展均衡化。第三, 在着力推进种植业低碳发展的过程中, 注重区域种植业碳补偿率水平的收敛特征。应当重点关注碳补偿率低值地区, 挖掘这些地区新的可能增长点。采取积

极的政策措施, 引导种植业碳补偿率低水平地区学习碳补偿率高水平地区的低碳发展方式, 以逐步赶上高水平地区。

参考文献 References

[1] 熊爱华, 丁友强, 胡玉凤. 低碳门槛下绿色创新补贴对全要素生产率的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(11): 2184−2195
XIONG A H, DING Y Q, HU Y F. Impact of low-carbon subsidies and green innovation on total factor productivity in view of the threshold effect of carbon emission reduction[J]. Resources Science, 2020, 42(11): 2184−2195

[2] 张金鑫, 王红玲. 中国畜牧业碳排放地区差异、动态演进与收敛分析——基于全国31个省(市)1997—2017年畜牧业数据[J]. 江汉论坛, 2020, (9): 41−48
ZHANG J X, WANG H L. Regional difference, dynamic evolutionary and convergence analysis on the Chinese animal husbandry—based on the animal husbandry data in 31 provinces from 1997 to 2007[J]. Jianghan Tribune, 2020, (9): 41−48

[3] 陈菡, 陈文颖, 何建坤. 实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 12−18
CHEN H, CHEN W Y, HE J K. Pathway to meet carbon emission peak target and air quality standard for ChinaFull text replacement[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(10): 12−18

[4] 胡志坚, 刘如, 陈志. 中国“碳中和”承诺下技术生态化发展战略思考[J]. 中国科技论坛, 2021, (5): 14−20
HU Z J, LIU R, CHEN Z. Strategic thinking on the ecological development of technology under China’s “carbon neutrality” commitment[J]. Forum on Science and Technology in China, 2021, (5): 14−20

[5] 谢淑娟, 匡耀求, 黄宁生. 中国发展碳汇农业的主要路径与政策建议[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 46−51
XIE S J, KUANG Y Q, HUANG N S. Main paths and policy proposals for the development of carbon-sinking agriculture in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(12): 46−51

[6] 杨滨键, 孙红雨. 低碳绩效测度与动态效应研究——以山东省种植业为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(3): 581−589
YANG B J, SUN H Y. Low carbon performance measurement and dynamic effects: A case study of the planting industry in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(3): 581−589

[7] 张金鑫, 王红玲. 环境规制、农业技术创新与农业碳排放[J]. 湖北大学学报: 哲学社会科学版, 2020, 47(4): 147−156
ZHANG J X, WANG H L. Analysis on environmental planning, agricultural technological innovation and agricultural carbon emission[J]. Journal of Hubei University: Philosophy and Social Science, 2020, 47(4): 147−156

[8] 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(7): 18−26, 110
ZHANG G S, WANG S S. China’s agricultural carbon emission: structure, efficiency and its determinants[J]. Issues in Agricultural Economy, 2014, 35(7): 18−26, 110

[9] 陈炜, 殷田园, 李红兵. 1997—2015年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 37−44
CHEN W, YIN T Y, LI H B. Spatiotemporal distribution characteristics of carbon emission from plant industry and the relationship with agriculture development in China from 1997 to 2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(2): 37−44

[10] 陈罗烨, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇时空演化特征分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 596−607
CHEN L Y, XUE L, XUE Y. Spatial-temporal characteristics of China’s agricultural net carbon sink[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(4): 596−607

[11] 李波, 张俊飚, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80−86
LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80−86

[12] 孙立成, 程发新, 李群. 区域碳排放空间转移特征及其经济溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 17−23
SUN L C, CHENG F X, LI Q. Characteristics and economic spillover effect of the regional carbon emissions transfer[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(8): 17−23

[13] 颜廷武, 田云, 张俊飚, 等. 中国农业碳排放拐点变动及时空分异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 1−8
YAN T W, TIAN Y, ZHANG J B, et al. Research on inflection point change and spatial and temporal variation of China’s agricultural carbon emissions[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(11): 1−8

[14] 梁青青. 我国农地资源利用的碳排放测算及驱动因素实证分析[J]. 软科学, 2017, 31(1): 81−84
LIANG Q Q. Study on the scale and factor decomposition of carbon emissions of agricultural land resource utilization in China[J]. Soft Science, 2017, 31(1): 81−84

[15] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国农业碳排放特征及影响因素研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(5): 56−62
HU W L, ZHANG J X, WANG H L. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emission in China[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(5): 56−62

[16] 程琳琳, 张俊飚, 田云, 等. 中国省域农业碳生产率的空间分异特征及依赖效应[J]. 资源科学, 2016, 38(2): 276−289
CHENG L L, ZHANG J B, TIAN Y, et al. The spatial variation characteristics and dependency of agricultural carbon productivity in China[J]. Resources Science, 2016, 38(2): 276−289

[17] 伍国勇, 孙小钧, 于福波, 等. 中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 46−57
WU G Y, SUN X J, YU F B, et al. Spatial correlation pattern and influencing factors of China’s crop production carbon productivity[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(5): 46−57

[18] 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[J]. 自然资源学报, 2016, 31(3): 468−476

SONG B, MU Y Y, HOU L L. Study on the effect of farm households' specialization on low-carbon agriculture: evidence from vegetable growers in Beijing, China[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 468−476

[19] 王钰乔, 濮超, 赵鑫, 等. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1800−1811
WANG Y Q, PU C, ZHAO X, et al. Historical dynamics and future trends of carbon footprint of wheat and maize in China[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1800−1811

[20] 尚杰, 杨滨键. 区域农业碳足迹动态影响效应研究——以潍坊市种植业为例[J]. 农村经济, 2020, (5): 75−82
SHANG J, YANG B J. The dynamic effect of regional agricultural carbon footprint: A case of Weifang' s planting industry[J]. Rural Economy, 2020, (5): 75−82

[21] 张灿强, 王莉, 华春林, 等. 中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应[J]. 资源科学, 2016, 38(4): 790−797
ZHANG C Q, WANG L, HUA C L, et al. Potentialities of fertilizer reduction for grain produce and effects on carbon emissions[J]. Resources Science, 2016, 38(4): 790−797

[22] 周迪, 郑楚鹏, 华诗润, 等. 公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 80−91
ZHOU D, ZHENG C P, HUA S R, et al. The potentialities and paths of China' s carbon emission reduction based on the coordination of fairness and efficiency[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 80−91

[23] 鲁丰先, 张艳, 秦耀辰, 等. 中国省级区域碳源汇空间格局研究[J]. 地理科学进展, 2013, 32(12): 1751−1759
LU F X, ZHANG Y, QIN Y C, et al. Spatial patterns of provincial carbon source and sink in China[J]. Progress in Geography, 2013, 32(12): 1751−1759

[24] 杨果, 陈瑶. 中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 171−176
YANG G, CHEN Y. China's agriculture carbon sink estimation and its coupling analysis with agricultural economy development[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(12): 171−176

[25] 田云, 张俊飚, 吴贤荣, 等. 中国种植业碳汇盈余动态变化及地区差异分析——基于31个省(市、区)2000—2012年的面板数据[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1885−1895
TIAN Y, ZHANG J B, WU X R, et al. Research on dynamic change and regional differences of China' s planting industry carbon sink surplus[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(11): 1885−1895

[26] 尚杰, 杨滨键. 种植业碳源、碳汇测算与净碳汇影响因素动态分析: 山东例证[J]. 改革, 2019, (6): 123−134
SHANG J, YANG B J. Estimation of carbon source and carbon sequestration in planting industry and dynamic analysis of influencing factors of net carbon sequestration: a case study of Shandong Province[J]. Reform, 2019, (6): 123−134

[27] 张巍. 陕西省重点生态功能区碳汇/碳源核算与生态补偿研究[J]. 生态经济, 2018, 34(10): 191−194
ZHANG W. The study of carbon sink and carbon source accounting and ecological compensation in key ecological functional areas of Shaanxi Province[J]. Ecological Economy, 2018, 34(10): 191−194

[28] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. 地理学报, 2014, 69(10): 1425−1437
ZHAO R Q, ZHANG S, HUANG X J, et al. Spatial variation of carbon budget and carbon balance zoning of Central Plains Economic Region at county-level[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(10): 1425−1437

[29] 赵荣钦, 刘英, 马林, 等. 基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1675−1687
ZHANG R Q, LIU Y, MA L, et al. County-level carbon compensation of Henan Province based on carbon budget estimation[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1675−1687

[30] 王刚, 张华兵, 薛菲, 等. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1170−1182
WANG G, ZHANG H B, XUE F, et al. Relations between land use carbon budget and economic development at county level in Chengdu City[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1170−1182

[31] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J/OL]. 生态学报, 2021(14): 1−11. [2021-05-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20210512.0920.036.html
WEI Y R, CHEN S L. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province[J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2021(14): 1−11. [2021-05-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20210512.0920.036.html

[32] 吴昊玥, 何艳秋, 陈文宽, 等. 中国农业碳补偿率空间效应及影响因素研究——基于空间Durbin模型[J]. 农业技术经济, 2020, (3): 110−123
WU H Y, HE Y Q, CHEN W K, et al. Spatial effect and influencing factors of China's agricultural carbon compensation rate based on spatial durbin model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2020, (3): 110−123

[33] 王梁, 赵杰, 陈守越. 山东省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹变化分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(7): 133−141
WANG L, ZHAO J, CHEN S Y. Analysis of ecosystem carbon sources/sinks and carbon footprint in farmland ecosystem of Shandong Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(7): 133−141

[34] DAGUM C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. Empirical Economics, 1997, 22(4): 515−531

[35] 刘帅. 中国经济增长质量的地区差异与随机收敛[J]. 数量经济技术经济研究, 2019, 36(9): 24−41
LIU S. Research on the regional differences decomposition and convergence mechanism of economic quality in China[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2019, 36(9): 24−41