



结构转型、技术进步选择对农业碳影子价格的影响

许标文, 王海平, 沈智扬

Impact of structural transformation, technological progress choice on agricultural carbon shadow price: An empirical analysis based on BP technology and a mediating effect model

XU Biaowen, WANG Haiping, and SHEN Zhiyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20220492>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

BP神经网络算法在河西绿洲玉米生产碳排放评估中的应用及算法有效性研究

Application and validity of BP neural networks on prediction of carbon emissions from corn production in Hexi Oasis
中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(8): 1100–1106

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

河南省农业生产碳汇的演变趋势及其集聚特征分析

Spatio-temporal evolution and agglomeration characteristics of agricultural production carbon sink in Henan Province
中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1283–1290

水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其机制的研究进展

The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: A review
中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 175–181

中国规模生猪养殖的绿色技术进步偏向

Biased green technology progress in China's scale pig breeding
中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(11): 1811–1822

华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价

Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean–summer maize cropping system in the North China Plain
中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 910–919



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20220492

许标文, 王海平, 沈智扬. 结构转型、技术进步选择对农业碳影子价格的影响——基于BP技术与FGLS模型的实证分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 241-252

XU B W, WANG H P, SHEN Z Y. Impact of structural transformation, technological progress choice on agricultural carbon shadow price: An empirical analysis based on BP technology and a mediating effect model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 241-252

结构转型、技术进步选择对农业碳影子价格的影响^{*}

——基于BP技术与FGLS模型的实证分析

许标文¹, 王海平¹, 沈智扬^{2**}

(1. 福建省农业科学院农业经济与科技信息研究所 福州 350003; 2. 法国科学经济与管理学院巴黎校区 巴黎 92044, 法国)

摘要: 通过经济结构转型和技术进步有效实施减排策略, 已经成为实现中国经济社会低碳转型发展的必然选择。基于数据包络分析(DEA)框架建模, 满足经济理论和物料守恒原则, 利用改进的By-production(BP)技术对1997—2020年我国31个省份农业碳影子价格进行了更加准确的测度, 并利用核密度分析了农业碳影子价格动态演变特征; 并采用可行广义最小二乘法(FGLS)模型考察结构转型、技术进步选择对农业碳排放影子价格的影响。结果表明: 1) 我国农业碳影子价格呈上升态势, 东部、中部和西部地区农业碳排放影子价格分别为7759.69元·t⁻¹、4192.35元·t⁻¹和3997.51元·t⁻¹, 且东、中、西部地区农业碳影子价格上升趋势依次降低。2) 我国农业碳影子价格核密度值有增加趋势; 东部地区农业碳影子价格核密度曲线出现较为明显的右移趋势; 中部地区农业碳影子价格核密度曲线呈现左移-右移趋势, 且区域间差异在变大; 西部地区农业碳影子价格核密度曲线呈现明显的向下、变宽趋势。3) 整体回归显示, 结构转型、劳动节约型技术进步显著提升了农业碳影子价格, 而资本深化抑制了农业碳影子价格提升, 经济发展水平、农业经营规模、城市化水平及对外开放水平等对农业碳影子价格也会产生重要影响。4) 东、中、西部地区部分样本回归显示农业碳影子价格影响因素有所差异, 结构转型在东部地区显著提升农业碳影子价格, 在西部地区却显著抑制了农业碳影子价格; 劳动节约型技术进步在东部抑制了农业碳影子价格, 而在西部显著提升农业碳影子价格; 资本深化在东、西部显著抑制农业碳影子价格, 在中部显著提升农业碳影子价格。为此, 提出持续推进产业结构转型、制定差异化绿色协调发展政策、适时建立农业碳排放交易市场等政策建议, 以促进农业低碳绿色高质量发展。

关键词: 结构转型; 技术进步; 农业碳排放; 影子价格; By-production技术

中图分类号: F323; X196

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Impact of structural transformation, technological progress choice on agricultural carbon shadow price: An empirical analysis based on BP technology and a mediating effect model^{*}

XU Biao wen¹, WANG Hai ping¹, SHEN Zhi yang^{2**}

(1. Institute of Agricultural Economy and Science Information, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 2. IÉSEG School of Management, Paris 92044, France)

* 国家自然科学基金项目(72104028)、福建省自然科学基金项目(2020J011375)和福建省农业科学院科技创新项目(CXTD0098)资助

** 通信作者: 沈智扬, 主要研究方向为效率与生产率估计。E-mail: z.shen@ieseg.fr

许标文, 主要研究方向为农业可持续发展。E-mail: 13596447@qq.com

收稿日期: 2022-06-27 接受日期: 2022-08-16

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (72104028), the Natural Science Foundation of Fujian Province (2020J011375) and the Science and Technology Innovation Program of Fujian Academy of Agricultural Sciences (CXTD0098).

** Corresponding author, E-mail: z.shen@ieseg.fr

Received Jun. 27, 2022; accepted Aug. 16, 2022

Abstract: The effective implementation of emission reduction strategies through economic structural transformation and technological progress has become an inevitable choice for achieving low-carbon economic and social transformation and development in China. Considering that the disposability assumption of the shadow price calculation method is inconsistent with the realistic theory in the existing literature, a new calculation method for the carbon shadow price based on the data envelopment analysis (DEA) framework modeling and satisfying the principles of economic theory and material conservation was applied, in which the expected output production sub-technology and the undesired output production sub-technology are linked according to the generation relationship of pollutants. Improved By-production technology was used to accurately measure the agricultural carbon shadow price in 31 provinces from 1997 to 2020, and kernel density was used to analyze the dynamic evolution characteristics of agricultural carbon shadow prices. A feasible generalized least squares (FGLS) model was used to examine the impact of structural transformation and technological progress choices on the shadow price of agricultural carbon emissions. The results showed that: 1) the shadow price of agricultural carbon price showed an increasing trend, which was 7759.69 $\text{¥}\cdot\text{t}^{-1}$ in the east region, 4192.35 $\text{¥}\cdot\text{t}^{-1}$ in the central region, and 3997.51 $\text{¥}\cdot\text{t}^{-1}$ in the west region, and the rising rates decreased in that order. 2) Kernel density analysis revealed that the kernel density value of the agricultural carbon shadow price had an increasing trend. The kernel density curve in the east region was right-shifted, in the central region left-right shifted with increasing regional differences, and in the west region it was downward and widened. 3) The overall regression analysis showed that the shadow price of agricultural carbon was significantly increased by structural transformation and labor-saving technological progress but that this increase was inhibited by capital deepening. Meanwhile, the level of economic development, the scale of agricultural operations, urbanization, and the level of opening up all played important roles in the agricultural carbon shadow price. 4) The regional regression analysis results highlighted that the influencing factors of agricultural carbon shadow prices differed in different regions. Structural transformation significantly increased the carbon shadow price in the east region but significantly inhibited it in the west region. Labor-saving technological progress reduced the carbon shadow price in the east region while significantly increasing it in the west region. Therefore, it is necessary to promote the transformation of the industrial structure, formulate differentiated green and coordinated development policies, and establish an agricultural carbon emissions trading market to promote low-carbon, green, and high-quality agricultural development.

Keywords: Structural transformation; Technological progress; Agricultural carbon emissions; Shadow prices; By-production technology

全球气候变化成为世界范围内的紧迫问题,近几十年来经济一体化和技术快速发展持续导致农业排放量增加,农业碳排放已占了人类活动碳排放的1/4。中国作为世界上最大的碳排放国和最大的发展中国家,受人口增长、饮食结构改善等因素影响,预计2050年农业碳排放将增加到2413.64 Mt C,年均增长5.87%^[1]。这将不利于中国实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和目标。为此中国政府致力于推动农业绿色发展,采取了减排降碳、固碳增汇等多种碳减排策略,农业碳排放效率取得了较大提升。然而碳排放效率提升是以高于经济增速的减排成本投入实现的^[2],鲜有文献关注碳减排策略的成本问题。在保障农产品有效供给和低碳发展的前提下,中国农业碳减排成本呈逐渐上升趋势^[3],为此需要科学评估现有农业碳减排策略。在文献中,已经开发了多种减排成本测算方法,其中影子定价方法广受欢迎。非期望产出的影子价格直接反映了碳减排政策的潜在空间和减排成本,已成为碳税、碳排放权交易市场与其他碳价格相关的授权或补贴等政策工具的参考价格^[4]。其中By-production (BP)技术是基于数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)框架建模、满足物料守恒原则的环境生产技术,基于BP技术估

算的影子价格和环境绩效文献中得到广泛应用^[5-6],可为中国碳减排监管提供循证指南。

“十四五”时期,我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、推进经济社会发展全面低碳转型的关键时期。无疑,推动经济结构转型和技术进步是落实“双碳”战略部署、实现我国经济社会低碳转型发展的必然选择^[7]。结构转型影响着产业部门间生产要素流动,要素动态流动过程中不断涌现新技术和组织,使得持续的结构变化比固定结构的经济产生更低的环境破坏^[8]。已有文献证实工业化、城市化已成为碳排放的主要催化剂,但它们的关系在经济发展的不同阶段存在差异^[9]。我国经济结构优化调整对碳排放绩效总体上产生了“结构红利”^[7],工业化被证实是碳排放增长的重要因素,原媛等^[10]指出产业结构合理化水平提升抑制了碳排放,产业结构高度化则促进了碳排放,且产业高度化总体上处于“倒U型”曲线左侧。作为承载现代产业部门的城市发展对碳排放的影响也已经跨过“倒U型”曲线的拐点^[11]。同时,技术进步被认为是碳减排的重要途径。林毅夫新结构经济学理论认为一个地区最适宜的技术结构内生决定于该区域要素禀赋结构,因此不同技术进步选择对碳排放

影响存在非线性关系。Churchill等^[12]研究发现发达国家研发强度与二氧化碳排放之间的关系在很大程度上为负相关; 佟新华等^[13]则基于34个不同工业化阶段国家数据发现技术因素对碳排放变动贡献度由工业化阶段、后工业化阶段、工业化中期-后期阶段国家依次变小。何彬等^[14]研究发现原始创新增加了碳排放, 模仿创新对碳减排效果较好, 且对知识密集型、资本密集型和劳动密集型制造业碳排放强度存在着显著的行业差异^[15]。

农业是碳排放主要组成部门, 结构转型、技术进步对农业碳排放也有重要影响。伴随着结构转型, 农业经济增长仍旧是农业碳排放增加的主要驱动力^[16]。同时, 农户会将先进的技术嵌入生产环节。但是, 技术进步并不总是有利于农业碳减排。李成龙等^[17]指出农业机械化水平促进了农业碳排放强度的增加, 农业种质创新则显著降低了农业碳排放强度。陈银娥等^[18]则指出农业机械化推广弥补了劳动力的短缺, 有利于促进农业产业升级、减少碳排放, 但由于农业机械化推广尚有较大发展空间^[19], 随之而增加的农业能源碳排放会呈现回弹效应^[20]。此外, 我国农业劳动和资本配置扭曲, 造成了附加在农业机械、生物技术等要素上的资本投入不能与现有劳动要素质量完全匹配, 不利于降低农业碳排放。因此, 在我国经济发展、农业要素禀赋结构存在异质性条件下, 结构转型、农业技术进步选择与农业碳排放之间呈现出复杂的关联。

综上所述, 有关结构转型、技术进步对碳排放量的影响已有较为丰富的研究成果, 但尚缺乏碳影子价格的深入研究。通常来说, 当地区进行环境治理的时候, 碳排放量会减少, 环境状况会变得越来越好, 碳影子价格也会随之升高, 减排成本会越来越大^[21]。此外, 碳排放量直接影响了碳排放强度, 而碳影子价格随排放强度的下降呈指数级上升^[22]。因此, 影子价格可作为减排成本的重要参考指标, 对农业碳影子价格的研究更易于探究影响农业碳减排策略的外部因素。He等^[23]证实了欠发达地区较发达地区的农业碳影子价格更容易受到经济发展水平的影响, 吴贤荣等^[24]也证实了经济发展水平、农业产业结构对基于影子价格、排放强度构建的碳减排潜力有显著正向作用。何培培等^[25]测算了基于农业污染物影子价格的农业低碳效率并分析其影响因素, 得出农业经济发展水平、农业规模化水平对农业低碳效率幻觉程度分别具有负向、正向影响。然而这些文献中影子价格测算方法主要基于弱可处置性假设,

而弱可处置性假设意味着减少非期望产出往往伴随期望产出的损失, 且不满足物料守恒原则。另外, 它们往往假设碳影子价格与社会经济变量之间的关系是线性的, 这一假定可能是不成立的, 特别是在长面板数据中表现尤为明显, 那么样本之间可能存在组间异方差、组间同期相关和组内自相关等问题。当前, 我国正处于经济高质量发展转型时期, 结构转型推动生产要素不断向生产率高的产业部门流动时, 也加速了其在产业部门内部的流动。这促进了生产要素合理配置的同时, 也使得农业生产呈现劳动节约型和“资本深化”倾向^[26]的特征。因此, 关注结构转型对农业生产要素的影响以及要素禀赋变化下不同技术进步选择, 清晰地了解结构转型、技术进步选择对碳影子价格的影响, 由此洞察二者是如何作用到农业碳减排成本, 并推动不同地区适时对农业碳减排政策进行调整, 有助于中国走向农业绿色低碳发展道路。

鉴于此, 本文从以下2个方面对现有研究进行拓展和完善: 1) 通过污染物的生产关系将期望产出生产子技术和非期望产出生产子技术联系起来, 采用改进的BP技术对我国农业碳影子价格进行更加准确的测算, 提供与经济理论和物料守恒原则相一致的影子价格估计; 2) 考虑组内自相关、同期相关和组间异方差等问题后, 利用可行的广义最小二乘法(feasible generalized least squares, FGLS)模型全面考察结构转型、技术进步选择对农业碳影子价格的影响方向和影响程度, 进而明晰碳减排成本的影响因素, 以期为农业产值与低碳发展的平衡取舍提供更切实的碳减排政策调整依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 方法与模型

1.1.1 碳影子价格测算方法

1.1.1.1 改进的BP技术

生产技术通常可以用生产集来表示。在生产可能性集合中, 假设清洁投入 x^c 和致污投入 x^p 都会产生期望产出 y^m , 致污投入 x^p 会产生非期望产出 z^d 。非期望产出影子价格可以衡量非期望产出下降而导致的期望产出损失^[27]。为了准确评估非期望产出(如污染)对经济增长的影响, 学者们对非期望产出提出了强可处置性、弱可处置性及弱G可处置性假设。Murty等^[28]指出上述可处置性假设代价高昂, 提出了满足物料守恒原则的BP技术。BP技术不是把弱可处置性强加于期望产出和非期望产出之中, 而是通

过期望产出生产子技术和非期望产出生产子技术的交集来刻画生产关系。在这样的生产关系下,期望产出生产子技术 T_1 是将清洁投入与致污投入转化为期望产出的模型,非期望产出生产子技术 T_2 是将致污投入转化为非期望产出的模型。两个子技术受凸性、封闭性、投入和产出的可处置性等公理约束,这两种子技术的交集被称为 BP 技术。根据 Murty 等^[28]研究,BP 技术被定义为:

$$T_{BP} = T_1 \cap T_2 = \{(x^n, x^p, y^m, z^j) \in R_+^{N+P+M+J} : (x^n, x^p) \text{ 生产 } y^m; x^p \text{ 生产 } z^j\} \quad (1)$$

$$T_1 = \{(x^n, x^p, y^m) \in R_+^{N+P+M} | f(x^n, x^p, y^m) \leq 0\} \quad (2)$$

$$T_2 = \{(x^p, z^j) \in R_+^{P+J} | g(x^p) \leq z^j\} \quad (3)$$

式中: R_+ 是正数集合; $f(x^n, x^p, y^m)$ 与 $g(x^p)$ 是连续的可微的函数; N 、 P 、 M 、 J 分别代表清洁投入、致污投入、期望产出、非期望产出的数量。

Murty 等^[28] 提出了以产出为导向的 Färe R-Grosskopf-Lovell (FGL) 指数。假设 $\delta = \{\delta^m\}_{m=1}^M$ 和 $\theta = \{\theta^j\}_{j=1}^J$ 为测定特定变量无效率值的前提, FGL 可以被定义为:

$$D(x, y, z; g_x, g_y, g_z) = \frac{1}{2} \max_{\delta, \theta} \left\{ \frac{\sum_{m=1}^M \delta^m}{M} + \frac{\sum_{j=1}^J \theta^j}{J} \in R_+ : (x, y + \delta \otimes g_y, z - \theta \otimes g_z) \in T \right\} \quad (4)$$

式中: g_x 和 g_z 是期望产出和非期望产出的方向向量,可解释为向效率前沿移动期间期望产出和非期望产出做出的优化方向; \otimes 代表两个向量元素间的乘积。

尽管 FGL 指数给出了 BP 技术的计算框架,但忽略了 T_1 与 T_2 子技术之间的联系。由于 T_1 模型是自由处置、 T_2 模型是有成本的可处置性,只能通过减少致污投入来保障不降低期望产出的同时减少非期望产出。因此,传统 BP 模型估算的影子价格可能存在偏差^[29]。Shen 等^[30] 进一步通过考虑污染物的产生关系将 T_1 、 T_2 子技术联系起来,改进的 BP 技术如以下形式:

$$D(x, y, z; 0, g_y, g_z) = \max_{\delta, \theta, \lambda, \sigma} \frac{1}{2} \left\{ \sum_{m=1}^M \delta^m / M + \sum_{j=1}^J \theta^j / J \right\} \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{k=1}^K \lambda_k y_k^m \geq y_k^m + \delta^m g_y^m, \quad m = 1, \dots, M \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k x_k^n \leq x_k^n, \quad n = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k x_k^p \leq x_k^p, \quad p = 1, \dots, P \quad (8)$$

$$\lambda_k \geq 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K \sigma_k z_k^j \leq z_k^j - \theta^j g_z^j, \quad j = 1, \dots, J \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K \sigma_k x_k^p = \sum_{k=1}^K \lambda_k x_k^p, \quad p = 1, \dots, P \quad (11)$$

$$\sigma_k \geq 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K \sigma_k = 1 \quad (14)$$

$$\delta^m \geq 0, \quad \theta^j \geq 0 \quad (15)$$

式中: $(0, g_y, g_z)$ 是在投入水平保持不变的情况下与期望产出和非期望产出调整相关的非零方向向量; K 指决策单元个数,且 $k = 1, \dots, K$; λ_k 和 σ_k 分别是 T_1 和 T_2 的强度变量,意味着两种生产技术在满足限制条件的情况下都是独立建立的; $\sum_{k=1}^K \sigma_k x_k^p = \sum_{k=1}^K \lambda_k x_k^p$ 实现了子技术的联系。通过添加 $\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1$ 、 $\sum_{k=1}^K \sigma_k = 1$ 两个约束条件,表示 T_1 和 T_2 规模报酬可变;反之,去除这两个约束条件则表示 T_1 和 T_2 规模报酬不变。 δ^m 、 θ^j 是特定变量的无效率值,约束条件 $\delta^m \geq 0$ 、 $\theta^j \geq 0$ 表示政策制定者只对经济增长和环境改善的情况感兴趣。

改进的 BP 模型的对偶公式如下:

$$D(x, y, z; 0, g_y, g_z) = \min_{\pi_y, \pi_x, \pi_x^p, \omega_y^m, \omega_z^j, v_1, v_2} \left(\sum_{n=1}^N \pi_x^n x_k^n + \sum_{p=1}^P \pi_x^p x_k^p - \sum_{m=1}^M \pi_y^m y_k^m - v_1 + \sum_{j=1}^J \omega_z^j z_k^j + v_2 \right) \quad (16)$$

$$s.t. \sum_{m=1}^M \pi_y^m y_k^m - \sum_{n=1}^N \pi_x^n x_k^n - \left(\sum_{p=1}^P \pi_x^p x_k^p + \sum_{p=1}^P \omega_x^p x_k^p \right) + v_1 \leq 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (17)$$

$$\sum_{p=1}^P \omega_x^p x_k^p - \sum_{j=1}^J \omega_z^j z_k^j - v_2 \leq 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (18)$$

$$\pi_y^m g_y^m \geq 0.5 / M, \quad m = 1, \dots, M \quad (19)$$

$$\pi_z^j g_z^j \geq 0.5 / J, \quad j = 1, \dots, J \quad (20)$$

$$\pi_y^m \geq 0, \quad m = 1, \dots, M \quad (21)$$

$$\pi_x^n \geq 0, \quad n = 1, \dots, N \quad (22)$$

$$\pi_x^p \geq 0, p = 1, \dots, P \quad (23)$$

$$\omega_z^j \geq 0, j = 1, \dots, J \quad (24)$$

式中: π_x^p 、 π_x^p 、 π_y 分别是由子技术 T_1 建模得出的清洁投入、致污投入和期望产出的影子价格; ω_x^p 和 ω_z 分别是由子技术 T_2 建模得出的致污投入和非期望产出的影子价格; v_1 和 v_2 分别是可变规模收益的约束下 T_1 和 T_2 对偶变量。虽然两种子技术得到的影子价格值有可能不同,但由于(11)式约束条件考虑了不良输入的双重作用:一个是产生理想的输出(边际贡献 π_x^p),另一个是产生污染(边际贡献 ω_x^p),致污投入的影子价格 ω_x^p 在各子技术上是一致的。

1.1.1.2 影子价格计算

非期望产出的影子价格(csp)可以被定义为非期望产出相关的乘数($\omega_z^{CO_2}$)与期望产出相关的乘数 π_y^{GDP} 之比,在本文中表减少1单位农业碳排放损失的农业产值。公式为:

$$csp = \frac{\omega_z^{CO_2}}{\pi_y^{GDP}} \quad (25)$$

1.1.2 Kernel 密度估计方法

Kernel 密度(核密度)估计方法可测度观察变量的绝对差异。本文运用核密度估计考察农业碳影子价格的分布动态演进,不仅可以刻画其分布整体形态,而且通过不同时期的比较,还可以把握区域碳影子价格分布的动态特征。 $f(x)$ 是变量 X 的密度函数,如式(26)所示:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (26)$$

式中: N 为总样本数, h 为带宽, X_i 代表各地级市农业劳动生产率, x 是农业劳动生产率均值, $K(\cdot)$ 是Kernel 函数。

1.1.3 可行的广义最小二乘法

在对面板数据进行计量分析时,若随机误差项出现组间异方差、组间同期相关、组内自相关,则参数估计结果是有偏且不一致的。FGLS 将各截面个体的残差向量代入截面异方差的协方差矩阵,并利用广义最小二乘法(generalized least squares, GLS)对总体方差矩阵的分解,将回归残差转变成满足古典假定的残差,然后使用普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)进行回归。FGLS 可修正由于截面数据造成的异方差、同期相关和序列相关等问题,提高了参数估计的一致性和有效性。本文将探究结构转型、技术进步选择对碳影子价格的影响,构建

如下基本模型:

$$csp_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 st_{it} + \alpha_2 tp_{it} + \sum \beta_s control_{sit} + \mu_{it} + v_{it} \quad (27)$$

式中: i 、 t 分别表示地区、年份,csp 表示农业碳影子价格;st 表示结构转型指标,tp 为技术进步选择,control 表示控制变量, s 表示控制变量的个数; α_0 、 α_1 、 α_2 、 β_s 为待估计参数; μ_{it} 和 v_{it} 分别表示个体效应和随机效应,是随机误差项。在使用 FGLS 模型前,首先利用 Hausman 检验对模型进行固定与随机效应判别,然后依次采用 Wald 检验、 F 检验、Frees 检验验证模型是否存在组间异方差、组内自相关、组间同期相关。

1.2 变量选择

1.2.1 被解释变量

农业碳影子价格。采用 BP 技术测算,并对其进行对数化处理。投入指标选取土地、机械、劳动力、柴油、化肥、农药 6 个指标,其中土地、劳动力为清洁投入,机械、柴油、化肥、农药为致污投入;期望产出指标与非期望产出指标分别为农业总产值与碳排放量。农业碳排放源主要有 4 类:一是农资投入,包括化肥、农药、农膜、柴油使用及灌溉耗能而产生的碳排放;二是水稻种植产生的甲烷排放;三是耕作土壤产生的氧化亚氮排放;四是畜禽养殖产生的碳排放。碳排放量计算方法与排放系数参考 IPCC^[31]、李波等^[32]的研究,并进行加总得到。

1.2.2 解释变量

本文解释变量包括结构转型、技术进步选择等核心解释变量,还包括农业经营规模、经济发展程度、城市化水平、地区开放程度等控制变量。

结构转型(st)。采用产业结构合理化^[33]作为结构转型的代理指标,计算公式如下:

$$st = \sum_{i=1}^3 \frac{Y_i}{Y} \left| \frac{Y_i/L_i}{Y/L} - 1 \right| \quad (28)$$

式中: Y 表示产出, L 表示劳动力, i 表示产业部门。st 越小,表明产业间的经济发展越均衡。产业结构合理化既可以有效反映产业部门的一体化程度,又可以反映资源有效利用的程度。

技术进步选择(tp)。1) 借鉴杨海钰等^[34]用劳动生产率指数和土地生产率指数的比值来衡量劳动力节约型技术进步选择(ls)。用 Y 表示产出,用 L 表示劳动投入,用 A 表示土地投入。则 Y/L 表示劳动生产率, Y/A 表示土地生产率,则:

$$ls = \frac{(Y/L)_t / (Y/L)_0}{(Y/A)_t / (Y/A)_0} = (A/L)_t \times (L/A)_0 \quad (29)$$

如果 $Is > 1$, 代表机械技术增长路径, 说明主要依靠提高劳动生产率来实现产出增长; 如果 $Is < 1$, 代表生物化学技术增长路径, 说明主要依靠提高土地生产率来实现产出增长; 如果 $Is = 1$, 代表“中性”技术导向路径, 即同时依靠提高劳动生产率和土地生产率来实现产出增长。

2) 采用资本深化程度来衡量资本体现式技术进步选择^[35](cd), 并以人均资本存量为代表, 对其进行对数化处理。采用永续盘存法估算资本存量, 其折旧率取 5.42%。随着资本要素投入的增加, 资本深化是对“适宜技术”选择的结果, 存在资本体现式技术进步。历年来我国重视对农业投资, 农业资本深化水平也得到了不断提升。

3) 农业经营规模化水平 (sam)。采用各省份农作物播种面积/农业从业人员来表示。农业经营规模化水平可以表现农业生产的集约化程度。当农业经营规模达到适度规模经营时, 会增加技术投资、注重资源管理, 提升农业低碳发展水平; 规模较小时可能会使农户投入更多化肥、农药等要素, 增加碳排放^[25]。所以农业经营规模化水平总体上对于农业碳影子价格的影响是不确定的。

4) 经济发展水平 (ed)。利用人均 GDP 来衡量地区经济发展水平^[18], 并对其进行对数化处理。当经济体的碳影子价格较高时, 意味着需要减少 1 单位碳排放付出的代价更大, 为此这个地区减排负担较重。反之, 当经济体碳影子价格较低时, 意味着减排付出的代价相对较小, 可以承担更多的碳减排任务。

5) 城镇化水平 (ur)。用城镇人口占总人口的比重来衡量城镇化水平。城镇化在促进农业生产规模、提高开发强度的同时, 也带来了先进生产技术, 促进农业生产方式的转型, 进而促进了农业绿色发展^[17]。所以城镇化总体上对于农业碳影子价格的影响是不确定的。

6) 对外开放水平 (op)。采用各省份进出口总额占 GDP 比重来表示。对外开放水平的提高使市场竞争更加激烈, 预期会引导农业经营者进行绿色生产^[24]。

1.3 数据来源

本文研究样本为中国 31 个省份 (不包含港澳台地区), 时间跨度为 1997—2020 年。数据来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国农业年鉴》, 并将 31 个省份划分为东、中、西部区域。本文对 GDP 等价格变量以 1997 年为基期进行了价格平减。

2 结果与分析

2.1 农业碳排放影子价格的变化特征

2.1.1 农业碳排放影子价格时序特征

1997—2020 年 31 个省份农业碳排放影子价格呈上升趋势 (图 1)。东部、中部和西部地区农业碳排放影子平均价格分别为 7759.69 元·t⁻¹、4192.35 元·t⁻¹ 和 3997.51 元·t⁻¹, 表明东部地区农业碳排放影子价格高于中西部地区, 且西部地区减排量具有最低成本。不同地区碳影子价格随时间变化的趋势存在较大差异, 东部地区农业碳影子价格上升趋势明显高于全国上升趋势, 中部、西部农业碳影子价格上升趋势低于全国上升趋势。这一定程度上反映了随时间的变化, 我国农业环境得到改善的同时中、西部环境污染治理难度加大。

2.1.2 农业碳影子价格动态演进特征

进一步利用核密度曲线分析碳影子价格的动态演进特征。选取 1997 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年作为考察年份, 结果如图 2 所示。

全国层面来看, 1997 年以来, 农业碳影子价格核密度曲线呈现向下、向右移动趋势, 曲线右移表明农业碳影子价格期望值在增加, 下移表明农业碳影子价格保持上升趋势。1997—2010 年间, 核密度曲线向右、向下趋势明显。这表明农业碳影子价格在这段时间内增加明显, 且省际间差异比以前更大。2010—2020 年间, 核密度曲线右移显著、波峰呈波动式下降。尤其是 2020 年, 核密度曲线右侧呈现右拖尾现象, 表明高农业碳影子价格概率密度有增加趋势。从形状变化来看, 波峰逐渐平缓, 变化区间明显增大, 这说明农业碳影子价格差异越来越大, 且 2005 年、2015 年农业碳影子价格出现了微弱的双峰之势。

分区域来看, 东部地区农业碳影子价格核密度曲线出现较为明显的右移趋势; 峰值在 1997—2010 年呈现波动式下降, 在 2010—2015 年呈现上升趋势, 而在 2015—2020 年则呈现出下移趋势; 2005 年、2015 年呈现较明显的双峰, 2020 年核密度曲线波峰更加平缓、呈现出“厚尾”现象。中部地区农业碳影子价格核密度曲线呈现左移—右移趋势; 1997—2005 年密度曲线出现多个波峰, 且峰值高于其他地区, 表明农业碳影子价格多级分化现象严重; 2010 年以来峰型由 2 个“尖峰”向“宽峰”转变, 波峰也呈现下移、右移趋势, 宽度也逐渐变大, 说明农业碳影子价格期望值在增加, 并保持上升趋势, 且区域间差异在变大。西部地区农业碳影子价格曲线呈现明显的向

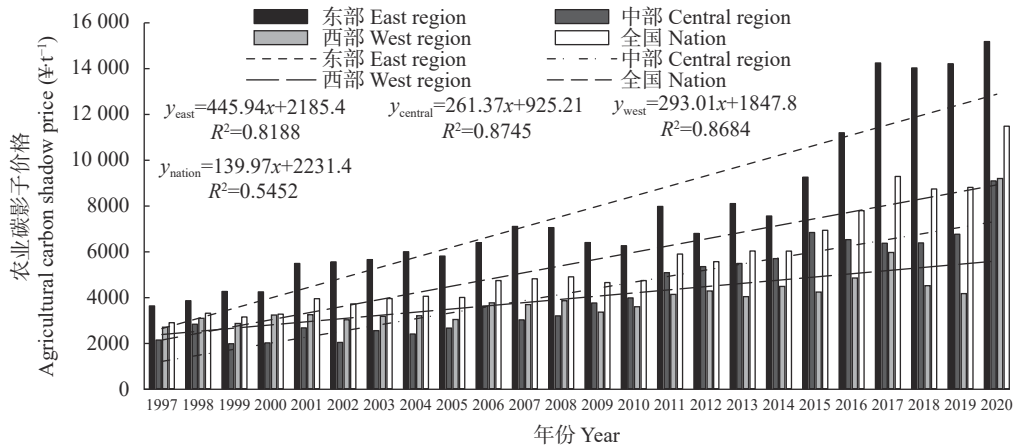


图 1 1997—2020 年东部、中部和西部地区及全国农业碳影子价格时序变化

Fig. 1 Time series of agricultural carbon shadow price in the east, central, west regions and whole nation from 1997 to 2020

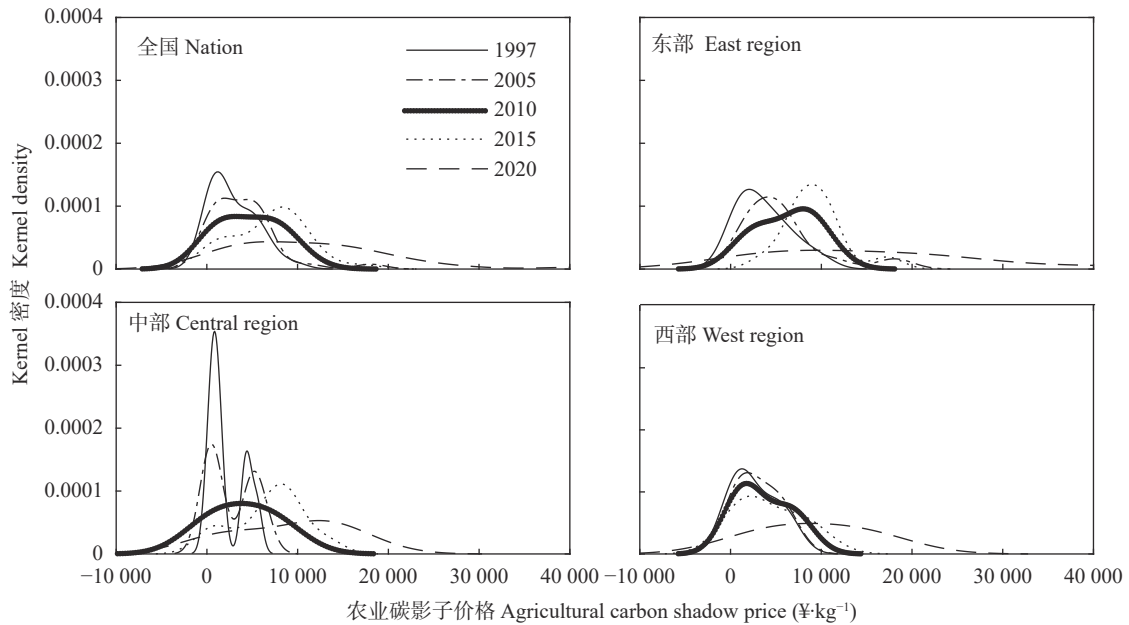


图 2 1997—2020 年农业碳影子价格 Kernel 核密度图

Fig. 2 Kernel density of agricultural carbon shadow price from 1997 to 2020

下趋势, 1997—2015 年右移趋势不明显, 但宽度略有变大, 这说明西部地区农业碳影子价格区域间差异在变大。同时, 西部地区核密度曲线宽度均比东部地区窄, 且峰值较东部、中部地区小, 说明西部地区农业碳影子价格处在较低水平。

2.2 结构转型、技术选择对农业碳排放影子价格的影响

2.2.1 农业碳排放影子价格的估计结果

经稳健的 Hausman 检验, 采用固定效应模型更优。进一步对随机扰动项进行检验, 发现全国样本数据在 1% 水平上存在组间异方差、组间同期相关, 在 5% 水平上存在组内自相关。因此, 选择全面 FGLS 回归方法进行估计。模型 (1)~(3) 分别用随机效应模

型、固定效应模型和全面 FGLS 模型进行回归, 表 1 展示了回归结果。

可以看出, 由于样本存在组间异方差、组内自相关与组间同期相关, 全面 FGLS 估计极大地改善了模型估计系数的显著性。模型 (3) 显示, 结构转型系数估计值为 0.454, 且在 1% 的显著性水平上通过了检验。这说明经济结构转型在促进生产要素由生产率低的产业流向生产率高的产业同时, 也促进了农业生产要素的合理配置和有效利用, 推动农业生产向低碳绿色方向发展, 环境状况会变得越来越好, 进而提升农业碳影子价格。技术进步选择基于要素禀赋条件。技术进步促使生产要素配置更加优化时, 会促进农业产业升级与转型, 进而改善了农业环境

表 1 结构转型、技术进步选择对农业碳影子价格影响效应的估计结果
Table 1 Estimation results of impact of structural transformation and technological progress choices on agricultural carbon shadow price

变量 Variable	符号 Symbol	模型1 Model 1	模型2 Model2	模型3 Model3
结构转型 Structural transformation	st	0.299* (0.171)	0.794*** (0.168)	0.454*** (0.021)
劳动力节约型技术进步 Labor-saving technological progress	ls	-0.366 (0.250)	-1.275*** (0.190)	0.455*** (0.067)
资本体现式技术进步选择 Capital-deepening technological progress	cd	0.778*** (0.144)	1.127*** (0.198)	-0.171*** (0.018)
农业经营规模化 Scale of agricultural management	sam	-0.139 (0.092)	-0.150 (0.100)	-0.084*** (0.016)
经济发展水平 Economic development	ed	0.038 (0.037)	-0.010 (0.019)	-1.096*** (0.086)
城镇化 Urbanization	ur	-0.543** (0.262)	-0.539** (0.234)	0.595*** (0.072)
对外开放 Opening-up	op	0.619 (0.476)	0.921* (0.512)	-0.597*** (0.041)
常数项 Constant	cons	0.120 (1.333)	-2.863 (1.941)	-289.916*** (20.564)
Wald test				54329.05***
F test				3.932**
Frees test				1.969***

模型(1)~(3)分别用随机效应模型、固定效应模型和全面可行的广义最小二乘法(FGLS)。*、**和***分别表示回归系数在 $P<10\%$ 、 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 水平显著,括号内为标准差。Model 1, model 2 and model 3 are random effects model, fixed effect model and full feasible generalized least squares (FGLS)。*, ** and *** denote the significance levels of the regression coefficients of $P<10\%$, $P<5\%$, and $P<1\%$, respectively. Data in parentheses are the corresponding standard deviations.

状况,农业碳影子价格会随之提高。反之,某项技术进步不能与劳动力、资本等生产要素相匹配,那么就不能改善农业环境状况,进而抑制碳影子价格提升。劳动节约型技术进步选择系数估计值为 0.455,且在 1% 水平上通过显著性检验。随着相对充裕、廉价的机械要素对劳动力的直接或间接替代,不仅缓解了劳动力刚性约束,更是促进了要素配置的优化,并加快了农业产业升级与转型^[17]。随农业机械的广泛使用,产业升级带来的减排效应大于农业机械能源消耗增加的碳排放,导致劳动节约型技术进步能有效提升碳影子价格。农业资本深化程度估计系数是-0.171,并在 1% 水平通过显著性检验。由于我国农业存在资本和劳动要素配置扭曲严重,并且资本不断向农业生产环节渗透,迫使分化的小农户表现出化肥、农药等致污要素过度投入,这使得资本深化对碳影子价格产生了负向作用。正如姚增福等^[36]指出,由于劳动要素质量与技术进步方向不匹配,资本深化降低了农业环境效率。

从控制变量来看,城镇化水平对农业碳影子价格在 1% 水平上显著为正,说明城市发展改善了区域农业生产要素资源配置,并促进农业绿色发展转型,进而提高农业碳影子价格。经济发展水平、农业经营规模、对外开放水平在 1% 水平上显著为负。对于我国人口众多的国家,经济发展水平的提升对农产品的需求还处在量的提升,这会加大农业碳排放,进而抑制碳影子价格。由于我国农业经营规模整体偏小,过度追求“产出导向型”“收入导向型”的短期目标,导致致污投入要素增加,进而抑制了碳影子价格。对外开放导致要素流动和要素边际报酬的差异

性,加快了农业劳动力、资本等要素流出,并对农业生产产生了虹吸效应,促使在农业生产中加大了对机械、化肥等致污投入,进而抑制了碳影子价格。

2.2.2 农业碳影子价格影响因素的空间差异

由于地理位置、要素禀赋以及经济条件差异等原因,结构转型、技术进步偏向与农业碳影子价格之间的关系在不同省份之间可能存在差异。检验结果显示,东、中、西部样本数据在 1% 水平上均存在组间异方差、组间同期相关。因此,采用 FGL 方法对东部、中部、西部地区样本数据进行估计。如表 2 所示,模型(4)~(6)分别是东部、中部、西部地区回归结果。

从核心解释变量来看,结构转型对碳影子价格估计系数在东、中部地区均在 1% 水平上显著为正,在西部地区在 1% 水平上显著为负。这说明东部、中部地区结构转型在促进要素向高生产效率部门转移同时也促进农业产业转型升级,进而促进了碳影子价格提升。由于东部、中部地区经济较为发达,承载了较多农业劳动力转移、先进技术应用以及相应生产要素配置调整,促进了农业生产要素的合理配置和有效利用,尤其是东部地区在地理条件、资源禀赋等方面的优势,使得东部地区较中部地区结构转型更能促进碳影子价格提升。而西部地区欠发达地区省份较多,并且农业生产受自然条件制约较多,经济结构转型促使了优质农业劳动力、资本等要素单向流向城市部门,致使农业成为高投入、高消耗、资源转化率低的产业,加剧了农业环境状况,结构转型对农业碳影子价格起到了抑制作用。要素禀赋差异也使得技术进步选择在东部、中部、西部

表 2 东、中、西部地区农业碳影子价格影响因素分析
Table 2 Analysis of influencing factors of agricultural carbon shadow price in eastern, central and western regions

变量 Variable	符号 Symbol	模型4 Model 4	模型5 Model 5	模型6 Model 6
结构转型 Structural transformation	st	1.496*** (0.197)	0.368*** (0.164)	-0.293*** (0.064)
劳动力节约型技术进步 Labor-saving technological progress	ls	-0.483*** (0.336)	0.116*** (0.016)	1.986*** (0.407)
资本体现式技术进步选择 Capital-deepening technological progress	cd	-0.142*** (0.039)	0.027*** (0.133)	-0.502*** (0.085)
农业经营规模化 Scale of agricultural management	sam	-0.124* (0.074)	-0.010 (0.028)	-0.336*** (0.083)
经济发展水平 Economic development	ed	0.457** (0.182)	0.303 (0.319)	-1.549*** (0.387)
城镇化 Urbanization	ur	0.324*** (0.098)	0.462 (1.000)	1.566*** (0.299)
对外开放 Opening-up	op	-0.119 (0.131)	-4.932*** (1.160)	-1.704*** (0.640)
常数项 Constant	cons	-113.352*** (34.211)	-60.546 (91.962)	-479.476*** (65.956)
Wald test		2640.73***	27 216.47***	13 967.00***
F test		2.540	2.739	0.672
Frees test		0.338***	0.301***	0.930***

模型(4)~(6)分别是东部、中部、西部地区回归结果。*、**和***分别表示回归系数在 $P<10\%$ 、 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 水平显著,括号内为标准差。Model 4, model 5 and model 6 are regression results of the east, central and west regions. *, ** and *** denote the significance levels of the regression coefficients of $P<10\%$, $P<5\%$, and $P<1\%$, respectively. Data in parentheses are the corresponding standard deviations.

地区有所差异。劳动节约型技术进步选择估计系数在东部地区在 1% 水平上显著为负,而中、西部地区在 1% 水平上显著为正。东部地区相对于中部、西部地区农业劳动力转移更多,尽管大量的农业机械弥补了劳动力的不足,但尚未转移的劳动力劳动要素质量不能与其他生产要素较好匹配,导致农业环境状况变差,东部地区劳动力节约型技术进步选择估计系数为负值。资本深化估计系数在东部、西部地区显著为负,在中部地区估计系数却显著为正。由于中部地区大多为粮食生产功能区,资本深化提高了农业生产效率,资本深化带来的资本体现式技术进步与劳动要素质量相匹配,使得资本深化有利于提升碳影子价格。这进一步说明了东部地区尽管机械要素实现了对劳动力的弥补,但也加剧了劳动力与资本的不当配置关系;而西部地区由于资源禀赋、地理环境等导致农业发展比较效益较低,导致资本深化技术进步选择不能与劳动要素质量匹配。

从控制变量来看,农业经营规模在东、西部地区对影子价格分别在 10%、1% 水平显著为负,与前面研究一致,即该研究期内农业经营规模的提高可能导致区域农业生产压力过大;但由于西部地区提升经营规模会带来更大的农业效益,农业致污要素投入大幅增加,导致抑制效应明显大于东部地区;而中部地区主要为粮食主产区,提升经营规模会改善粮食生产投入要素组合,导致其对碳影子价格的抑制效应不明显。经济发展水平在东部地区对碳影子价格在 5% 水平上显著为正,西部地区在 1% 水平上显著为负。由于人均 GDP 与人均碳排放增长之间存在环境库兹涅茨曲线,东部地区经济发展水平与碳影子价格可能跨过“倒 U 型”曲线的拐点。城市化对

碳影子价格估计系数在东、西部地区显著为正,对外开放水平估计系数在中、西部地区显著为负。

3 讨论与结论

3.1 讨论

科学评估碳减排成本,并通过经济结构转型和技术进步有效实施减排策略,已经成为实现中国经济社会低碳转型发展的必然选择,也有利于我国实现 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和目标。本文测算分析了我国 1997—2020 年的农业碳影子价格及其动态演进特征,并探究了经济结构转型、技术进步选择对农业碳影子价格的作用机制及其区域异质性,为政府制定差异化的碳减排方案与计划提供了循证指南。有别于以往基于弱可处置性假设,利用参数法测算碳影子价格^[37]和农业污染物影子价格^[25,38]得出的影子价格不同,本研究结果表明 BP 技术测算得到的农业碳影子价格呈现上升趋势,并具有区域差异性,这些结论与 Shen 等^[3]、杨子暉等^[39]的结论是一致的。改进的 BP 技术通过考虑污染物的产生关系将期望产出子技术与非期望产出子技术联系起来,提供了与经济理论和物料守恒原则相一致的影子价格估计^[30],可更好地平衡环境治理与经济发展之间的关系,一定程度上弥补了其他研究方法的不足。同时,与大多数关注农业碳排放影响因素的研究不同^[18,40],对农业碳影子价格的研究可以清晰地解析碳减排成本的影响因素。研究发现,经济结构调整是碳影子价格的重要影响因素,不同地区技术进步选择对碳影子价格影响有差异。东部地区农业碳影子价格更容易受节约型劳动技术进步选择的影响,中部地区农业碳影子价格更容易受资本深化

影响,西部地区农业碳影子价格受经济发展水平、经济结构的影响。由于碳排放影子价格可以反映减排成本,这些结论可为不同区域制定差异化的碳减排政策及区域分配调整提供可靠的参考。

本文仍存在一些局限:1)农业作为碳排放重要来源,也具备相当的碳汇功能。本研究在测算碳影子价格时,并未考虑农业碳汇带来的生态价值以及粮食生产的社会效益。在后续研究中,将同时从农业碳排放与碳汇视角,并把粮食生产的社会效益纳入模型构造。2)研究尺度为省域,旨在为我国农业碳达峰、碳中和提供决策参考,后续研究可将研究尺度扩展至地级市层面,并针对粮食主产区、主销区及平衡区探讨区域间农业碳排放分配机制,结论将更为可信、建议将更具指向性。

3.2 结论

基于改进的 BP 技术测算 1997—2020 年中国 31 个省份农业碳影子价格,利用 Kernel 密度估计方法分析农业碳影子分布动态演进过程,并应用 FGLS 模型估计结构转型、技术进步选择对碳影子价格的影响展开研究。主要结论如下:

1)我国农业碳影子价格呈现上升态势。东部、中部和西部地区农业碳影子价格分别为 7759.69 元·t⁻¹、4192.35 元·t⁻¹ 和 3997.51 元·t⁻¹,且东、中、西部地区农业碳影子价格上升趋势依次降低。核密度分析显示我国农业碳影子价格核密度值有增加趋势,东部地区核密度曲线出现较为明显的右移趋势;中部地区核密度曲线呈现左移—右移趋势,且区域间差异在变大;西部地区核密度曲线呈现明显的向下、变宽趋势。

2)地区结构转型、技术选择是导致农业碳影子价格地区异质性的的重要因素。全国层面回归结果显示,结构转型、劳动节约型技术进步及城市化水平对碳影子价格有显著的促进作用,资本深化、经济发展水平、农业规模化水平与对外开放水平抑制了碳影子价格的提升。

3)分区域来看,结构转型在东部、中部地区显著提升农业碳影子价格,在西部地区却显著抑制了农业碳影子价格;劳动节约型技术进步在东部地区抑制了农业碳影子价格,而在中部、西部地区显著提升农业碳影子价格;资本深化在东部、西部地区显著抑制农业碳影子价格,在中部地区显著提升农业碳影子价格;控制变量对农业碳影子价格的影响在不同地区间也有所差异。

4 政策启示

基于上述结论,本文提出如下建议:

持续推动经济结构转型。结构转型是降低碳排放的有效途径。结构转型有利于促进生产要素合理配置和有效利用,进一步向知识技术密集、物质资源消耗少的产业调整,推动经济绿色高质量发展。在促进结构转型同时,还要通过完善要素配置体系促进农业部门与非农部门要素的高效配置,具体表现在提高农业劳动要素质量、实现城乡基本公共服务均等化等,缩小农业和非农业生产率差异,促使经济发展实现空间均衡,进而实现农业高质量绿色发展。

制定差异化绿色协调发展政策。对于经济比较发达的东部地区农业碳影子价格较高,减排难度加大。应注重绿色低碳技术研发,降低对物质资本的过度依赖。对于农业生产条件比较优越的中部地区,应承担更多的减排任务。积极发展绿色低碳农业,推进施肥用药减量化、畜禽粪污综合利用行动方案,促进农业绿色转型。对于西部地区,鼓励发展生态农业,并适度承担碳减排任务。加快农村基础设施建设,加快培育新型农业经营主体,实现规模化、清洁化、精细化生产。同时,针对中西部地区环境治理难度,应加快协调低碳区域内产业生产要素配置,并积极主动从东部地区引进减排技术和减排资本,有效提高减排潜力。

逐步将农业碳减排纳入碳交易市场。在完善的市场条件下,农业碳影子价格是其内在经济价值的体现,应充分利用农业碳影子价格对碳定价的形成机制。应启动农业碳排放核算研究,加快形成一套有利于管理部门、生产主体、碳交易主体共同参与的核算方法体系。推动制定农业碳汇交易相关法律法规的各项具体内容,形成多元主体参与碳市场的激励制度,并制定农业碳汇项目发展的行动指南,推动农业低碳生产的成本投入与收益获取在边际上维持均衡,以期推动农业碳减排目标实现。

参考文献 References

- [1] ZHANG X X, WU L Y, MA X Z, et al. Dynamic computable general equilibrium simulation of agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 345: 131122
- [2] 王倩, 高翠云. 中国省际碳影子价格与碳生产率非线性关联研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(10): 2118–2131
WANG Q, GAO C Y. Research on the nonlinear correlation between provincial carbon shadow price and carbon productivity[J]. *Resources Science*, 2018, 40(10): 2118–2131
- [3] SHEN Z Y, BALEŽENTIS T, CHEN X L, et al. Green growth

- and structural change in Chinese agricultural sector during 1997–2014[J]. *China Economic Review*, 2018, 51: 83–96
- [4] SONNENSCHNEIN J, VAN BUSKIRK R, RICHTER J L, et al. Minimum energy performance standards for the 1.5°C target: an effective complement to carbon pricing[J]. *Energy Efficiency*, 2019, 12(2): 387–402
- [5] CUI Q, LI Y. Airline efficiency measures under CNG2020 strategy: an application of a dynamic By-production model[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 106: 130–143
- [6] DAKPO K H, LANSINK A O. Dynamic pollution-adjusted inefficiency under the by-production of bad outputs[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(1): 202–211
- [7] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. *管理世界*, 2022, 38(2): 46–69, 4
- SHAO S, FAN M T, YANG L L. Economic restructuring, green technical progress, and low-carbon transition development in China: an empirical investigation based on the overall technology frontier and spatial spillover effect[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(2): 46–69, 4
- [8] BONDAREV A, GREINER A. How ongoing structural change creates a double dividend: outdating of technologies and green growth[J]. *Portuguese Economic Journal*, 2022, 21(2): 125–160
- [9] WANG S J, LI G D, FANG C L. Urbanization, economic growth, energy consumption, and CO₂ emissions: empirical evidence from countries with different income levels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2144–2159
- [10] 原娜, 周洁. 中国省域尺度下产业结构多维度特征及演化对碳排放的影响[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 3186–3202
- YUAN Y, ZHOU J. Influence of multi-dimensional characteristics and evolution of industrial structure on carbon emissions at provincial scale in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 3186–3202
- [11] 齐昕, 郭薛南. 新兴经济体国家城镇化发展对碳排放影响的比较研究[J]. *生态经济*, 2022, 38(3): 101–108
- QI X, GUO X N. A comparative study of the impact of urbanization on carbon emissions in emerging economies[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(3): 101–108
- [12] CHURCHILL S A, INEKWE J, SMYTH R, et al. R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870–2014[J]. *Energy Economics*, 2019, 80: 30–37
- [13] 佟新华, 周红岩, 陈武, 等. 工业化不同发展阶段碳排放影响因素驱动效应测度[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(5): 26–35
- TONG X H, ZHOU H Y, CHEN W, et al. Study on the measurement of carbon-driven effects from different development stages of industrialization[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(5): 26–35
- [14] 何彬, 范硕. 自主创新、技术引进与碳排放——不同技术进步路径对碳减排的作用[J]. *商业研究*, 2017(7): 58–66
- HE B, FAN S. Independent innovation, technological introduction and carbon emission: the role of different technological progress paths in carbon emission reduction[J]. *Commercial Research*, 2017(7): 58–66
- [15] 黄凌云, 谢会强, 刘冬冬. 技术进步路径选择与中国制造业出口隐含碳排放强度[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(10): 94–102
- HUANG L Y, XIE H Q, LIU D D. Study on impacts of technological progress paths on embodied carbon emission intensity of Chinese manufacturing exports[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(10): 94–102
- [16] 吴贤荣, 张俊飏. 中国省域农业碳排放: 增长主导效应与减排退耦效应[J]. *农业技术经济*, 2017(5): 27–36
- WU X R, ZHANG J B. Agricultural carbon emissions in China: growth driving effects and reduction decoupling effects[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2017(5): 27–36
- [17] 李成龙, 周宏. 农业技术进步与碳排放强度关系——不同影响路径下的实证分析[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(11): 162–171
- LI C L, ZHOU H. Relationship between agricultural technology progress and carbon emission intensity: an empirical analysis under different influence paths[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(11): 162–171
- [18] 陈银娥, 陈薇. 农业机械化、产业升级与农业碳排放关系研究——基于动态面板数据模型的经验分析[J]. *农业技术经济*, 2018(5): 122–133
- CHEN Y E, CHEN W. A study on the relationship among agricultural mechanization, industrial upgrading and agricultural carbon emission — the empirical research based on dynamic panel data model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(5): 122–133
- [19] 金书秦, 林煜, 牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. *改革*, 2021(5): 29–37
- JIN S Q, LIN Y, NIU K Y. Driving green transformation of agriculture with low carbon: characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China[J]. *Reform*, 2021(5): 29–37
- [20] 田云, 尹恣昊. 技术进步促进了农业能源碳减排吗?——基于回弹效应与空间溢出效应的检验[J]. *改革*, 2021(12): 45–58
- TIAN Y, YIN M H. Does technological progress promote carbon emission reduction of agricultural energy? test based on rebound effect and spatial spillover effect[J]. *Reform*, 2021(12): 45–58
- [21] BOUSSEMART J P, LELEU H, SHEN Z Y. Worldwide carbon shadow prices during 1990–2011[J]. *Energy Policy*, 2017, 109: 288–296
- [22] LI T X, BALEŽENTIS T, MAKUTĖNIENĖ D, et al. Energy-related CO₂ emission in European Union agriculture: driving forces and possibilities for reduction[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 682–694
- [23] HE Y Q, ZHU S Y, ZHANG Y, et al. Calculation, elasticity and regional differences of agricultural greenhouse gas shadow prices[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 790: 148061
- [24] 吴贤荣, 张俊飏, 程琳琳, 等. 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[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(6): 53–61
- WU X R, ZHANG J B, CHENG L L, et al. 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
- [25] 何培培, 张俊飏, 何可, 等. 农业生产何以存在低碳效率幻觉?——来自1997—2016年31个省份面板数据的证据[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2205–2217
- HE P P, ZHANG J B, HE K, et al. Why there is a low-carbon efficiency illusion in agricultural production: evidence from Chinese provincial panel data in 1997–2016[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2205–2217
- [26] 吴丽丽, 李谷成, 周晓时. 要素禀赋变化与中国农业增长路径选择[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(8): 144–152
- WU L L, LI G C, ZHOU X S. Change of factor endowments and China agricultural growth path selection[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(8): 144–152
- [27] ZHOU P, ZHOU X, FAN L W. On estimating shadow prices of undesirable outputs with efficiency models: a literature review[J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 799–806
- [28] MURTY S, RUSSELL R R, LEVKOFF S B. On modeling pollution-generating technologies[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2012, 64(1): 117–135
- [29] BALEŽENTIS T, BLANCARD S, SHEN Z Y, et al. Analysis of environmental total factor productivity evolution in European agricultural sector[J]. *Decision Sciences*, 2021, 52(2): 483–511
- [30] SHEN Z Y, LI R R, BALEŽENTIS T. The patterns and determinants of the carbon shadow price in China's industrial sector: a by-production framework with directional distance function[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 323: 129175
- [31] 政府间气候变化专门委员会(IPCC). 2006年IPCC国家温室气体清单指南[R]. 日本: 日本全球环境战略研究所, 2006
- IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006
- [32] 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[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
- [33] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. *经济研究*, 2011, 46(5): 4–16, 31
- GAN C H, ZHENG R G, YU D F. An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China[J]. *Economic Research Journal*, 2011, 46(5): 4–16, 31
- [34] 杨海钰, 马兴栋, 邵砾群. 区域要素禀赋变化与农业技术变迁路径差异——基于苹果产业视角和7个主产省的数据[J]. *湖南农业大学学报(社会科学版)*, 2018, 19(2): 16–22
- YANG H Y, MA X D, SHAO L Q. Variation of regional factor endowments and agricultural technological changes: based on the apple industry and the data from seven major producing provinces[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences)*, 2018, 19(2): 16–22
- [35] 朱轶, 曾春琼. 中国工业的资本深化与技术进步偏向是否互为关联——基于省际面板数据的实证检验[J]. *现代财经(天津财经大学学报)*, 2016, 36(9): 49–63
- ZHU Y, ZENG C Q. Is capital deepening and biased technical progress of China's industrial sector interrelated — a empirical study on provincial panel data[J]. *Modern Finance and Economics-Journal of Tianjin University of Finance and Economics*, 2016, 36(9): 49–63
- [36] 姚增福, 刘欣. 技术进步约束、不确定性与农业环境效率——基于730份微观数据和改进的两步法DEA模型的检验[J]. *调研世界*, 2021(7): 24–33
- YAO Z F, LIU X. Constraints, uncertainties and agricultural environmental efficiency of technological progress — the test of two-step DEA model based on 730 micro data and improved[J]. *The World of Survey and Research*, 2021(7): 24–33
- [37] 邹利林, 刘彦随, 王永生. 1978—2017年中国农业污染物影子价格及污染成本测算[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(6): 223–230
- ZOU L L, LIU Y S, WANG Y S. Shadow prices and pollution costs of agricultural pollutants in China from 1978 to 2017[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(6): 223–230
- [38] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 等. 基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(7): 1172–1182
- WU X R, ZHANG J B, TIAN Y, et al. Analysis on China's agricultural carbon abatement capacity from the perspective of both equity and efficiency[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7): 1172–1182
- [39] 杨子晖, 陈里璇, 罗彤. 边际减排成本与区域差异性研究[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(2): 1–21
- YANG Z H, CHEN L X, LUO T. Marginal cost of emission reduction and regional differences[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(2): 1–21
- [40] 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