

引用格式:张普伟,贾广社,何长全,等.中国建筑业碳生产率变化驱动因素[J].资源科学,2019,41(7):1274-1285.[Zhang P W, Jia G S, He C Q, et al. Driving factors of carbon productivity changes in China's construction industry[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1274-1285.] DOI: 10.18402/resci.2019.07.08

# 中国建筑业碳生产率变化驱动因素

张普伟,贾广社,何长全,MACKHAPHONH Nikhaphone

(同济大学经济与管理学院,上海 200092)

**摘要:**绿色发展要求下,中国建筑业碳生产率变化的驱动因素需要进行深入分析。本文测算了2005—2016年中国各省(市、区)各年的建筑业单要素碳生产率(SFCP)和全局全要素碳生产率(GTFCP),应用相关性检验实证了SFCP和GTFCP之间的关系,分别应用加和式对数平均迪氏指数分解方法I(A-LMDI-I)和数据包络分析(DEA)分解方法对SFCP和GTFCP变化的驱动因素进行识别和分析。结果显示:①SFCP和GTFCP之间显著正相关。②技术创新正向驱动SFCP,地区调整负向驱动SFCP;2008—2011年是技术创新和地区调整对SFCP影响最大的时段;四川省的技术创新、广东省的地区调整对SFCP的影响最大。③技术进步正向驱动GTFCP,管理效率和规模效率负向驱动GTFCP;2011—2014年是技术进步和管理效率影响最大的时段;2005—2008年是规模效率对GTFCP影响最大的时段;江西的技术进步、海南的规模效率和贵州的管理效率对GTFCP的影响最大。基于以上结果总结出相应的管理启示和不足。

**关键词:**碳生产率;驱动因素;LMDI;数据包络分析;建筑业;中国

DOI: 10.18402/resci.2019.07.08

## 1 引言

为了应对气候变化和环境、生态恶化,实现国民经济和社会的可持续发展,“生态文明建设”和“绿色发展”理念作为国家发展战略被写入中华人民共和国宪法。这意味着中国未来各个行业的发展都必然受到环境保护和CO<sub>2</sub>减排的约束。低碳经济作为支撑和实现“生态文明”和“绿色发展”的一种经济形态,其本质是要求实现经济增长的同时控制CO<sub>2</sub>的排放<sup>[1,2]</sup>。在应对全球气候变化的约束下,地球大气层能容纳的CO<sub>2</sub>量(简称“碳排放空间”)已经成为一种比资本和劳动更稀缺的资源。排放一单位CO<sub>2</sub>量所得到的GDP这一“碳生产率”概念<sup>[3]</sup>,已经成为连接经济增长与CO<sub>2</sub>减排2个目标的桥梁<sup>[4]</sup>,但这一单要素碳生产率概念未考虑到多种投入要素的共同效应,用“全要素碳生产率”概念

更全面准确<sup>[5]</sup>,这里的“全要素碳生产率”可定义为某生产系统中全部主要产出与包含“碳排放空间”在内的全部主要投入的比值。发展低碳经济的核心和关键是提高碳生产率<sup>[6,7]</sup>。

建筑业作为中国国民经济和社会发展的支柱产业,2017年贡献了全国GDP的6.73%<sup>[8]</sup>,为其他产业的发展提供了必要的物质基础,改善了国民的居住条件。但是,建筑业也消耗了中国总能耗的26.6%<sup>[9]</sup>,排放了全国CO<sub>2</sub>总量的25%<sup>[10]</sup>,是重要的CO<sub>2</sub>排放行业。提高建筑业碳生产率是建筑业分担国家部署的相应CO<sub>2</sub>减排目标的重要途径。为了有针对性地制定提高建筑业碳生产率的政策措施,需要探究驱动建筑业碳生产率变化的因素及其对碳生产率的驱动方向和程度。

加和式对数平均迪氏指数分解方法I(A-LMDI-

收稿日期:2018-07-09,修订日期:2018-10-12

基金项目:同济大学研究生学科交叉创新人才国际合作培养项目(2018XKJC-004)。

作者简介:张普伟,男,贵州普安人,博士,高级工程师,从事效率与生产率评价、资源与环境管理和工程项目管理研究。E-mail: zhang.p.w@163.com

2019年7月

I)和数据包络分析(DEA)分解方法是常用的驱动因素识别和分析方法。在A-LMDI-I的应用方面,现有文献对中国各省(市、区)建筑业CO<sub>2</sub>排放与经济产出脱钩状态变化<sup>[10,11]</sup>、CO<sub>2</sub>排放量变化<sup>[12,13]</sup>和动态竞争力变化<sup>[14]</sup>的驱动因素及驱动方向和驱动效应均进行了研究。但A-LMDI-I在建筑业领域的研究文献检索结果显示,中国建筑业单要素碳生产率(SFCP)的驱动因素目前还没有公开发表的研究成果,针对澳大利亚建筑业的以下研究成果对研究中国建筑业提供了很好的参考借鉴:Liang等<sup>[15]</sup>用A-LMDI-I对1995—2004年澳大利亚建筑业SFCP的驱动因素进行了识别和分析,识别出碳强度、能源强度和地区调整3个驱动因素,实证结果显示能源强度显著正向驱动SFCP,而碳强度和地区调整的影响不显著;Hu等<sup>[12]</sup>用A-LMDI-I研究了1990—2012年澳大利亚建筑业的SFCP,分解出技术创新和地区调整2个驱动因素,结果表明技术创新显著提升了澳大利亚建筑业的SFCP,而地区调整基本没有影响。

因为不需要预先设置生产函数的具体参数和形式,DEA方法被广泛用于全要素生产率(或效率)的测算。同时,考虑规模回报的不同类型、时间等因素,采用DEA方法测算的全要素生产率(或效率)可进一步被分解成“技术进步”、规模效率和管理效率(也叫纯技术效率)等驱动因素。比如,赵良仕等<sup>[16]</sup>研究了中国各省(市、区)的水资源全要素生产率,结果显示技术进步是主要驱动力,而纯技术效率和规模效率的影响不显著;Feng等研究了中国各省工业能源效率<sup>[17]</sup>和建筑业能源效率<sup>[18]</sup>变化的驱动因素,结果显示技术进步是促进工业能源效率和建筑业能源效率提升的主要驱动力;Liu<sup>[19]</sup>对澳大利亚建筑业的全要素生产率进行了分解研究,结果显示技术进步是主要的正向驱动力量。这些研究表明,类似的分解方法可以用于研究中国建筑业,揭示中国各省(市、区)建筑业全要素碳生产率变化的驱动因素及其影响程度,但目前尚没有公开发表的关于中国建筑业全要素碳生产率变化驱动因素的研究成果。

在已有的关于单要素碳生产率和全要素碳生产率的研究文献中,绝大多数都分别对两者进行独立的研究,尚无对两者之间的联系进行深入研究的

成果。但从上述定义的单要素碳生产率和全要素碳生产率概念看,单要素碳生产率是全要素碳生产率的一个构成部分。因此,本文假设单要素碳生产率的变动会导致全要素碳生产率的同向变动,单要素碳生产率变化的驱动因素总体上也驱动着全要素碳生产率的同向变动。从而将单要素碳生产率与全要素碳生产率进行集成研究,拓宽探究碳生产率变化驱动因素的视野。

基于此,本文在已有文献的基础上从以下3个方面展开研究:①探究中国建筑业SFCP与全局全要素碳生产率(GTFCP)的关系,用相关分析法验证SFCP与GTFCP之间的关系假设。②应用A-LMDI-I和DEA分解方法分别对SFCP和GTFCP进行分解,探究驱动建筑业碳生产率变动的驱动因素。③从省级层面,测算出各时段各驱动因素对SFCP或GTFCP的影响方向和影响程度。研究结果有助于深入了解中国建筑业的低碳发展现状及驱动因素,有助于决策者找到未来的工作重点。

## 2 研究方法

### 2.1 单要素与全要素碳生产率的测算方法

探索SFCP和GTFCP之间的关系,可为后续的驱动因素分解作准备,首先给出SFCP和GTFCP的计算公式。根据Kaya等<sup>[3]</sup>的定义,中国建筑业第 $j$ 省(市、区)的SFCP <sub>$j$</sub> 可用式(1)计算:

$$SFCP_j = \frac{Y_j}{C_j} \quad (1)$$

式中: $Y_j$ 和 $C_j$ 分别是第 $j$ 省(市、区)的建筑业增加值和CO<sub>2</sub>排放总量。SFCP的计算简便,含义清晰,但在建筑业生产系统中,实际投入的资源必然包含劳动、材料、能源、机械等其他要素,这些要素共同作用的效果不能在SFCP中体现,采用全要素碳生产率指标更全面准确。根据选择的时期范围不同,全要素碳生产率分为同期全要素碳生产率(CTFCP)和GTFCP。CTFCP是基于同一个时期内不同生产决策单元的生产技术计算的,比如第 $t$ 年的同期生产技术 $T^t$ 包含了第 $t$ 年各省(市、区)的建筑业生产系统的所有投入产出组合集合,如式(2)所示:

$$T^t = \{(x', y': x' \text{能生产出 } y')\} \quad (2)$$

式中: $x' \in R_+^m$ 表示各省(市、区)建筑业第 $t$ 年的 $m$ 个

投入要素,  $y^t \in R_+^s$  表示各省(市、区)第  $t$  年的  $s$  个建筑业产出要素。全局生产技术集  $T^G$  是指所有  $N$  个时期的同期生产技术集的并集<sup>[20]</sup>, 如式(3)所示:

$$T^G = T^1 \cup T^2 \cup \dots \cup T^N \quad (3)$$

在第  $t$  年的同期生产技术条件下, 第  $j_0$  省(市、区)的投入方向距离函数被定义成式(4):

$$D^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) = \min \{ \theta : (\theta x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) \in T^t \} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  是指在第  $t$  年的生产技术条件下, 第  $j_0$  省(市、区)的投入  $x_{j_0}^t$  最大限度减少后占原来投入的比例。 $\theta \leq 1$ , 是 Farrell<sup>[21]</sup> 意义上的效率评价价值, 用来表示  $T^t$  下的  $CTFCP$ 。同理可以定义全局生产技术条件下的  $GTFCP$ , 见式(5):

$$D^G(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) = \min \{ \theta : (\theta x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) \in T^G \} \quad (5)$$

根据规模报酬类型的不同, 以上的生产技术集可以分成规模报酬不变(CRS)和规模报酬变化(VRS), 对应的方向距离函数也分为  $D_{CRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t)$ 、 $D_{VRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t)$ 、 $D_{CRS}^G(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t)$ 、 $D_{VRS}^G(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t)$  等4类, 每类方向距离函数求解的约束条件有所不同。因为 CRS 情况下,  $GTFCP$  既包括规模效率, 也包括管理效率<sup>[22]</sup>, 并且各决策单元间和各时期的碳生产率相互都具有可比性<sup>[16]</sup>, 所以本文以 CRS 下的  $GTFCP$  作为主要的全要素碳生产率指标。考虑后续全要素碳生产率分解的需要, 用式(6)–(8)的 DEA 规划模型分别求解对应的方向距离函数。

$$D_{CRS}^G(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) = \min \theta \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq \theta x_{ij_0} & i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rj_0} & r = 1, 2, \dots, s; \\ \lambda_j \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n; \\ & n = 30 \times 12 \end{cases}$$

$$D_{VRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) = \min \theta \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq \theta x_{ij_0} & i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rj_0} & r = 1, 2, \dots, s; \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 & j = 1, 2, \dots, n; \\ \lambda_j \geq 0 & n = 30 \end{cases}$$

$$D_{CRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) = \min \theta \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq \theta x_{ij_0} & i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rj_0} & r = 1, 2, \dots, s; \\ \lambda_j \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n; \\ & n = 30 \end{cases}$$

式(6)–(8)中: 需要求解的变量  $\theta$  和  $\lambda_j$  分别是各省建筑业在不同规模报酬情况下的  $GTFCP$  (或  $CTFCP$ ) 和各年各省(市、区)建筑业生产系统的权重。由于本文的样本数据来源于 2005—2016 年中国 30 个省(市、区), 当采用当期技术时, 参与计算的决策单元个数是中国 30 个省(市、区)第  $t$  年的数据 (即  $n=30$ ); 当采用全局技术时, 参与计算的决策单元个数是中国 30 个省(市、区)的 12 年数据 (即  $n=12 \times 30$ )。

## 2.2 基于 A-LMDI-I 的单要素碳生产率分解模型

中国建筑业的  $SFCP$  可用式(9)表示:

$$SFCP = \frac{Y}{C} = \sum_{j=1}^n \frac{Y_j}{C_j} \cdot \frac{C_j}{C} \quad (9)$$

式中:  $Y$  和  $C$  分别是中国建筑业的增加值和  $CO_2$  排放总量,  $Y_j$  和  $C_j$  的含义同式(1)。

由于各省(市、区)的建筑业随时间推移而有各种技术创新, 以及各省(市、区)建筑业  $CO_2$  排放量占全国总排放量的比重会调整变化, 从而导致  $SFCP$  会随时间而变化, 如果考虑时间因素  $t$ , 同时对式(9)的两侧求导, 得式(10)所示的微分方程:

$$\frac{d(SFCP_t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{C_{jt}}{C_t} \cdot \frac{d\left(\frac{Y_{jt}}{C_{jt}}\right)}{dt} + \sum_{j=1}^n \frac{Y_{jt}}{C_t} \cdot \frac{d\left(\frac{C_{jt}}{C_t}\right)}{dt} \quad (10)$$

式中: 右侧第 1 项是指由于各省(市、区)建筑业的技术创新对  $SFCP$  的影响, 第 2 项表示建筑业  $CO_2$  排放量在各省(市、区)的地区调整对  $SFCP$  的影响<sup>[12,23]</sup>。以式(10)为起点, 可以推导出式(11)所示的从第  $\mu$  年到第  $Z$  年的  $SFCP$  变化量的积分形式:

$$SFCP_Z - SFCP_\mu = \sum_{j=1}^n \int_{\mu}^Z \frac{C_{jt}}{C_t} \cdot \frac{d \ln \left( \frac{Y_{jt}}{C_{jt}} \right)}{dt} + \sum_{j=1}^n \int_{\mu}^Z \frac{Y_{jt}}{C_t} \cdot \frac{d \ln \left( \frac{C_{jt}}{C_t} \right)}{dt} dt \quad (11)$$



2019年7月

式(11)要求数据是连续的,而在实践中通常只能获得离散的数据,需要进一步推导出离散形式<sup>[24]</sup>。由于A-LMDI-I具有完全分解和结果唯一的优势<sup>[24,25]</sup>,被广泛用于这种推导变换<sup>[12,23]</sup>。根据A-LMDI-I,为了消除 $Y_{ij}/C_{ij}$ 和 $C_{ij}/C_t$ 中 $t$ 的影响,按式(12)–(14)确定的算法进行转换。式(13)替代 $Y_{ij}/C_{ij}$ ,用式(14)替代 $C_{ij}/C_t$ ,得到式(15)。

$$L(x, y) = \begin{cases} (x-y)/(\ln x - \ln y), & x \neq y \\ x, & x = y \end{cases} \quad (12)$$

$$\gamma_{(\mu, z), j} = \frac{L\left(\frac{Y_{\mu, j}}{C_{\mu}}, \frac{Y_{z, j}}{C_z}\right)}{L\left(\frac{Y_{\mu, j}}{C_{\mu, j}}, \frac{Y_{z, j}}{C_{z, j}}\right)} \quad (13)$$

$$\lambda_{(\mu, z), j} = \frac{L\left(\frac{Y_{\mu, j}}{C_{\mu}}, \frac{Y_{z, j}}{C_z}\right)}{L\left(\frac{C_{\mu, j}}{C_{\mu}}, \frac{C_{z, j}}{C_z}\right)} \quad (14)$$

由此,式(11)等价转换成式(15)所示的离散形式。可以看出, $SFCP$ 的变化主要是由式(15)右侧第1项所示的技术创新和第2项所示的地区调整2个影响因素决定的<sup>[12]</sup>,这2项可以都先不求和,此时能得到各省对全国 $SFCP$ 的影响结果:

$$SFCP_z - SFCP_{\mu} = \sum_{j=1}^n \gamma_{(\mu, z), j} \left( \frac{Y_{zj}}{C_{zj}} - \frac{Y_{\mu j}}{C_{\mu j}} \right) + \sum_{j=1}^n \lambda_{(\mu, z), j} \left( \frac{C_{zj}}{C_z} - \frac{C_{\mu j}}{C_{\mu}} \right) \quad (15)$$

第 $e$ 年到第 $f$ 年的驱动结果,可以用逐年分解的结果累加的算法计算得到,如式(16):

$$SFCP_f - SFCP_e = \sum_{t=e}^{f-1} \sum_{j=1}^n \gamma_{(t, t+1), j} \left( \frac{Y_{(t+1)j}}{C_{(t+1)j}} - \frac{Y_{tj}}{C_{tj}} \right) + \sum_{t=e}^{f-1} \sum_{j=1}^n \lambda_{(t, t+1), j} \left( \frac{C_{(t+1)j}}{C_{t+1}} - \frac{C_{tj}}{C_t} \right) \quad (16)$$

需要指出的是,式(16)右侧第1项的技术创新内涵是一个省(市、区)第 $t+1$ 年的 $SFCP^{t+1}$ 与第 $t$ 年的 $SFCP^t$ 的差值,差值大于0认为“技术创新”对 $SFCP$ 提升有正向促进作用,差值小于0认为技术创新对 $SFCP$ 提升有负向作用。所以技术创新也包含诸如学徒工增加导致材料损耗率增大、返工多、资源浪费多等管理要素的影响。这与传统意义上的技术

创新内涵有所不同,分析其驱动因素时需要考虑管理层面的原因。

### 2.3 基于DEA模型的全局全要素碳生产率变化的驱动因素分解模型

本小节首先界定全局全要素碳生产率变化( $GTFPC^{t, t+1}$ )的含义,然后介绍基于DEA的 $GTFPC^{t, t+1}$ 分解模型。中国第 $j_0$ 省(市、区) $GTFPC^{t, t+1}$ 可被定义成式(17):

$$GTFPC^{t, t+1} = D_{CRS}^G(x_{j_0}^{t+1}, y_{j_0}^{t+1}) - D_{CRS}^G(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) \quad (17)$$

由于CRS情况下的技术效率可以进一步分解成规模效率和管理效率<sup>[22]</sup>,以及考虑随时间而变化的技术进步, $GTFPC^{t, t+1}$ 可被分解成式(18)所示的技术进步( $GLTC^{t, t+1}$ )、规模效率( $LSEC^{t, t+1}$ )和管理效率( $LPEC^{t, t+1}$ )3个驱动因素。类似的分解方法也被Feng等分别用于研究中国工业<sup>[17]</sup>和建筑业<sup>[18]</sup>的能源效率变化问题。

$$\begin{aligned} GTFPC^{t, t+1} &= \left[ D_{CRS}^G(x_{j_0}^{t+1}, y_{j_0}^{t+1}) - D_{CRS}^{t+1}(x_{j_0}^{t+1}, y_{j_0}^{t+1}) \right] - \\ &\quad \left[ D_{CRS}^G(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) - D_{CRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) \right] + \\ &\quad \left[ D_{CRS}^{t+1}(x_{j_0}^{t+1}, y_{j_0}^{t+1}) - D_{VRS}^{t+1}(x_{j_0}^{t+1}, y_{j_0}^{t+1}) \right] - \\ &\quad \left[ D_{CRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) - D_{VRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) \right] + \\ &\quad \left[ D_{VRS}^{t+1}(x_{j_0}^{t+1}, y_{j_0}^{t+1}) - D_{VRS}^t(x_{j_0}^t, y_{j_0}^t) \right] \\ &= GLTC^{t, t+1} + LSEC^{t, t+1} + LPEC^{t, t+1} \end{aligned} \quad (18)$$

## 3 中国建筑业碳生产率驱动因素的实证研究

### 3.1 指标与数据

考虑建筑业的行业特点,选取从业人员( $X_1$ )、水泥( $X_2$ )、钢材( $X_3$ )、铝材( $X_4$ )、机械功率数( $X_5$ )、能源( $X_6$ )和碳排放空间( $X_7$ )作为建筑业生产系统的投入指标,产出指标选取建筑业增加值( $Y$ ),类似的指标体系也被Zhang等<sup>[26]</sup>用于建筑业全要素碳效率的测算。数据时段为2005—2016年。因西藏、台湾、香港、澳门的能源数据缺失,本文生产决策单元为除此4个省级行政区外的30个省、直辖市或自治区。其中从业人员( $X_1$ )源自《中国统计年鉴》(2006—2017年);水泥( $X_2$ )、钢材( $X_3$ )、铝材( $X_4$ )和机械功率

数( $X_5$ )源自《中国建筑业统计年鉴》(2006—2017年);能源( $X_6$ )源自《中国能源统计年鉴》(2006—2017年)。碳排放空间( $X_7$ )在数量上等于建筑业的 $\text{CO}_2$ 排放量,其范围包括柴油、原煤、汽油等20种能源消耗排放的 $\text{CO}_2$ 和水泥、钢材、铝材、木材和玻璃5种主要建筑材料生产时的间接 $\text{CO}_2$ 排放量<sup>[1]</sup>,采用系数法计算,其中电的碳排放系数根据《中国区域电网基准线排放因子》<sup>①</sup>确定;非电力能源的碳排放系数根据《中国能源统计年鉴》(2006—2017年)、《公共机构能源资源消耗统计制度》<sup>②</sup>和《2006年IPCC国家温室气体清单指南目录》<sup>③</sup>中的平均低位发热量及其对应的缺省碳排放因子计算;建筑材料碳排放系数根据已有文献确定:木材 $10.877(\text{kg}/\text{m}^3)$ <sup>[27]</sup>、玻璃 $34.959(\text{kg}/\text{重量箱})$ <sup>[28]</sup>、水泥 $0.580(\text{t}/\text{t})$ <sup>[29]</sup>、铝材 $16.500(\text{t}/\text{t})$ <sup>[30]</sup>、钢材 $1.959(\text{t}/\text{t})$ <sup>[31]</sup>。建筑业增加值( $Y$ )参照Feng等<sup>[18]</sup>的处理方式,以各省(市、区)的建筑安装工程价格指数平减到2005年不变价格,数据均源自《中国统计年鉴》(2006—2017年)。

### 3.2 $SFCP$ 与 $GTFCP$ 的关系

根据3.1节的指标和数据来源,分别按2.1节的式(1)和式(6)计算出2005—2016年中国各省(市、区)各年的 $SFCP$ 和 $GTFCP$ 后,得到如图1所示的关系散点图。从图1可以看出, $SFCP$ 与 $GTFCP$ 之间有明显的正相关性,总体来说, $SFCP$ 越大的省(市、区), $GTFCP$ 也越大。为了定量确定 $SFCP$ 与 $GTFCP$ 之间的相关性,用SPSS 25.0测算两者的皮尔逊相关系数为0.749,在0.01水平上显著,表明 $SFCP$ 与 $GTFCP$ 呈显著正相关,两者之间的关系假设得到实证的进一步支持。

### 3.3 基于A-LMDI-I的 $SFCP$ 驱动因素分析

2006—2016年间,由技术创新和地区调整对各省(市、区) $SFCP$ 在上一年基础上的逐年驱动变化,分时段累加得到表1所示的结果。从表1可以看出,在各个时段,技术创新均驱动着北京和上海对全国 $SFCP$ 的提升,这可能与北京和上海是中国经济、科技发展水平最高有密切关系;而地区调整

却驱动着上海对全国 $SFCP$ 的下降,可能是由于各个时段里, $\text{CO}_2$ 排放比重增高的省(市、区)的 $SFCP$ 都比上海低所致,数据显示,上海市的 $\text{CO}_2$ 排放占全国的比重从2005年的3.81%下降到2016年的1.27%, $SFCP$ 则从828.21元/t  $\text{CO}_2$ 提升到1366.40元/t  $\text{CO}_2$ 。而2016年 $\text{CO}_2$ 排放比重在2005年基础上提高最大的3个省为:湖北省从2005年的4.93%提高到2016年的11.01%, $SFCP$ 则从2005年的508.56元/t  $\text{CO}_2$ 下降到2016年的345.06元/t  $\text{CO}_2$ ;四川省 $\text{CO}_2$ 排放比重从3.62%提升到7.41%, $SFCP$ 则从841.31元/t  $\text{CO}_2$ 下降到342.72元/t  $\text{CO}_2$ ;贵州省 $\text{CO}_2$ 排放比重从0.84%提升到4.53%, $SFCP$ 则从690.28元/t  $\text{CO}_2$ 下降到138.38元/t  $\text{CO}_2$ 。

从各个时段看,2008—2011年,技术创新和地区调整对中国建筑业的 $SFCP$ 影响均为负向,而且影响程度均是最大的。这可能与2008年中国政府推出的4万亿经济刺激计划对建筑业的影响有关。为了应对全球金融危机的影响,维持中国经济社会总体稳定,中国政府于2008年出台了4万亿元投资计划,其中包括1.5万亿元的基础设施建设和0.4万亿元的安居工程建设投资。按此计划,大量基础设施和住宅建设项目快速上马,建筑业碳排放量快速增加<sup>[1]</sup>。在建筑业的技术和人员储备尚不充分的情况下,不可避免地带来资源浪费<sup>[32]</sup>,从而造成技术创新因素负向驱动中国建筑业的 $SFCP$ 。另一方面,因该刺激计划主要投向欠发达地区的基础设施

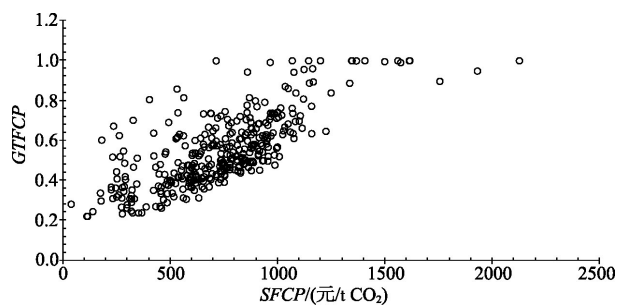


图1 单要素与全局全要素碳生产率关系散点图

Figure 1 Scatter plot of single factor carbon productivity ( $SFCP$ ) versus global total factor carbon productivity ( $GTFCP$ )

① 2011年,国家发展和改革委员会应对气候变化司制定,详见<http://cdm.ccchina.org.cn/WebSite/CDM/UpFile/File2720.pdf>。

② 2011年7月,国务院机关事务管理局制定,国家统计局审批。

③ 2006年,政府间气候变化专门委员会(IPCC)制定。

2019年7月

表1 2005—2016年技术创新和地区调整对*SFCP*的影响结果Table 1 Effects of technological innovation and regional adjustment on *SFCP*, 2005-2016(元/t CO<sub>2</sub>)

| 驱动因素 | 技术创新      |           |           |           |           | 地区调整      |           |           |           |           |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 时期   | 2005—2008 | 2008—2011 | 2011—2014 | 2014—2016 | 2005—2016 | 2005—2008 | 2008—2011 | 2011—2014 | 2014—2016 | 2005—2016 |
| 北京   | 5.327     | 2.123     | 7.859     | 3.527     | 18.837    | -13.758   | -6.918    | -2.836    | 2.297     | -21.215   |
| 天津   | -0.795    | 0.862     | -7.369    | 10.304    | 3.002     | 1.047     | -4.858    | 11.039    | -10.359   | -3.130    |
| 河北   | 7.016     | -31.676   | 11.885    | 6.696     | -6.080    | -7.331    | 22.159    | -12.440   | -4.348    | -1.960    |
| 山西   | 1.785     | 1.825     | -0.125    | 1.368     | 4.853     | -4.495    | -6.035    | 0.860     | -0.389    | -10.059   |
| 内蒙古  | -10.964   | 8.490     | -0.690    | -3.419    | -6.584    | 10.420    | -11.938   | -1.429    | 3.271     | 0.324     |
| 辽宁   | -5.081    | -23.123   | -0.426    | 8.773     | -19.857   | -2.234    | 13.756    | -0.001    | -16.466   | -4.945    |
| 吉林   | 1.187     | -0.604    | -7.651    | 7.928     | 0.860     | 1.067     | -4.753    | 7.605     | -7.394    | -3.474    |
| 黑龙江  | 3.474     | -9.744    | 2.982     | 1.047     | -2.241    | -1.510    | 2.670     | -4.874    | -0.936    | -4.650    |
| 上海   | 4.538     | 2.391     | 0.509     | 3.935     | 11.374    | -10.605   | -13.861   | -0.890    | -0.158    | -25.515   |
| 江苏   | -17.692   | -73.531   | 93.471    | 19.078    | 21.326    | 12.900    | 46.704    | -66.985   | 9.958     | 2.577     |
| 浙江   | -6.603    | 0.078     | 17.680    | 3.087     | 14.242    | -8.435    | -27.969   | 3.671     | 15.866    | -16.867   |
| 安徽   | 2.465     | -3.390    | 1.146     | 0.798     | 1.019     | -1.417    | -3.526    | 2.815     | 3.016     | 0.889     |
| 福建   | 5.826     | 2.102     | -5.558    | -1.210    | 1.161     | 0.492     | -8.901    | 17.384    | 13.370    | 22.344    |
| 江西   | 1.033     | -4.967    | 14.659    | -17.031   | -6.306    | -1.005    | -0.461    | -9.380    | 20.994    | 10.147    |
| 山东   | -22.413   | 10.500    | 12.721    | 7.940     | 8.748     | 13.809    | -34.116   | -3.724    | -0.114    | -24.145   |
| 河南   | 3.547     | 1.962     | -31.863   | 41.599    | 15.245    | 6.938     | -16.552   | 36.489    | -22.469   | 4.405     |
| 湖北   | 6.561     | -5.993    | -14.888   | 9.715     | -4.605    | -4.587    | -1.352    | 22.307    | 1.155     | 17.524    |
| 湖南   | -0.439    | -4.004    | 6.407     | -10.270   | -8.307    | -2.131    | -7.063    | -0.054    | 13.645    | 4.396     |
| 广东   | 1.664     | -8.977    | 7.550     | 18.385    | 18.621    | -12.045   | -6.766    | 0.120     | -9.577    | -28.268   |
| 广西   | 2.819     | -4.093    | 1.089     | -0.160    | -0.344    | -2.883    | 0.305     | 2.066     | 3.125     | 2.612     |
| 海南   | 1.162     | -0.549    | 0.053     | 0.655     | 1.321     | -1.342    | -0.083    | 0.182     | -0.465    | -1.707    |
| 重庆   | -15.000   | 8.536     | 5.895     | 6.788     | 6.220     | 13.963    | -11.259   | 0.691     | 3.130     | 6.525     |
| 四川   | -1.492    | -33.964   | 4.793     | 2.941     | -27.722   | -0.942    | 24.101    | -2.788    | 2.318     | 22.688    |
| 贵州   | -3.796    | 1.972     | -2.049    | -3.156    | -7.029    | 1.960     | -2.934    | 3.192     | 5.284     | 7.502     |
| 云南   | -2.197    | 1.123     | -7.547    | 10.764    | 2.142     | 1.454     | -4.590    | 11.066    | -7.435    | 0.495     |
| 陕西   | 1.269     | -0.132    | 2.677     | -0.617    | 3.197     | 8.426     | -8.910    | -1.162    | 4.546     | 2.901     |
| 甘肃   | -5.499    | 1.817     | 1.822     | -0.262    | -2.122    | 3.858     | -4.169    | -0.098    | 1.410     | 1.001     |
| 青海   | -1.026    | 0.321     | -0.095    | 0.157     | -0.643    | 0.716     | -0.995    | 0.196     | 0.167     | 0.084     |
| 宁夏   | -0.381    | -1.103    | -1.160    | 1.560     | -1.083    | -0.084    | 0.488     | 0.980     | -1.516    | -0.132    |
| 新疆   | 0.228     | -6.719    | 6.488     | 4.331     | 4.328     | -0.587    | 4.998     | -4.029    | -2.659    | -2.278    |
| 全国   | -43.477   | -168.467  | 120.263   | 135.253   | 43.572    | 1.659     | -72.830   | 9.975     | 19.269    | -41.927   |

项目,导致技术和管理水平较高(表现为*SFCP*高)省(市、区)的CO<sub>2</sub>排放比例下降。如浙江省和山东省,2011年CO<sub>2</sub>排放占全国比重在2008年基础上分别下降了4.66和4.42个百分点,对全国建筑业*SFCP*的驱动量分别为-27.969和-34.116元/t CO<sub>2</sub>。

从整个数据期间(2005—2016年)看,技术创新对全国建筑业*SFCP*具有正向的驱动作用,驱动量为43.572元/t CO<sub>2</sub>,为提高中国*SFCP*的主要驱动

力,这与澳大利亚建筑业的情况相一致<sup>[12]</sup>。而地区调整表现出负向的驱动作用,驱动量为-41.927元/t CO<sub>2</sub>,是提高中国*SFCP*的主要阻滞力,这与澳大利亚建筑业地区调整影响很小的结论不同<sup>[12]</sup>,可能主要是因为澳大利亚各个地区的排放量比重相对稳定,而中国因为经济刺激计划的基础设施项目主要投向欠发达地区,导致各省(市、区)CO<sub>2</sub>排放量比重发生较大的变化。

从不同区域看,样本期间,四川省通过技术创新因素对中国建筑业 $SFCP$ 产生的影响量为 $-27.722$ 元/ $t CO_2$ ,为所有省(市、区)中影响最大的省份,这可能与2008年汶川地震后,四川的灾后重建有关系。结合时段看,四川2008—2011年的影响比其他时间段对 $SFCP$ 的影响而言,显著增加,达到了 $-33.964$ 元/ $t CO_2$ ,进一步支持了灾后重建高强度建设施工任务导致技术创新因素负向驱动 $SFCP$ 的判断。广东通过地区调整对 $SFCP$ 的影响量为 $-28.268$ 元/ $t CO_2$ ,是所有省(市、区)中影响量最大的。

样本期间,技术创新和地区调整各自对各省(市、区)建筑业 $SFCP$ 影响的绝对值,以及两个驱动因素影响累加的总体结果见图2。

尽管全国总体的 $SFCP$ 在研究期间有小幅提高,但2个驱动因素影响变化量累加得到的总体结果为负向的省(市、区)更多(18个),正向的省(市、区)只有12个。2个驱动因素驱动各省(市、区)对 $SFCP$ 的驱动方向 and 影响程度表现出显著的差异性,如北京、上海、浙江、山东和广东的技术创新正向驱动 $SFCP$ ,但地区调整则负向驱动 $SFCP$ ,为提高这些省(市、区)的 $SFCP$ ,需要重点关注地区调整的影响;江苏、安徽、福建、河南、重庆、云南和陕西的2个驱动因素对 $SFCP$ 的影响均为正向,应继续维持;而河北、辽宁、黑龙江、青海和宁夏的2个驱动因素均为负向影响,有待改善。

### 3.4 $GTFCP$ 变化的驱动因素实证分析

中国各省(市、区)建筑业 $GTFCP$ 变化的驱动因素情况如表2所示。从表2可以看出,样本期间,技术进步正向驱动全国 $GTFCP$ 的提升,提升量为0.327。而规模效率和管理效率均负向驱动全国 $GTFCP$ 的提升,驱动量分别为 $-0.062$ 和 $-0.120$ 。

从不同时段各影响因素的影响程度看,2011—2014年间,技术进步和管理效率对 $GTFCP$ 变动的影响程度最大,影响量分别为0.233和 $-0.085$ ;2005—2008年间规模效率对 $GTFCP$ 变动的影响程度最大,影响量为 $-0.041$ 。

从不同区域看,样本期间,在技术进步上对 $GTFCP$ 变动的影响程度最大的前3个省依次为江西、江苏和福建,影响量分别为0.599、0.510和0.501;在管理效率上对 $GTFCP$ 变动的影响程度最大的前3个省区依次是贵州、四川和内蒙,影响量分别为 $-0.591$ 、 $-0.443$ 和 $-0.412$ ;在规模效率上对 $GTFCP$ 变动的影响程度最大的前3个省区依次是海南、浙江和宁夏,影响量分别为 $-0.271$ 、 $-0.258$ 和 $-0.245$ 。

2005—2016年间,技术进步、规模效率和管理效率3个驱动因素各自对各省建筑业 $GTFCP$ 的影响量,以及3个驱动因素影响累加的总体结果见图3。2005—2016年间,中国30个省(市、区)中,有22个省(市、区)的 $GTFCP$ 均有所提高,只有8个省(市、区)有所降低。3个驱动因素中,技术进步对除

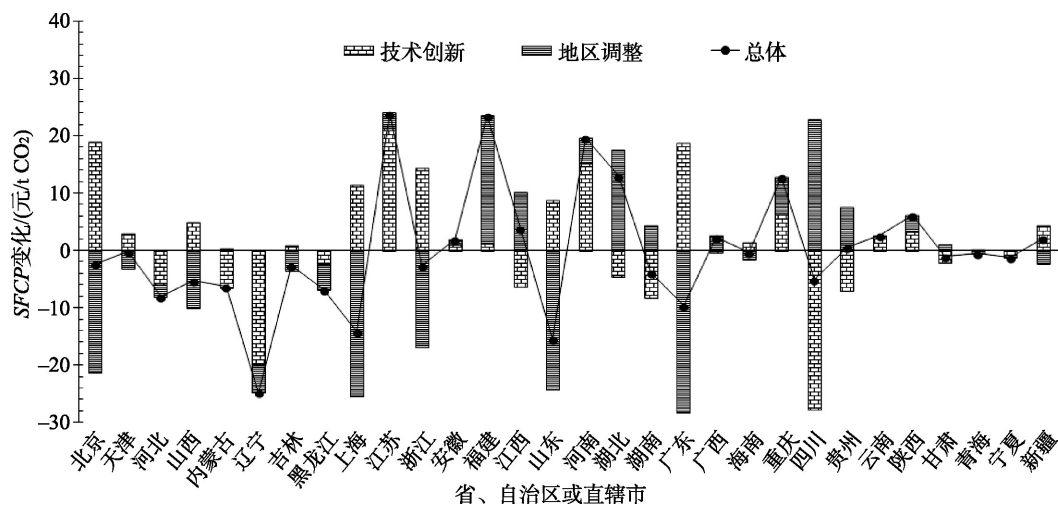


图2 技术创新、地区调整及其累加总体对各省 $SFCP$ 的影响

Figure 2 Effects of technological innovation, regional adjustment and their total on  $SFCP$



2019年7月

表2 2005—2016年技术进步、规模效率和管理效率对GTFCP的影响结果

Table 2 Effects of technological progress, scale efficiency, and management efficiency on GTFCP, 2005-2016

| 驱动因素 | 技术进步          |               |               |               | 规模效率          |               |               |               | 管理效率          |               |               |               |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 时期   | 2005—<br>2008 | 2008—<br>2011 | 2011—<br>2014 | 2014—<br>2016 | 2005—<br>2008 | 2008—<br>2011 | 2011—<br>2014 | 2014—<br>2016 | 2005—<br>2008 | 2008—<br>2011 | 2011—<br>2014 | 2014—<br>2016 |
| 北京   | -0.022        | 0.106         | 0.340         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| 天津   | 0.033         | 0.099         | 0.325         | -0.067        | -0.016        | 0.016         | -0.104        | 0.092         | -0.073        | 0.073         | -0.091        | -0.146        |
| 河北   | -0.156        | 0.245         | 0.090         | 0.042         | -0.077        | 0.076         | -0.052        | 0.027         | 0.364         | -0.502        | 0.053         | -0.031        |
| 山西   | 0.038         | -0.044        | 0.222         | 0.037         | 0.003         | -0.038        | 0.031         | -0.022        | 0.024         | 0.148         | -0.248        | 0.013         |
| 内蒙古  | -0.086        | 0.076         | 0.115         | 0.193         | -0.042        | 0.042         | -0.026        | -0.033        | -0.221        | 0.221         | -0.054        | -0.358        |
| 辽宁   | 0.109         | -0.122        | 0.240         | 0.083         | -0.032        | -0.042        | 0.055         | -0.103        | 0.000         | -0.181        | -0.130        | -0.077        |
| 吉林   | -0.067        | -0.009        | 0.198         | 0.074         | -0.024        | 0.024         | -0.020        | 0.001         | -0.009        | 0.009         | -0.487        | 0.184         |
| 黑龙江  | 0.480         | -0.456        | 0.327         | -0.080        | 0.000         | 0.000         | -0.349        | 0.126         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| 上海   | 0.096         | 0.057         | 0.094         | 0.237         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| 江苏   | 0.107         | -0.049        | 0.216         | 0.236         | -0.205        | 0.205         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| 浙江   | -0.054        | 0.017         | 0.331         | 0.161         | 0.000         | 0.000         | -0.157        | -0.101        | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| 安徽   | -0.021        | -0.048        | 0.368         | 0.064         | -0.042        | 0.044         | -0.021        | -0.001        | 0.057         | -0.016        | -0.273        | 0.064         |
| 福建   | 0.086         | 0.075         | 0.185         | 0.154         | 0.038         | 0.000         | -0.089        | -0.008        | 0.054         | 0.000         | -0.091        | -0.058        |
| 江西   | 0.124         | -0.016        | 0.400         | 0.092         | 0.000         | -0.065        | 0.065         | -0.102        | 0.000         | 0.000         | 0.000         | -0.273        |
| 山东   | 0.069         | -0.147        | 0.273         | -0.035        | -0.287        | 0.166         | -0.024        | 0.084         | 0.000         | 0.000         | -0.045        | -0.015        |
| 河南   | 0.032         | -0.143        | 0.473         | -0.092        | -0.131        | 0.134         | -0.004        | -0.049        | 0.046         | 0.000         | -0.498        | 0.472         |
| 湖北   | -0.028        | 0.059         | 0.172         | 0.034         | -0.054        | -0.035        | -0.059        | 0.115         | 0.155         | -0.054        | -0.130        | 0.000         |
| 湖南   | -0.063        | 0.146         | 0.094         | 0.137         | -0.042        | 0.015         | 0.009         | -0.003        | 0.089         | -0.151        | 0.088         | -0.324        |
| 广东   | -0.009        | 0.010         | 0.192         | 0.030         | -0.057        | 0.043         | -0.024        | 0.102         | 0.122         | -0.062        | 0.062         | 0.000         |
| 广西   | -0.097        | -0.082        | 0.287         | 0.246         | 0.045         | 0.004         | 0.000         | -0.128        | 0.180         | 0.035         | 0.000         | 0.000         |
| 海南   | 0.001         | -0.054        | 0.204         | 0.137         | -0.268        | 0.163         | -0.128        | -0.038        | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| 重庆   | -0.191        | 0.114         | 0.250         | 0.141         | -0.004        | -0.003        | 0.008         | 0.000         | -0.178        | 0.086         | 0.092         | 0.000         |
| 四川   | -0.068        | 0.161         | 0.160         | 0.087         | -0.053        | 0.059         | -0.005        | 0.005         | 0.094         | -0.363        | -0.060        | -0.114        |
| 贵州   | 0.071         | 0.013         | 0.176         | 0.074         | 0.050         | -0.010        | 0.057         | -0.076        | -0.311        | 0.109         | -0.306        | -0.082        |
| 云南   | 0.222         | -0.163        | 0.283         | 0.004         | -0.047        | 0.027         | -0.047        | 0.057         | -0.041        | -0.053        | -0.369        | 0.195         |
| 陕西   | -0.083        | 0.135         | 0.171         | 0.025         | 0.047         | -0.002        | 0.002         | -0.078        | 0.086         | -0.112        | -0.091        | 0.053         |
| 甘肃   | 0.044         | 0.034         | 0.046         | 0.118         | -0.054        | -0.087        | 0.137         | -0.119        | -0.217        | 0.054         | 0.005         | -0.010        |
| 青海   | 0.105         | -0.369        | 0.138         | 0.060         | 0.000         | 0.000         | -0.139        | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| 宁夏   | 0.112         | 0.041         | 0.238         | 0.062         | 0.000         | -0.057        | -0.210        | 0.023         | 0.000         | 0.000         | -0.165        | 0.165         |
| 新疆   | 0.087         | 0.196         | 0.093         | 0.114         | 0.016         | -0.095        | 0.061         | 0.043         | 0.009         | -0.313        | 0.186         | 0.127         |
| 全国   | 0.029         | -0.004        | 0.223         | 0.079         | -0.041        | 0.019         | -0.034        | -0.006        | 0.008         | -0.036        | -0.085        | -0.007        |

青海以外的29个省(市、区)均起到正向促进作用,为主要的正向驱动力,这与Feng等<sup>[18]</sup>研究中国建筑业能源效率驱动因素的结论一致。而管理效率和规模效率对多数省(市、区)的GTFCP的影响均为负向,这与Feng等<sup>[18]</sup>的研究结论认为管理效率也是主要驱动力的结论不符,主要可能是因为Feng等<sup>[18]</sup>的研究中,指标体系、计算模型和CO<sub>2</sub>的测算范围均与本文不同所致。3种驱动因素对各省(市、区)的

影响程度大小各有不同,体现了建筑业在各省(市、区)的情况具有显著的差异,制定提升GTFCP的相关举措时,应考虑各省(市、区)的实际情况,这与Feng等<sup>[18]</sup>和Li等<sup>[33]</sup>的结论一致。

## 4 结论、启示与不足

### 4.1 结论

本文以2005—2016年中国30个省(市、区)的建筑业数据为基础,首先探寻了SFCP和GTFCP之



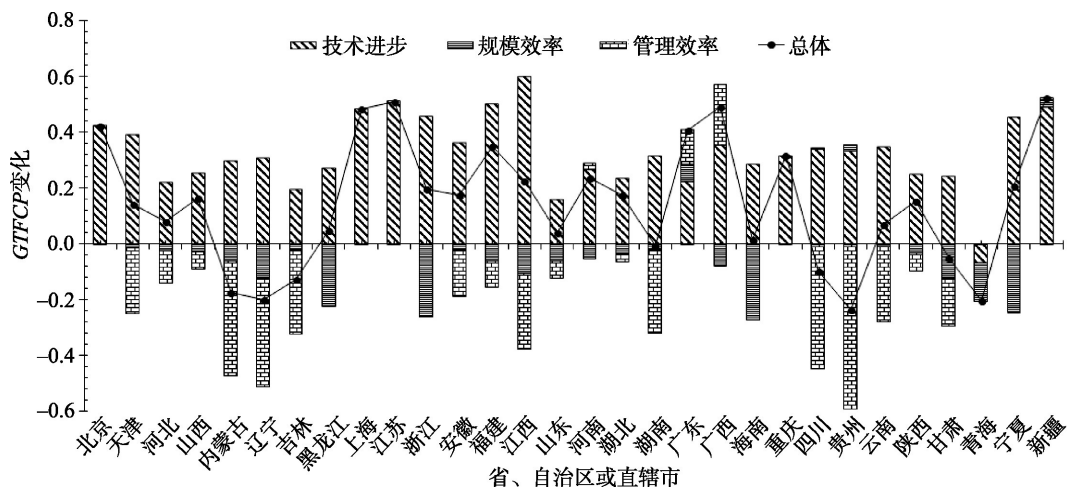


图3 技术进步、规模效率、管理效率及其累加总体对各省 *GTFCP* 的影响

Figure 3 Effects of technological progress, scale efficiency, management efficiency and their total on *GTFCP*

间的关系;然后基于A-LMDI-I分解出驱动*SFCP*的技术创新和地区调整2个因素,并分析其对*SFCP*的影响方向和程度;最后基于测算*GTFCP*的DEA模型,将*GTFCP*分解成技术进步、规模效率、管理效率3个驱动因素,并测算各因素影响方向和程度。主要结论为:

(1)在总体趋势上,中国建筑业的*SFCP*和*GTFCP*之间显著正相关。实证结果支持“*SFCP*变化的驱动因素总体上也驱动*GTFCP*同向变化”的假设。

(2)从全国、全时段看,技术创新正向驱动*SFCP*的提升,而地区调整则是负向的驱动力。分时段看,2008—2011年,技术创新和地区调整2个因素对*SFCP*的影响都是最大的,而且都是*SFCP*提升的负向驱动力,这一时段刚好和“4万亿”经济刺激计划执行期一致,“4万亿”经济刺激计划可能是导致这一时段实证结果的原因。分区域看,四川省的技术创新对*SFCP*的影响最大,而且是*SFCP*提升的负向驱动力量,这可能与汶川地震后大规模的灾后重建有关。

(3)从全国、全时段看,技术进步正向驱动中国建筑业*GTFCP*提升,而管理效率和规模效率则是负向的驱动力。但3个驱动因素在不同时段和不同地区的影响效果不同,比如:技术进步和管理效率在2011—2014年对*GTFCP*的影响最大,而规模效率在2005—2008年对*GTFCP*的影响最大;分区域看,

样本期间,技术进步对江西省的*GTFCP*影响最大、规模效率对海南省的*GTFCP*影响最大,而管理效率对贵州省的*GTFCP*影响最大。

(4)各驱动因素对各省(市、区)的驱动方向和驱动程度差异显著。如*SFCP*方面,技术创新对江苏省是最大的正向驱动力,但对四川省却是最大的负向驱动力;在*GTFCP*方面,技术进步在多数省(市、区)是正向的驱动力,但在青海是负向的驱动力;管理效率在多数省(市、区)是负向驱动力,但在广东和广西却是正向的驱动力。

#### 4.2 管理启示

基于实证研究的分析和以上结论,可得出以下管理启示:

(1)加大研发投入,持续挖掘提升建筑业碳生产率的技术创新潜力。驱动*SFCP*的技术创新因素和驱动*GTFCP*的技术进步因素,主要都是新的科技成果在建筑业生产中应用,从而带来CO<sub>2</sub>排放量的下降。建筑业应贯彻落实国家“十三五”创新驱动战略,提升行业的低碳经济增长动力。

(2)引导省际间技术扩散和技术转移,缩小各省(市、区)之间的碳生产率水平差距。在扶贫攻坚的关键时期和全面实现小康的决胜阶段,为了改善落后地区的基础设施现状,建筑业投入向经济水平落后地区倾斜仍是未来的趋势,缩小*SFCP*之间的差距,可以减缓地区调整对*SFCP*的不利影响;同理,缩小*GTFCP*之间的差距,会减缓管理效率对

2019年7月

*GTFCP*的不利影响,从而达到提高中国建筑业全要素碳生产率,实现建筑业低碳可持续发展的目标。

(3)根据各省(市、区)的驱动因素影响情况,制定相应的提升其建筑业碳生产率的政策举措。由于每个省(市、区)的资源禀赋、建筑业技术和装备水平等各不相同,驱动因素对各省(市、区)*SFCP*或*GTFCP*的影响结果也呈现较大的差异,决策者应根据各省(市、区)情况制定有差异的政策措施。

#### 4.3 不足

实证研究表明,在2008—2011年间,技术创新、地区调整都对*SFCP*具有显著的负向驱动,技术进步对*GTFCP*具有显著的负向驱动,但规模效率对*GTFCP*具有正向的驱动,这和其他时段都有显著差异。在该时段内,为应对全球金融危机的冲击,中国政府于2008年推出了对建筑业有较大冲击的“4万亿”经济刺激计划。作为结果的可能解释,本文提出了一个假设性判断:政府的重大经济刺激计划可能负向驱动建筑业的碳生产率。但因受数据和资料所限,未能对这一判断进行严谨的论证,为本文存在的主要不足。重大经济刺激计划对建筑业碳生产率是否有影响,影响程度如何,以及影响机理等可作为未来的进一步研究方向。

**致谢:**感谢刘晶茹老师及文献[28]的其他作者分享的平板玻璃生产碳排放数据,感谢沈镭老师、高天明老师和文献[29]的其他作者提供的水泥碳排放数据。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘传江,赵晓梦.长江经济带全要素碳生产率的时空演化及提升潜力[J].长江流域资源与环境,2016,25(11):1635-1644. [Liu C J, Zhao X M. Research on spatial-temporal evolution of total factor productivity carbon and potential to increase carbon productivity in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(11): 1635-1644.]
- [2] 唐志鹏,刘卫东,宋涛.基于混合地理加权回归的中国省域碳生产率影响因素分析[J].资源科学,2017,39(12):2223-2232. [Tang Z P, Liu W D, Song T. Factors affecting China's provincial carbon productivity based on mixed geographically weighted regression modeling[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2223-2232.]
- [3] Kaya Y, Yokobori K. Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability[M]. Tokyo: United Nations University Press, 1997.
- [4] 张成,王建科,史文悦,等.中国区域碳生产率波动的因素分解[J].中国人口·资源与环境,2014,24(10):41-47. [Zhang C, Wang J K, Shi W Y, et al. Decomposition on the fluctuation of China's regional carbon productivity growth[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(10): 41-47.]
- [5] 张丽峰.基于DEA模型的全要素碳生产率与影响因素研究[J].工业技术经济,2013,(3):142-149. [Zhang L F. Research of total factor carbon productivity and influence factors based on the DEA model[J]. Industrial Technological Economics, 2013, (3): 142-149.]
- [6] Beinhocker E, Oppenheim J, Irons B, et al. The Carbon Productivity Challenge: Curbing Climate Change and Sustaining Economic Growth[R]. Sydney: McKinsey Global Institute, 2008.
- [7] 李小平,王洋.“一带一路”沿线主要国家碳生产率收敛性及其影响因素分析[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2017,70(3):58-76. [Li X P, Wang Y. A study on the convergence of carbon productivity in the major countries of the Belt and Road and the analysis of its influencing factors[J]. Wuhan University Journal (Social Science), 2017, 70(3): 58-76.]
- [8] 中华人民共和国国家统计局.中华人民共和国2017年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2018-02-28)[2018-07-09]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228\\_1585631.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228_1585631.html). [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. The Statistical Bulletin of the People's Republic of China on National Economic and Social Development in 2017[EB/OL]. (2018-02-28) [2018-07-09]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228\\_1585631.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201802/t20180228_1585631.html).]
- [9] 滕泽伟,胡宗彪,蒋西艳.中国服务业碳生产率变动的差异及收敛性研究[J].数量经济技术经济研究,2017,34(3):78-94. [Teng Z W, Hu Z B, Jiang X Y. Study on the difference and convergence of carbon productivity in China's service industry[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2017, 34(3): 78-94.]
- [10] Wu Y, Chau K W, Lu W S, et al. Decoupling relationship between economic output and carbon emission in the Chinese construction industry[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018, 71: 60-69.
- [11] 冯博,王雪青.中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(4):28-34. [Feng B, Wang X Q. Research on carbon decoupling effect and influence factors of provincial construction industry in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(4): 28-34.]
- [12] Hu X C, Liu C L. Carbon productivity: A case study in the Australian construction industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2354-2362.

- [13] 杜强, 陆欣然, 冯新宇, 等. 中国各省建筑业碳排放特征及影响因素研究[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(10): 1201–1208. [Du Q, Lu X R, Feng X Y, et al. Provincial carbon emissions of China's construction industry: Characteristics and influencing factors[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(10): 1201–1208.]
- [14] 罗剑, 牟绍波, 杨贵中. 基于LMDI I 的我国建筑业动态竞争力实证研究[J]. 宏观经济研究, 2017, (8): 175–181. [Luo J, Mou S B, Yang G Z. An empirical study on the dynamic competitiveness of construction industry in China based on LMDI I[J]. Macroeconomics, 2017, (8): 175–181.]
- [15] Liang L F, Hu X C, Tivendale L, et al. The log mean divisia index based carbon productivity in the Australian construction industry[J]. Construction Economics and Building, 2017, 17(3): 68–84.
- [16] 赵良仕, 孙才志. 基于Global-Malmquist-Luenberger指数的中国水资源全要素生产率增长评价[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1229–1237. [Zhao L S, Sun C Z. Water resource total factor productivity efficiency in China using the Global-Malmquist-Luenberger index[J]. Resources Science, 2013, 35(6): 1229–1237.]
- [17] Feng C, Wang M. Analysis of energy efficiency and energy savings potential in China's provincial industrial sectors[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 1531–1541.
- [18] Feng C, Wang M. The economy-wide energy efficiency in China's regional building industry[J]. Energy, 2017, 141: 1869–1879.
- [19] Liu C. Energy productivity and total-factor productivity in the Australian construction industry[J]. Architectural Science Review, 2015, 99(5): 1–13.
- [20] Oh D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index[J]. Journal of Productivity Analysis, 2010, 34(3): 183–197.
- [21] Farrell M J. The measurement of productive efficiency[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series A (General), 1957, 120(3): 253–290.
- [22] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078–1092.
- [23] Meng M, Niu D X. Three-dimensional decomposition models for carbon productivity[J]. Energy, 2012, 46(1): 179–187.
- [24] Ang B W, Choi K H. Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined divisia index method[J]. Energy Journal, 1997, 18(3): 59–73.
- [25] Ang B W. Decomposition methodology in industrial energy demand analysis[J]. Energy, 1995, 20(11): 1081–1095.
- [26] Zhang P W, You J X, Jia G S, et al. Estimation of carbon efficiency decomposition in materials and potential material savings for China's construction industry[J]. Resources Policy, 2018, 59: 148–159.
- [27] 周媛, 郑丽凤, 周新年, 等. 基于行业标准的木材生产作业系统碳排放[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2014, 15(6): 815–820. [Zhou Y, Zheng L F, Zhou X N, et al. Carbon emission of timber production operating system based on industry standards[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2014, 15(6): 815–820.]
- [28] 严玉廷, 刘晶茹, 丁宁, 等. 中国平板玻璃生产碳排放研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3213–3219. [Yan Y T, Liu J R, Ding N, et al. Investigation on CO<sub>2</sub> emissions from flat glass production in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 3213–3219.]
- [29] Gao T M, Shen L, Shen M, et al. Evolution and projection of CO<sub>2</sub> emissions for China's cement industry from 1980 to 2020[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 522–537.
- [30] Hao H, Geng Y, Hang W. GHG emissions from primary aluminum production in China: Regional disparity and policy implications[J]. Applied Energy, 2016, 166: 264–272.
- [31] Jing R, Cheng J C P, Gan V J L, et al. Comparison of greenhouse gas emission accounting methods for steel production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 83: 165–172.
- [32] 王曦, 陆荣. 危机下四万亿投资计划的短期作用与长期影响[J]. 中山大学学报(社会科学版), 2009, 49(4): 180–188. [Wang X, Lu R. Four trillion investment plan under crisis: Short-term effects and long-term influence[J]. Journal of Sun Yatsen University (Social Science Edition), 2009, 49(4): 180–188.]
- [33] Li W, Sun W, Li G M, et al. Temporal and spatial heterogeneity of carbon intensity in China's construction industry[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 126: 162–173.

## Driving factors of carbon productivity changes in China's construction industry

ZHANG Puwei, JIA Guangshe, HE Changquan, MACKHAPHONH Nikhaphone

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Under the requirements of green development, the driving factors for the change of carbon productivity in China's construction industry should be analyzed in great depth. This study measured single factor carbon productivity (SFCP) and global total factor carbon productivity (GTFCP) of the construction industry in China from 2005 to 2016. Correlation test was used to verify the relationship between SFCP and GTFCP, additive logarithmic mean Divisia index (A-LMDI) method was applied to decompose the driving factors of SFCP changes, and data envelopment analysis (DEA) method was applied to decompose the driving factors of GTFCP changes. The results show that: (1) There is a significant positive correlation between SFCP and GTFCP. (2) Technological innovation was the positive driving force, and regional adjustment was the negative driving force of SFCP. Between 2008 and 2011, technological innovation and regional adjustment had the greatest impact on SFCP. Technological innovation in Sichuan Province and regional adjustment in Guangdong Province had the greatest impact on SFCP. (3) Technological progress was the positive driving force, and management efficiency and scale efficiency were the negative driving forces of GTFCP. Between 2011 and 2014, technological progress and management efficiency had the greatest impact on GTFCP. Between 2005 and 2008, scale efficiency had the greatest impact on GTFCP. Technological progress in Jiangxi Province, scale efficiency in Hainan Province, and management efficiency in Guizhou Province had the greatest impact on GTFCP. Based on the above conclusions, corresponding management implications and limitation were summarized.

**Key words:** carbon productivity; driving factors; LMDI; data envelopment analysis; construction industry; China