

考虑材料投入的建筑业碳生产率及其敛散性

张普伟, 贾广社, 吴陆锋, 徐启雄

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 以 2005—2016 年中国 30 个省的建筑业数据为依据, 识别出主要的二氧化碳(CO₂)排放源, 将其作为投入指标重新构建了评价中国建筑业全要素碳生产率(CI-TFCP)的指标体系. 然后采用数据包络分析和基于生产前沿的收敛检验方法研究了 2005—2016 年各省的 CI-TFCP 指数及其敛散性. 得到以下结论: 中国及其东、中、西部地区的 CI-TFCP 均逐年升高, 东、中、西地区的年均升高率由高到低; 材料和能源消耗强度、科技、教育和能源结构等均可能影响 CI-TFCP 指数; 中国及其东、中、西部各省与最佳生产前沿省份的平均差距, 最佳生产前沿与最差生产前沿省份的差距均逐年扩大. 基于以上结论, 提出了降低材料消耗强度、引导研发投入和促进技术扩散等提高中国 CI-TFCP 的建议.

关键词: 碳生产率; 收敛; 数据包络分析; 建筑业; 中国

中图分类号: F282

文献标志码: A

Carbon Productivity and Its Convergence in Construction Industry by Incorporating Construction Materials as Input Factors

ZHANG Puwei, JIA Guangshe, WU Lufeng, XU Qixiong

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

Abstract: Based on the construction industry data of 30 provinces in China from 2005 to 2016, the main carbon dioxide (CO₂) emission sources were identified and used as input indicators to reconstruct the evaluation indicator system of the construction industry total factor carbon productivity (CI-TFCP). The data envelopment analysis method and convergence test method based on production frontier were used to study the CI-TFCP index and its convergence of the provinces from 2005 to 2016. The conclusions are as follows: CI-TFCP in China and its eastern, central and western regions all increase year by year, with the highest average annual growth rate in the east and the lowest in the west. The

intensity of materials and energy, technology, education, and energy structure may affect the CI-TFCP index. The average gap between China and its eastern, central and western provinces and the best production frontier provinces, and the gap between the best production frontier and the worst production frontier provinces have been expanding year by year. Based on the above conclusions, suggestions have been proposed for improving the CI-TFCP in China by reducing the intensity of materials, directing R&D investment, and promoting technology diffusion.

Key words: carbon productivity; convergence; data envelopment analysis; construction industry; China

全球气候变暖正威胁着人类的生存和发展, 人类活动排放的过量二氧化碳(CO₂)是气候变暖的主要原因. 为了控制气候变化, 地球周围大气层能容纳 CO₂ 的空间(“碳排放空间”)已经成为比劳动和资本还稀缺的资源. 减少 CO₂ 排放已经成为全球共同面临的紧迫任务^[1]. 为了分担全球应对气候变化的压力, 中国政府承诺, 到 2020 年, 单位 GDP 的 CO₂ 排放量在 2005 年的水平上减少 40%~45%^[2]. 建筑业作为中国国民经济和社会发展的支柱产业, 是主要的 CO₂ 排放源, 比如, 2011 年, 中国建筑业排放的 CO₂ 达到 3 035.9 Mt, 占到当年全国排放总量的 33.66%^[3]. 建筑业必需分担相应的 CO₂ 减排目标, 实现低碳和可持续发展的产业转型.

低碳经济是支撑和实现低碳与可持续发展的经济形态, 其实质是在完成 CO₂ 减排目标的同时实现经济增长^[4]. “单位 CO₂ 排放的 GDP 产出”这一“单要素碳生产率”指标^[5], 是连接经济增长与 CO₂ 减排两个目标的桥梁, 但单要素碳生产率不能反映多种投入要素组合可能产生的技术进步等综合效果, 因

收稿日期: 2018-04-08

第一作者: 张普伟(1981—), 男, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为效率与生产率评价、资源与环境管理和工程项目管理.

E-mail: zhang.p.w@163.com

通信作者: 贾广社(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为项目总控、项目管理成熟度和建设工程社会学等.

E-mail: jiagsh803@tongji.edu.cn

此,考虑建筑业生产系统中,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,这一建筑业全要素碳生产率(CI-TFCP)指标更全面、准确.提高建筑业全要素碳生产率是中国建筑业实现低碳和可持续发展的可行路径^[6].

数据包络分析(DEA)方法因为不需要预先设定生产函数,也不需要数据对多量纲归一化处理,能避免因生产函数设置错误或多量纲归一化处理可能造成的偏误,现有文献中的建筑业全要素生产率(或全要素效率)通常用 DEA 方法测算^[7-12].但用 DEA 方法测算建筑业全要素生产率(或全要素效率)的最大分歧在于投入、产出指标的确定^[13].建筑业的一个重要特征是生产的流动性,人员、材料、施工机械等投入资源都随施工对象而流动,主要资源消耗和 CO₂ 排放都发生在施工现场.所以选择评价建筑业全要素碳生产率(或全要素碳效率)时应该把施工现场排放 CO₂ 最多的资源作为投入指标,但现有文献普遍忽视了这一点^[8,12,14].

碳生产率的敛散性作为反映 CO₂ 排放和经济产出的重要动态变化特征指标,可以为低碳发展的政策制定提供决策依据.中国碳生产率的敛散性已被很多学者关注,比如:席建国^[15]、YANG 等^[16]研究了中国各省的全要素碳生产率的敛散性,石蕾和李洋^[17]、HAO 等^[18]研究了中国各省的碳强度(单要素碳生产率的倒数)的敛散性;杨翔等^[19]研究了 1998—2011 年中国 26 个制造行业碳生产率的敛散性、滕泽伟等^[20]研究了 2004—2013 年中国服务行业分行业碳生产率的敛散性.但目前还没有对中国建筑业碳生产率敛散性的研究.另外,根据在多投入多产出背景下,DEA 方法是对具有可比性的同类型单位,也叫生产决策单元(DMU)构成的生产前沿测算相对生产率的原理,Horta 和 Camanho^[21]于 2015 年提出了基于生产前沿面的全要素生产率敛散性检验方法.这里的生产前沿面是指 DMU 的生产可能集的边界^[22],最佳生产前沿面是指由产出与投入之比最大的 DMU 构成的生产可能集边界,最差生产前沿面是指由产出与投入之比最小的 DMU 构成的生产可能集边界.这种检验方法还没有应用于中国的地区或行业的全要素碳生产率收敛性研究.

基于此,本文首先测算中国建筑业主要投入资源的 CO₂ 排放量,找出主要的 CO₂ 排放源,将其作为投入指标重新构建评价中国 CI-TFCP 的指标体系.然后根据 Shephard^[23]的方向距离函数构建测算 CI-TFCP 的 Malmquist 指数模型;参考 Horta 和

Camanho 的敛散性检验算法,构建基于 CI-TFCP 的 $\hat{\sigma}$ 收敛指数模型和 $\hat{\beta}$ 收敛指数模型, $\hat{\sigma}$ 收敛指数用于度量某个时期与上一时期相比,全部 DMU 与最佳生产前沿面上的 DMU 是否更接近; $\hat{\beta}$ 收敛指数用于度量某个时期与上一时期相比,最佳生产前沿面与最差生产前沿面上的 DMU 之间的差距是否在缩小.最后对 2005—2016 年中国各省的建筑业数据进行实证,以期了解这段时间中国的 CI-TFCP 变化特征,为决策者制定提高中国 CI-TFCP 政策、控制中国建筑业 CO₂ 排放提供决策依据.

1 考虑材料投入的指标体系构建

1.1 各项投入资源的二氧化碳排放量测算

首先界定中国建筑业二氧化碳排放的测算范围,然后确定排放 CO₂ 的主要投入资源,并测算 2005—2016 年这些投入资源的累计 CO₂ 排放,为评价指标选取提供依据.

参考冯博等^[24]对建筑业 CO₂ 排放的责任分担机制选择,基于消费侧对 CO₂ 排放量进行测算,即建筑材料生产、火力发电等过程中产生的 CO₂ 归在消耗省份和建筑行业计算.张智慧和刘睿劼^[25]认为,建筑业 CO₂ 排放包括直接排放和间接排放,直接排放是指建筑业直接消耗能源所排放的 CO₂,间接排放是指由建筑业引发的关联行业的 CO₂ 排放.在此基础上,相关学者进一步将中国建筑业的 CO₂ 排放范围界定为建筑业直接消耗能源产生的碳排放与生产钢材、玻璃、水泥、木材和铝材 5 种主要建筑材料的碳排放^[14,26].本文选取建筑业直接消耗的原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、煤矸石、焦炭、焦炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、汽油、煤油、柴油、燃料油、溶剂油、石油焦、液化石油气、其他石油制品、天然气、液化天然气和电力 20 种能源和水泥、钢材、铝材、玻璃、木材 5 种主要建材作为 CO₂ 排放源.

基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)的系数法,第 i 种资源排放的 CO₂ 量如下:

$$E_i = Q_i \times \alpha_i \quad (1)$$

式中: E_i 表示第 i 种资源的 CO₂ 排放量; Q_i 表示第 i 种投入资源的消耗量; α_i 表示消耗第 i 种单位资源排放的 CO₂ 量,即 CO₂ 排放系数.2005—2016 年的建筑业全部能源消耗量源自《中国能源统计年鉴》(2006—2017 年)、5 种材料消耗量源自《中国建筑业统计年鉴》(2006—2017 年).CO₂ 排放系数的确定分 3 类处理:

(1) 非电力能源的碳排放系数用平均低位发热量及其对应的缺省碳排放因子计算,计算依据从《中国能源统计年鉴》、《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南目录》、《公共机构能源消耗统计制度》中取得。

(2) 电力消耗的碳排放系数根据国家发展和改革委员会应对气候变化司发布的《中国区域电网基准线排放因子》确定。

(3) 建筑材料的碳排放系数来源于相关文献的研究成果,具体数值为:水泥 $0.580(t \cdot t^{-1})$ ^[27]、钢材 $1.959(t \cdot t^{-1})$ ^[28]、铝材 $16.500(t \cdot t^{-1})$ ^[29]、玻璃 $34.959(kg \cdot 重量箱^{-1})$ ^[30] 和木材 $10.877(kg \cdot m^{-3})$ ^[31]。

根据以上参数来源测算 2005—2016 年中国大陆 30 个省级区域(西藏因能源数据缺失未计入)的建筑业主要投入资源的累计 CO₂ 排放量见图 1。

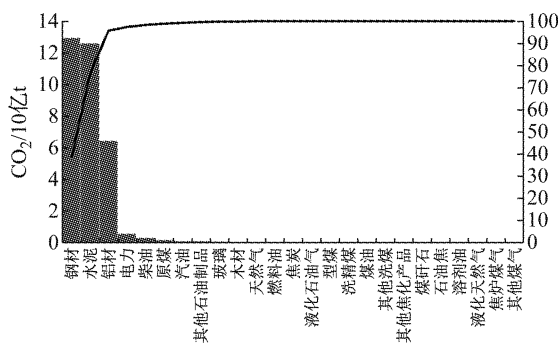


图 1 各项投入的 CO₂ 排放量排列

Fig.1 Arrangement of CO₂ amount for each input

结果表明,钢材消耗的 CO₂ 排放量最大(129.595 亿 t),其次是水泥(126.09 亿 t),第 3 是铝材(64.568 亿 t),第 4 是电力(5.838 亿 t),第 5 是柴油(3.091 亿 t)。钢材、水泥和铝材 3 种建筑材料的 CO₂ 排放量占建筑业全部排放量的 95.70%。

1.2 指标确定及生产过程模型

和所有行业的生产一样,建筑业的生 产也必需具备劳动者和表现为各种劳动资料和劳动对象的资本。在已有的研究文献中,通常用建筑业从业人数或支付给从业人员的报酬(人工工资)表示劳动者。用工资表示劳动者的文献认为,人员工资的多少不仅反映劳动者的数量,也反映了劳动者素质的差异。但由于不存在完美的劳动力市场,工资不能准确反映劳动者素质,而且工资是货币单位,不同时间点的工资量不能直接比较,必须要找到一个平减指数进行转换,可能会导致效率评价的偏误。所以本文选取建

筑业从业人数作为反映劳动者投入要素的指标。

资本这一投入要素的表现更为多样,通常针对不同的评价对象和目的选取不同的具体指标。在建筑业生产率(或效率)评价的已有研究文献中,最常用的是固定资产或总资产,很少有文献把建筑材料作为主要的投入要素,而建筑材料是排放 CO₂ 的主要来源。基于评价单位 CO₂ 排放空间对应的产出能力的评价目的,需要把最主要的 CO₂ 排放源作为投入指标。结合建筑业主要在现场生产的特点,考虑评价模型对指标数量的限制和数据的可得性等原则,把建筑业生产中的资本要素投入用钢筋、水泥、铝材、施工机械和能源 5 个具体指标表示。其中施工机械采用“功率”为单位,规避货币指标平减问题;能源指标把 20 种能源转化成“万吨标准煤”为单位,统一成一个指标。

产出指标使用最多的是建筑业增加值、建筑业总产值、建筑面积等。因为构筑物这种重要的建筑业产品类型不能用面积衡量,所以建筑面积不宜作为主要产出指标。总产值包含了中间生产过程中转移价值的重复计算,不能准确反映建筑业的产出。本文选取建筑业增加值作为期望产出指标。伴随建筑业生产过程而排放的 CO₂ 是目前应对气候变化和要求低碳发展的背景下需要重点关注的非期望产出,由于 CO₂ 排放量耗用了大气层中考虑气候变化条件下可容纳 CO₂ 的有限空间,所以从数量上,CO₂ 排放量等于 CO₂ 排放空间的投入量。评价指标及其对建筑业生产过程模型的刻画如图 2 所示。

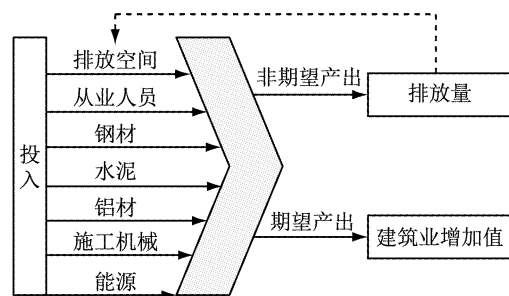


图 2 指标体系及生产过程

Fig.2 Indicators and production process

这一指标体系刻画的建筑业生产过程能更好地体现建筑业的行业特征,因为在建筑业的生产过程中,人工、材料、机械一直被公认是最重要的 3 种投入,这与公认的建筑业生产特征完全吻合,而且投入之间没有重复,能为更准确地测算 CI-TFCP 提供指标基础。

2 方法与模型

基于产出导向的角度和规模报酬不变的原则,采用方向距离函数构建 Malmquist 生产率指数测算模型、 $\hat{\sigma}$ 收敛指数计算模型和 $\hat{\beta}$ 收敛指数计算模型,并构建求解距离函数的数据包括分析(DEA)模型。

2.1 Malmquist 生产率指数测算模型

假定有 n 个生产决策单元(DMU),在 t 时期投入 m 个要素 $x_t \in R_m^+$ 生产出 s 个产出 $y_t \in R_s^+$. 在 $t+1$ 时期投入 m 个要素 $x_{t+1} \in R_m^+$ 生产出 s 个产出 $y_{t+1} \in R_s^+$. t 时期的生产技术 T_t 包含了某一生产过程的所有投入产出组合集合如下:

$$T_t = \{(x_t, y_t) : x_t \text{ 能生产出 } y_t\} \quad (2)$$

参考 Shephard^[23] 的研究,在 t 时期的生产技术条件下,第 j_0 个 DMU 的产出方向距离函数被定义如下:

$$D_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t}) = \min\{\theta : (x_{j_0,t}, y_{j_0,t}/\theta) \in T_t\} \quad (3)$$

式(3)本质上定义了 t 时期的生产技术条件下,第 j_0 个 DMU 的产出 $y_{j_0,t}$ 可以扩大的最大比例。 $\theta \leq 1$, 是 Farrell^[32] 意义上的效率评价值,因为其只与当年的生产决策单元构成的前沿面比较,不考虑跨时间周期的比较,本文将之定义为静态 CI-TFCP. 当 $\theta=1$ 时,表示第 j_0 个 DMU 在最佳生产前沿面上,在现有技术条件下产出不可能被扩大. 类似地,可以定义在 $t+1$ 时期的生产技术条件下,第 j_0 个 DMU 的 t 时期投入产出数据的产出方向距离函数如下:

$$D_{t+1}(x_{j_0,t}, y_{j_0,t}) = \min\{\theta : (x_{j_0,t}, y_{j_0,t}/\theta) \in T_{t+1}\} \quad (4)$$

如果 t 时期和 $t+1$ 时期的生产技术有显著差异,测算 $t+1$ 时期相对于 t 时期的生产率变化情况就不能只以某一个时期的技术为基准,而必须同时兼顾两个时期的生产技术水平. 参考 Caves、Christensen 和 Diewert^[33] 的处理方式,第 j_0 个 DMU 的 $t+1$ 时期相对于 t 时期生产率变化的 Malmquist 生产率指数如下:

$$M = \left[\frac{D_t(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})}{D_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})} \times \frac{D_{t+1}(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})}{D_{t+1}(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

M 大于 1, 说明 $t+1$ 时期的 CI-TFCP 相对于 t 时期有提高, 小于 1 表示降低, 等于 1 表示不变. M

可以进一步分解成效率变化指数与技术变化指数的乘积, 本文中的效率变化指数就是两个时期的静态 CI-TFCP 的比值.

2.2 $\hat{\sigma}$ 收敛指数计算模型

收敛性在发展经济学的文献中被广泛深入研究, 其最先关注的内容是生产率水平低的贫穷国家是否能赶超生产率水平高的富裕国家, 并构建了 σ 收敛和 β 收敛两个经典的收敛模型. 经典的 σ 收敛认为, 如果随着时间的推移, 一组国家的实际人均 GDP 水平之间的差异程度逐年缩小, 说明这组国家是 σ 收敛的, 表示如下:

$$\sigma_{t+1} < \sigma_t \quad (6)$$

式中: σ_t 和 σ_{t+1} 分别指这组国家中各国的 t 时期和 $t+1$ 时期实际人均 GDP 水平取对数后计算的标准差. 本文将 σ 收敛的含义拓展为: 随着时间的推移, 中国大陆 30 个省级区域的静态 CI-TFCP 之间的差异趋向于缩小表示存在 σ 收敛, 扩大表示 σ 发散. 通过方向距离函数的定义可知, 第 j_0 个 DMU 的方向距离函数表示的效率值就是被评价决策单元的静态 CI-TFCP. 因此, 对特定的第 j_0 个 DMU 而言, 式(7)所示的第 $t+1$ 时期的静态 CI-TFCP 与 t 时期静态 CI-TFCP 的比值反映了该决策单元随时间推移与最佳生产前沿面的差距的变化程度, 该比值正是 Malmquist 生产率指数中分解出来的效率变化指数部分, 即

$$E = \frac{D_{t+1}(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})}{D^t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})} \quad (7)$$

为了计算全国或特定地区的省份和最佳生产前沿面省份的静态 CI-TFCP 的差距变化情况, 将全国或某地区包含的全部 DMU 的效率变化结果按式(8)所示求几何平均值, 得到度量全国或某地区的收敛指数. 为了区别于传统的 σ 收敛, 将该收敛指数叫 $\hat{\sigma}$ 收敛指数, 即

$$\hat{\sigma} = \left(\prod_{j=1}^n E_j \right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

式中: $\hat{\sigma}$ 大于 1 表示收敛, 即 $t+1$ 时期相对于 t 时期, 全部 DMU 更接近于最佳生产前沿面; 小于 1 表示发散, 即 $t+1$ 时期相对于 t 时期, 全部 DMU 距离最佳生产前沿面更远; 等于 1 表示总体而言, 两个时期的全部 DMU 与最佳生产前沿面的平均距离相等.

2.3 $\hat{\beta}$ 收敛指数计算模型

经典的 β 收敛认为, 如果贫穷经济体的经济发展速度超过富裕经济体的经济发展速度, 则存在 β 收敛. 如果拥有一组经济体的 t 时期和 $t+1$ 时期实

际人均 GDP(p), β 收敛模型如下:

$$\log\left(\frac{p_{t+1}}{p_t}\right) = \alpha + \beta \log(p_t) + \xi \quad (9)$$

如果 $\beta < 0$, 则存在 β 收敛. 此时意味着 t 时期人均 GDP 高的国家, $t+1$ 时期的人均 GDP 增长速度低于 t 时期人均 GDP 低的国家, 即贫穷经济体会逐步赶超富裕经济体. 为了测算中国各省 CI-TFCP 的 β 收敛, 本文考察 $t+1$ 时期相对于 t 时期最佳生产前沿面和最差生产前沿面的移动情况, 其中最佳生产前沿面和最差生产前面分别代表一个时期静态 CI-TFCP 最高和最低的省份. 如果 $t+1$ 时期最佳生产前沿面上的 DMU 和最差生产前沿面上的 DMU 的静态 CI-TFCP 差距小于 t 时期, 则认为存在 β 收敛. 考虑到两个时期的技术水平差异, 第 j_0 个 DMU 表示的 $t+1$ 时期最佳生产前沿面和最差生产前沿面的距离相对于 t 时期的变化(μ_{j_0}) 如下:

$$\mu_{j_0} = \frac{\left(\frac{D_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})}{D_{t+1}(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})} \times \frac{D_t(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})}{D_{t+1}(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{W_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})}{W_{t+1}(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})} \times \frac{W_t(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})}{W_{t+1}(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

式中: $W_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})$ 是以最差生产前沿面为基准的方向距离函数, 定义了 t 时期的生产技术条件下, 第 j_0 个 DMU 的产出 $y_{j_0,t}$ 可以缩小到最差生产前沿面的最大比例, $W_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t}) \geq 1$, 等于 1 表示该 DMU 位于最差生产前沿面上, 在该技术条件下, 产出不能再被降低. 式 (10) 中等号右边的分子是 Malmquist 生产率指数中分解出来的技术变化(B_{j_0}) 部分, 表示两个时期最佳生产前沿面的变化情况; 类似地, 分母表示两个时期的最差生产前沿面的变化情况(W_{j_0}). 为了度量全国或特定地区 $t+1$ 时期相对于 t 时期最佳生产前沿面和最差生产前沿面间差距的变化情况, 将全国或某地区包含的全部 DMU 按式 (11) 求几何平均得到对应的收敛指数, 为了区别于经典的 β 收敛, 将该收敛指数叫 $\hat{\beta}$ 收敛指数, 即

$$\hat{\beta} = \left(\prod_{j=1}^n \frac{B_j}{W_j}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{\left(\prod_{j=1}^n B_j\right)^{\frac{1}{n}}}{\left(\prod_{j=1}^n W_j\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (11)$$

可以看出, 收敛的条件是看最佳生产前沿面的平均变动量和最差生产前沿面的平均变动量情况. 如果 $\hat{\beta}$ 大于 1, 表示 $t+1$ 时期相对于 t 时期最佳生产前沿面和最差生产前沿面的平均距离变大, CI-TFCP 是发散的; 如果 $\hat{\beta}$ 小于 1, 表示 $t+1$ 时期相对

于 t 时期最佳生产前沿面和最差生产前沿面间平均距离变小, CI-TFCP 收敛; 如果 $\hat{\beta}$ 等于 1, 表示 $t+1$ 时期相对于 t 时期最佳生产前沿面和最差生产前沿面的平均距离相等, 不能确定敛散性.

2.4 求解方向距离函数的 DEA 模型

Malmquist 生产率指数、 $\hat{\sigma}$ 收敛指数和 $\hat{\beta}$ 收敛指数的模型都是用方向距离函数表示的, 为了求解以上模型, 需求解 8 个方向距离函数: $D_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})$ 、 $D_t(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})$ 、 $D_{t+1}(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})$ 、 $D_{t+1}(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})$ 、 $W_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})$ 、 $W_t(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})$ 、 $W_{t+1}(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})$ 、 $W_{t+1}(x_{j_0,t+1}, y_{j_0,t+1})$. 其中前 4 个方向距离函数用模型 (12) 所示的标准 DEA 模型求解, 后 4 个方向距离函数用模型 (13) 所示的反向 DEA 模型求解.

模型 (12) 和 (13) 中, 要求解的变量 v_i 和 u_r 分别是各 DMU 的投入指标 $x_i (i=1, 2, \dots, m)$ 和产出指标 $y_r (r=1, 2, \dots, s)$ 的权重.

$$\begin{aligned} [D_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})]^{-1} &= \min \sum_{i=1}^m v_i x_{j_0,t,i} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_{r=1}^s u_r y_{j_0,t,r} = 1 \\ \sum_{r=1}^s u_r y_{j_0,t,r} - \sum_{i=1}^m v_i x_{j_0,t,i} \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} [W_t(x_{j_0,t}, y_{j_0,t})]^{-1} &= \max \sum_{i=1}^m v_i x_{j_0,t,i} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_{r=1}^s u_r y_{j_0,t,r} = 1 \\ \sum_{i=1}^m v_i x_{j_0,t,i} - \sum_{r=1}^s u_r y_{j_0,t,r} \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ u_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

3 实证研究

以中国大陆 30 个省、自治区和直辖市(统称省, 西藏因数据缺失未包含)的建筑业生产系统为分析对象(即 DMU), 根据 1.2 节确定的投入产出指标, 测算全国和东、中、西部地区各省的 CI-TFCP 指数并计算其 $\hat{\sigma}$ 收敛指数和 $\hat{\beta}$ 收敛指数. 东、中、西部的划分根据 1987 年“制定国民经济与社会发展第 7 个

五年计划的建议”,东部包括广西、天津、广东、辽宁、山东、江苏、海南、福建、上海、河北、北京和浙江 12 个省市;中部包括山西、湖北、吉林、江西、安徽、黑龙江、河南、内蒙和湖南 9 个省;西部包括重庆、宁夏、贵州、甘肃、陕西、云南、青海、四川和新疆 9 个省市。

3.1 数据来源及概况

本文的数据来源均为政府统计主管部门发布的统计年鉴,具体来源如下:建筑业从业人员、建筑业

增加值源自《中国统计年鉴》(2006—2017 年),其中建筑业增加值以各省第二产业 GDP 指数平减到 2005 年不变价格;钢筋、水泥、铝材和机械功率数源自《中国建筑业统计年鉴》(2006—2017 年);能源消耗量源自《中国能源统计年鉴》(2006—2017 年),CO₂ 排放空间按照 1.1 节的测算方法,2005—2016 年的指标数据描述性统计见表 1 所示。

表 1 指标数据的描述性统计

Tab.1 Descriptive statistics of indicator data

指标代码	指标名/单位	极小值	极大值	均值	标准差
X ₁	从业人员/万人	5.484 7	787.233 0	131.248 8	146.281 7
X ₂	水泥/万 t	73.781 3	114 963.556 1	6 038.776 3	10 243.683 5
X ₃	钢材/万 t	20.177 5	15 338.826 9	1 837.606 0	2 335.323 0
X ₄	铝材/万 t	0.327 8	1 716.273 2	108.700 2	190.660 0
X ₅	能源/万 t 标准煤	7.966 6	660.005 6	116.734 1	91.671 6
X ₆	机械/万 kW	15.072 6	5 390.144 8	702.810 4	722.999 5
X ₇	CO ₂ 排放空间/万 t	146.970 9	84 205.965 8	9 266.423 9	12 158.266 8
Y	增加值/亿元	12.918 8	2 990.408 9	495.713 3	501.519 2

为了探索 CI-TFCP 变化的可能原因,还用到源自《中国统计年鉴》(2006—2017 年)的教育经费投入、人均受教育年数、授权专利数、研发人员和经费投入指标。

3.2 全要素碳生产率指数测算结果

求解模型(12)得到各省各年的方向距离函数值,将其代入式(5)计算得到各省各年相对于上一年的 Malmquist 指数。各省按年数求算术平均的结果显示,CI-TFCP 的年均增长率最大的 3 个省份依次是河北(10.12%)、内蒙(9.20%)和宁夏(9.10%),最小的 3 个省份依次是河南(-3.34%)、贵州(-1.38%)和福建(0.40%)。

河北的 CI-TFCP 的年均增长率高可能是因为能源结构快速改善,原煤占建筑业全部能源的比重年均下降率(11.13%)远高于全国(2.10%)。内蒙古 CI-TFCP 的年均增长率较高可能是因为研发投入和教育投入的快速增加,研发投入占 GDP 比重(研发强度)的年均增加率(9.43%),居全国第 2 位;教育经费年均增长率(17.31%),居全国第 5 位。宁夏的 CI-TFCP 年均增长率较高可能是单位建筑业增加值消耗的材料(材料消耗强度)快速降低、科技产出和教育投入快速增加的综合结果,水泥消耗强度的年均增长率(-2.36%)远小于全国(-0.66%),钢材消耗强度年均增长率(-1.53%)也远小于全国(3.04%);授权专利数的年均增长率(47.95%)和教育经费年均增长率(17.57%)均位居全国第 4 位。

河南的 CI-TFCP 年均增长率逐年降低可能是

因为钢材、水泥的消耗强度和单位建筑业增加值消耗的能源(能源消耗强度)快速提升的综合结果,水泥消耗强度年均增长率(14.71%)、钢材消耗强度年均增长率(31.43%)、能源消耗强度年均增长率(1.34%)均远高于全国平均水平。贵州的 CI-TFCP 年均增长率逐年降低可能是因为钢材、能源消耗强度快速提升的综合结果,钢材消耗强度年均增长率(43.66%)、能源消耗强度年均增长率(2.10%)均远高于全国平均水平。福建的 CI-TFCP 年均增长率可能是因为教育方面的原因导致,其教育经费和人均受教育年限的年均增长率分别为 14.07%和 1.31%,都低于对应的全国平均水平。

按照全国和东、中、西部地区包含的省份个数求几何平均,得到中国及其东、中、西部地区各年的 Malmquist 生产率指数结果见图 3 所示。

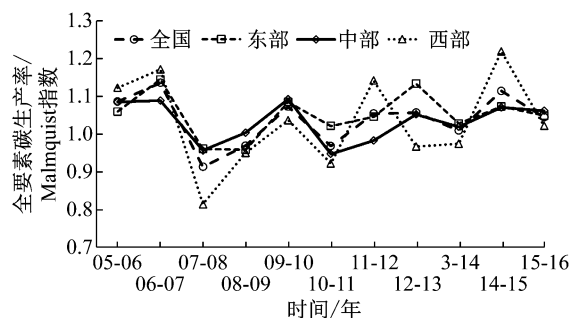


图 3 全要素碳生产率指数

Fig.3 Total factor carbon productivity index

从全国看,年均 Malmquist 指数值(1.039 1)大于 1,说明全国的 CI-TFCP 总体呈现逐年升高的趋

势. 2005—2016 年间, 只有 2008、2009 和 2011 年的 CI-TFCP 指数小于 1, 即只有这三年的 CI-TFCP 在上年的基础上有所下降. 其主要原因可能是因为这三年的材料和能源消耗强度与各自的上一年度相比剧增的结果, 比如 2008 年的水泥、钢材和能源的消耗强度在 2007 年的基础上分别升高 13.92%、35.28% 和 1.79%, 是增幅最大的年份; 铝材消耗强度升高 31.65%, 增幅在各年中位居第 2.

分地区看, CI-TFCP 指数总体呈现东部(年均 1.051 5) 高于中部(年均 1.033 4)、中部高于西部(年均 1.031 8) 的格局. 这也可能主要是由钢筋、水泥、铝材的消耗强度和科技人员的投入造成的, 东、中、西部地区的钢筋消耗强度年均升高率分别是 1.29%、2.29% 和 7.85%, 水泥消耗强度年均升高率分别是 -0.63%、0.20% 和 0.95%, 铝材消耗强度年均升高率分别是 4.98%、9.74% 和 12.47%, 材料消耗强度的年均升高率越小, 对应地区的 CI-TFCP 年均增长率越大; 东、中、西部地区的科研人员投入的年均增长率分别是 10.99%、8.46% 和 7.16%, 科研人员投入的年均增长率越大, 对应地区的 CI-TFCP 年均增长率越大.

3.3 $\hat{\sigma}$ 收敛指数结果

求解模型(12)得到各省各年的方向距离函数值, 将其代入式(7)计算得到各省各年相对于上一年的效率变化指数. 按照式(8)求得全国和东、中、西部地区的 $\hat{\sigma}$ 收敛指数结果见图 4 所示.

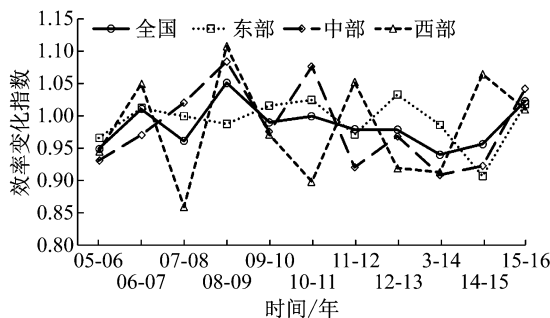


图 4 $\hat{\sigma}$ 收敛指数(效率变化指数)

Fig. 4 $\hat{\sigma}$ -convergence (efficiency change) index

$\hat{\sigma}$ 收敛指数的实证结果表明, 2005—2016 年间, 全国年均指数(0.985 7) 小于 1, 全国各省的静态 CI-TFCP 与最佳生产前沿面省份的静态 CI-TFCP 的平均差距逐年增加, $\hat{\sigma}$ 发散. 由于 CI-TFCP 是 $\hat{\sigma}$ 收敛指数与技术进步指数的乘积, 全国年均 $\hat{\sigma}$ 收敛指数小于 1, 而全国年均 CI-TFCP 指数大于 1, 说明在样本期间, 促进 CI-TFCP 提升的主要驱动力来自于技术进步. 通过缩小各省与生产前沿面省份的差距提升

CI-TFCP 具有很大潜力, 是未来提升 CI-TFCP 需要重点考虑的路径之一.

分地区看, 东、中、西部地区的年均 $\hat{\sigma}$ 指数分别是 0.993 2、0.984 0 和 0.9813, 离散程度呈现出西部大于中部, 中部大于东部的格局, 三个地区都是 $\hat{\sigma}$ 发散的. 这一格局与 CI-TFCP 指数呈现的一致, $\hat{\sigma}$ 指数低的地区, CI-TFCP 指数也低, 说明 $\hat{\sigma}$ 指数对 CI-TFCP 指数有很大的影响. 再一次说明, 缩小各地区包含的各省份与最佳生产前沿省份的差距也是提高各地区 CI-TFCP 的有效路径.

3.4 $\hat{\beta}$ 收敛指数结果

求解模型(12)和模型(13)分别得到最佳生产前沿距离函数和最差生产前沿距离函数的值, 将其代入式(10)得到各省各年相对于上一年的最差生产前沿面和最佳生产前沿面省份的静态 CI-TFCP 的差距变化指数, 按照式(11)的方法计算全国和东、中、西部地区的 $\hat{\beta}$ 收敛指数, 结果见图 5 所示.

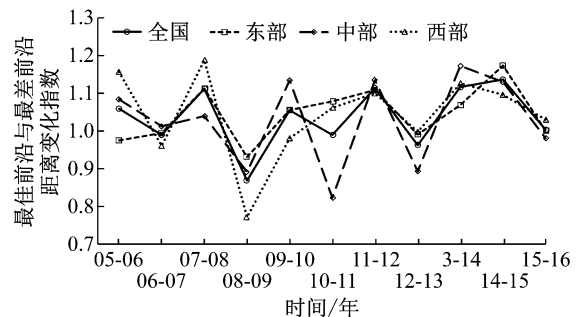


图 5 $\hat{\beta}$ 收敛指数

Fig. 5 $\hat{\beta}$ -convergence index

$\hat{\beta}$ 收敛指数的测算结果表明, 2005—2016 年间, 全国年均指数(1.0369) 大于 1, 全国效率最好的省份和效率最差的省份之间的差距逐年拉大, $\hat{\beta}$ 发散. 分地区看, 东、中、西部地区的年均 $\hat{\beta}$ 收敛指数分别是 1.044 4、1.026 8 和 1.042 6, 均大于 1, 意味着东、中、西部地区中最佳生产前沿和最差生产前沿之间的差距都逐年拉大, 呈 $\hat{\beta}$ 离散趋势; 离散程度呈现出东部大于西部、西部大于中部的格局. 这与席建国^[15] 的全国和东部地区碳排放效率存在绝对 β 收敛的研究结果不一致, 说明建筑业具有显著的行业特点, 不能以地区总体碳排放效率的收敛性特点作为制定建筑业行业低碳政策的依据.

东部地区呈现出一个特别的情况, 在东、中、西三大地区中, 东部地区的 $\hat{\sigma}$ 离散程度最小, 但 $\hat{\beta}$ 离散程度最大. 这是因为 $\hat{\beta}$ 收敛指数表示的是“极差”差

距的含义,而 $\hat{\sigma}$ 收敛指数表示“平均”差距的含义. 东部地区的 $\hat{\sigma}$ 离散程度最小,表明东部地区包含的各省份与生产前沿面省份的“平均”距离增大率在三大地区中最小;东部地区 $\hat{\beta}$ 离散程度最大,表示东部地区包含的省份中,静态 CI-TFCP 最高和最低的差值逐年增加率,即“极差”距离增大率在三大地区中最大. 各省份各年的方向距离函数测算结果表明,东部的河北省和海南省的多数年份均在最差生产前沿面上,北京市和上海市的全部年份都在最佳生产前沿面上,说明北京、上海等最佳生产前沿面省份生产前沿面推进的速度大于河北、海南等最差生产前沿面省份的生产前沿面推进的速度,导致差距快速拉大超过另外两个地区.

4 结论、建议与未来研究方向

为了准确测算中国 CI-TFCP,了解中国 CI-TFCP 的动态变化特征,本文首先把 CO₂ 排放量最多的钢材、水泥和铝材三种主要建筑材料作为投入指标重新构建了评价指标体系;然后基于 DEA 求解的方向距离函数和多投入多产出背景下收敛性评估的非参数算法,构建测算 CI-TFCP 的 Malmquist 生产率指数模型、 $\hat{\sigma}$ 收敛指数模型和 $\hat{\beta}$ 收敛指数模型;最后对 2005—2016 年间中国各省建筑业的数据进行实证,得到如下主要结论:

(1) 钢材、水泥和铝材三种建筑材料消耗引发的间接 CO₂ 排放量占建筑业全部排放量 95.70%. 这三种材料的消耗强度可能是影响中国 CI-TFCP 的主要因素之一.

(2) 中国及其东、中、西部地区的 CI-TFCP 均逐年提高. 全国年均提高 3.91%,东部地区年均提高率 (5.15%) 高于中部 (3.34%)、中部高于西部 (3.18%). CI-TFCP 在三个地区的分布格局可能是由钢筋、水泥、铝材消耗强度和科技人员投入年均增长率综合决定的.

(3) 各省的能源结构、材料和能源消耗强度、研发人员投入、研发资金投入、授权专利数、教育经费投入、人均受教育年限等均可能是影响中国 CI-TFCP 指数变化的因素.

(4) 中国及其东、中、西部地区均不存在 $\hat{\sigma}$ 收敛,而呈 $\hat{\sigma}$ 发散趋势. 各省与最佳生产前沿面省份的平均差距逐年增大,全国年均扩大率 1.43%,西部年均扩大率 (1.87%) 大于中部 (1.60%)、中部大于东部 (0.68%). 样本期间,促进 CI-TFCP 提升的主要驱

动力来自于技术进步. 通过缩小各省与生产前沿面省份的差距提升 CI-TFCP 仍具有很大潜力.

(5) 中国及其东、中、西部地区均不存在 $\hat{\beta}$ 收敛,而呈 $\hat{\beta}$ 发散趋势. 最佳生产前沿面和最差生产前沿面之间的差距逐年扩大,全国年均扩大率 3.69%,东部年均扩大率 (4.44%) 大于西部 (4.26%)、西部大于中部 (2.68%). 最佳生产前沿面上的北京、上海与最差生产前沿面上的河北、海南的差距快速扩大需要得到特别关注.

基于以上结论,为提高中国 CI-TFCP,提出以下建议:

(1) 降低建筑材料消耗强度. 比如采用更优的设计方案减少材料消耗,大力推广使用建筑信息模型(BIM)技术和预制装配技术减少施工过程中的材料损耗等. 这一建议在材料消耗强度逐年升高率最大的西部地区更需要被强调.

(2) 加强低碳建筑材料和低碳建造技术的研发投入. 建设行政主管部门应与相关政府行政部门协调,从税收优惠等政策层面引导相关生产和研究单位投入人力、财力研究开发新型低碳建筑材料和低碳建造技术. 继续推动生产前沿面往外逐年扩展,发挥技术进步的引领作用,促进 CI-TFCP 持续提高.

(3) 促进低碳建筑材料的推广使用和低碳建造技术有效扩散. 减小各省份与生产前沿省份的差距,从提高效率变化指数的角度,促进 CI-TFCP 的持续提高. 尤其是东部地区的河北省和海南省等在最差生产前沿面上的省份,从北京、上海等最佳生产前沿省份引入和吸收先进的低碳建造技术并推广低碳建筑材料的使用,缩小最差生产前沿和最佳生产前沿之间的差距需要被强调.

基于本文现有的工作,有以下三个方向可以继续深入探索:

(1) 中国各省的 CI-TFCP 是否存在收敛俱乐部. 本文对 $\hat{\sigma}$ 收敛和 $\hat{\beta}$ 收敛指数测算的结果均显示发散,但可能存在某几个省收敛于一个稳定的 CI-TFCP 水平的情况,此时这几个省被定义为一个收敛的俱乐部. 对相同俱乐部的省份可能可以有针对性地制定相关低碳政策.

(2) 影响 CI-TFCP 的因素及影响机制. 本文只是根据 CI-TFCP 指数变化的可能影响因素做了一些解释性描述,系统的影响因素识别和影响机制可以进一步深入研究,以为制定提高 CI-TFCP 的对策提供依据.

(3) 考虑 GDP 和 CO₂ 排放作为目标的材料消耗

结构优化研究. 建筑材料消耗诱发了主要的建筑业碳排放,不同建筑材料之间具有一定程度的替代性,以各省实际消耗量为约束条件,以GDP和CO₂排放为综合优化目标,可以为宏观材料消耗调控提供政策依据.

致谢:感谢沈镛、高天明及文献[27]的其他作者提供的水泥碳排放成果数据,感谢刘晶茹及文献[30]的其他作者分享的平板玻璃生产碳排放成果数据,感谢俞安愚、陈进道对初稿提出的修改完善建议.

参考文献:

- [1] SONG M, GUO X, WU K, *et al.* Driving effect analysis of energy-consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta Region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 620.
- [2] ZHANG Z. Assessing China's carbon intensity pledge for 2020: stringency and credibility issues and their implications [M]. Honolulu: East-West Center, 2011.
- [3] CHEN J, SHEN L, SONG X, *et al.* An empirical study on the CO₂ emissions in the Chinese construction industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 645.
- [4] 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.
LIU Chuanjiang, ZHAO Xiaomeng. 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.
- [5] KAYA Y, YOKOBORI K. Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability [M]. Tokyo: United Nations University Press, 1997.
- [6] 查建平,范莉莉,高敏. 中国工业碳排放经济绩效及其影响因素研究[J]. *软科学*, 2014, 28(11): 30.
ZHA Jianping, FAN Lili, GAO Min. Research on economic performance of industrial carbon emissions of China and its affecting factors [J]. *Soft Science*, 2014, 28(11): 30.
- [7] 谭丹,王广斌,曹冬平. 建筑业全要素生产率的增长特征及其影响因素[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(12): 1901.
TAN Dan, WANG Guangbin, CAO Dongping. Growth characteristics and impacting factors of the total factor productivity in the construction industry [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(12): 1901.
- [8] 程敏,朱航. 碳排放约束下中国建筑业环境效率研究[J]. *管理现代化*, 2017, 37(6): 69.
CHENG Min, ZHU Hang. Research on environmental efficiency of China construction industry under carbon emission constraints [J]. *Modernization of Management*, 2017, 37(6): 69.
- [9] 李忠富,王汇墨. 基于DEA的中国建筑业生产效率实证研究[J]. *系统管理学报*, 2011, 20(3): 307.
LI Zhongfu, WANG Huimo. A study on production efficiency of Chinese construction industry based on DEA [J]. *Journal of Systems & Management*, 2011, 20(3): 307.
- [10] 王雪青,姜香珍,杨秋波. 中国建筑业能源效率省际差异及其影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(2): 56.
WANG Xueqing, LOU Xiangzhen, YANG Qiubo. Inter-provincial difference in energy efficiency of construction industry and its influencing factors in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(2): 56.
- [11] 刘睿劼,张智慧. 环境约束下的中国内地建筑业效率地区差异评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2014, 54(8): 1057.
LIU Ruijie, ZHANG Zhihui. Assessment of regional disparities in Mainland China's construction sector efficiency due to environmental constraints [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2014, 54(8): 1057.
- [12] 陆宁,杨文君,丁荣,等. 2008—2012年中国30个省域建筑业碳排放效率评价[J]. *资源开发与市场*, 2015, 31(6): 718.
LU Ning, YANG Wenjun, DING Rong, *et al.* Study on diversity analysis and research into carbon efficiency of construction industry in China's 30 provinces from 2008 to 2012 [J]. *Resource Development & Market*, 2015, 31(6): 718.
- [13] 刘炳胜,陈晓红,王雪青,等. 中国区域建筑产业TFP变化趋势与影响因素分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(4): 1042.
LIU Bingsheng, CHEN Xiaohong, WANG Xueqing, *et al.* Analysis on the changing trend and influencing factors of TFP about the regional construction industry in China [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(4): 1042.
- [14] 冯博,王雪青. 中国建筑业能源经济效率与能源环境效率研究—基于SBM模型和面板Tobit模型的两阶段分析[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2015, 17(1): 16.
FENG Bo, WANG Xueqing. Empirical research on energy economic efficiency and energy environmental efficiency of China's construction industry: based on the SBM-tobit two-stage model [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2015, 17(1): 16.
- [15] 席建国. 我国碳排放效率的区域动态差异、收敛性及及时变因素分析[J]. *地域研究与开发*, 2013, 32(5): 83.
XI Jianguo. Analysis on regional dynamic difference, convergence and time-varying influencing factors of carbon emission efficiency [J]. *Areal Research and Development*, 2013, 32(5): 83.
- [16] YANG J, ZHANG T F, SHENG P F, *et al.* Carbon dioxide emissions and interregional economic convergence in China [J]. *Economic Modelling*, 2016, 52: 672.
- [17] 石蕾,李洋. 中国区域经济增长的碳排放强度差异及其收敛性[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2013, 15(2): 34.
SHI Lei, LI Yang. Research on the difference of carbon emission intensity and the convergence in the regional economic growth in China [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2013, 15(2): 34.
- [18] HAO Y, LIAO H, WEI Y M. Is China's carbon reduction target allocation reasonable? An analysis based on carbon intensity convergence [J]. *Applied Energy*, 2015, 142: 229.

- [19] 杨翔, 李小平, 周大川. 中国制造业碳生产率的差异与收敛性研究 [J]. 数量经济技术经济研究, 2015(12): 3.
YANG Xiang, LI Xiaoping, ZHOU Dachuan. Study on the difference and convergence of carbon productivity in Chinese manufacturing [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2015(12): 3.
- [20] 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(3): 78.
TENG Zewei, HU Zongbiao, JIANG Xiyuan. Study on the difference and convergence of carbon productivity in China's service industry [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2017(3): 78.
- [21] HORTA I M, CAMANHO A S. A nonparametric methodology for evaluating convergence in a multi-input multi-output setting [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 246(2): 554.
- [22] 闫庆友, 陶杰, 姚鑫. 利用旋转算法构建 DEA 模型生产前沿面 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 94.
YAN Qingyou, TAO Jie, YAO Xin. Rotation algorithm on constructing DEA production frontier [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(1): 94.
- [23] SHEPHARD R W. Theory of cost and production functions [M]. Princeton: Princeton University Press, 1970.
- [24] 冯博, 王雪青, 刘炳胜. 考虑碳排放的中国建筑业能源效率省际差异分析 [J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1258.
FENG Bo, WANG Xueqing, LIU Bingsheng. Provincial variation in energy efficiency across China's construction industry with carbon emission considered [J]. Resources Science, 2014, 36(6): 1258.
- [25] 张智慧, 刘睿劼. 基于投入产出分析的建筑业碳排放核算 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(1): 53.
ZHANG Zhihui, LIU Ruijie. Carbon emission in construction sector based on input-output analyses [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(1): 53.
- [26] JIANG R, LI R R. Decomposition and decoupling analysis of life-cycle carbon emission in China's building sector [J]. Sustainability, 2017, 9(5): 5.
- [27] GAO T, SHEN L, SHEN M, *et al.* Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020 [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 531.
- [28] 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, 83:171.
- [29] 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.
- [30] 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): 3217.
YAN Yuting, LIU Jingru, DING Ning, *et al.* Investigation on CO₂ emissions from flat glass production in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 3217.
- [31] 赵守清. 试析基于行业标准的木材生产作业系统碳排放 [J]. 花卉, 2016(4): 48.
ZHAO Shouqing. Analysis on carbon emission of wood production system based on industry standard [J]. Flowers, 2016(4): 48.
- [32] FARRELL M J. The measurement of productive efficiency [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series A (General), 1957, 120(3): 253.
- [33] CAVES D W, CHRISTENSEN L R, DIEWERT W E. The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity [J]. *Econometrica*, 1982, 50(6): 1393.