中国区域全要素二氧化碳排放绩效及收敛性分析

杜慧滨, 王洋洋
(天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 在全要素框架下, 采用基于松弛变量测度的DEA模型, 构造全要素CO_2排放绩效指标(TFCPI), 评价了1997—2009年我国29个省市的CO_2排放绩效及其减排潜力, 并分析了我国整体及东部、中部、西部和东北四大区域CO_2排放绩效的差异变化. 结果表明, 我国整体的CO_2排放绩效水平持续提高, 但地区差异显著, 呈现了由东南沿海向西北内陆递减的分布特征. 我国整体和四大区域的CO_2排放绩效皆有显著的绝对收敛和条件收敛的趋势. 河北、河南、山东、内蒙古、山西、安徽和辽宁是中国CO_2减排潜力最大的省份.

关键词: 二氧化碳; 排放绩效; SBM-DEA; 收敛性
中图分类号: F205; F062.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000−5781(2013)02−0256−09

Total-factor CO_2 emission performance and the convergence hypothesis in China

Du Huibin, Wang Yangyang
(College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Under a total-factor framework, this paper constructs an SBM-DEA model and an index of total-factor CO_2 emission performance (TFCPI) to investigate the CO_2 emission performances and potential CO_2 emission reductions of 29 provinces in China during 1997—2009. Then, this paper respectively analyzes the change in regional disparities of CO_2 emission performances for the east, middle, west, northeast part of China, and the national level. The results show that China has experienced a continuing increase in CO_2 emission performance during the sample period. However, the regional disparities are apparently declining from the southeast coastal areas to the northwest inland areas. There are both absolute and conditional convergence in the east, middle, west, northeast, and the national level. Hebei, Henan, Shandong, Inner Mongolia, Shanxi, Anhui and Liaoning have the most potentials in CO_2 emission reductions in China.

Key words: carbon dioxide(CO_2); emission performance; SBM-DEA; convergence

1 引 言

中国正处于加速工业化与城市化的发展进程中, 面临着经济、能源和环境协调发展的压力, 能源节约和温室气体减排已成为中国可持续发展规划的重点内容. 2009年中国在《中国应对气候变化国家方案》中确立了到2020年单位GDP温室气体排放比2005年下降40%–45%的行动目标, 并将其作为约束性指标纳入国民经济和社会发展的中长期规划; 在十二五规划中, 中国亦设定了单位GDP能耗和单位GDP碳排放分别降低16%和17%的目标. 为了我国整体上实现温室气体减排承诺, 为各省市设定合理的减排目标, 科学评价中

收稿日期: 2012−08−16; 修订日期: 2012−11−05.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71273185).

国区域二氧化碳的排放绩效和减排潜力, 不但可以从宏观上了解 CO_2排放的区域差异和变化规律, 还可以为国家制定节能减排政策提供参考.

碳排放绩效作为环境绩效评价的一个方面, 随着世界各国对气候变化的关注, 已经成为研究的热点. 国别排放指标, 即以国家为单元进行排放量计算, 是最早被应用的温室气体排放评价指标, 在《京都议定书》中被用来规定各国的减排义务. 此后, 很多学者提出不同的指标或方法来评价碳排放绩效, 如碳化指数(单位能源消耗的碳排放量) [1]、能源强度(单位 GDP 的能源消费量) [2]、碳排放强度(单位 GDP 的碳排放量) [3]、人均碳排放指标、工业化累计人均碳排放量和人均单位 GDP 排放量等单因素指标 [4]. 然而, 碳排放是能源消费和经济发展等多种要素共同作用的结果, 单以碳排放总量与某一要素的比值来表示碳排放绩效, 并不能全面反映宏观经济活动中碳排放的真实绩效. 因此, 越来越多的学者将 CO_2排放纳入到全要素分析框架中以研究其排放绩效. 其中数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)是一种基于多投入多产出的非参数前沿分析方法, 用于考察被评价对象的相对效率, 近年来已被广泛应用于能源和环境绩效的评价研究中 [5].

传统的DEA 模型无法直接用于含有如 CO_2排放等非期望产出的效率评价问题, 因此大部分学者采用具有产出弱可处置性的环境 DEA 技术 [6−9]、方向距离函数 [8,10,11]、非期望产出的线性变换法 [12]以及非期望产出的投入法或倒数转换法等. 少数学者对上述方法进行了改进, 如 Zhou 等 [13]提出了基于松弛变量测度(slacks-based measure, SBM)的环境 DEA 模型, 并对 30 个 OECD 国家的 CO_2排放绩效进行了宏观评价. 李涛等 [14]采用基于非意愿变量(non- discretionary)的 Ruggiero 三阶段模型对 1998—2008 年我国 29 个省级地区进行评价, 得到生产过程中给定各种投入要素和产出水平下实现碳排放污染最小化的效率指标. 在考察效率动态变化方面, 多数学者利用 DEA 模型构建 Malmquist-Luenberger(ML)指数 [6,7,9], 并将其分解成技术进步指数和技术效率变化指数进行绩效的动态评价; 其中尤建新等 [10]扩展了 ML 指数, 运用 sequential Malmquist-Luenberger 指数对我国 1998—2009 年省域连续性 CO_2排放绩效进行了测算. 在对 CO_2排放绩效和 ML 指数评价的基础上, 大多数学者对造成 CO_2排放绩效变动或区域差异的因素进行了分析 [6,7,9]. 除此之外, Guo 等 [9]采用环境 DEA 方法, 对 2005—2007 年我国省级地区的 CO_2排放绩效进行评价, 同时量化了节能技术改进和能源结构调整对碳减排的推动作用. 刘明磊等 [11]在能源消费结构约束下, 利用基于 DEA 的方向距离函数方法, 研究了我国省级地区 CO_2排放绩效水平和 CO_2边际减排成本.

从研究方法来看, 现有文献在测度全要素 CO_2排放绩效时主要运用了环境 DEA 技术或方向距离函数. 然而, 环境 DEA 技术并没有充分考虑投入要素和期望产出的松弛问题, 因此在调整非期望产出至最小水平的时候(环境上有效), 还存在投入要素可减少或期望产出可增加的可能, 即通过环境 DEA 技术评价出的最优决策单元在经济上并不一定完全有效 [13]. 同样, 方向距离函数也未能充分考察所有要素的松弛问题, 并且可能由于径向及产出角度的选择而带来偏差. 此外, 通过线性变换法或倒数转换法, 将非期望产出作为期望产出的处理方法由于违背了实际的生产过程, 因此其效率评价也可能是有偏的. 相比而言, 基于松弛变量测度的DEA模型由于将生产要素的松弛变量直接放入目标函数中, 能够识别任何生产要素的无效性, 因此具有很强的鉴别能力.

经济、能源和环境三者的协调发展要既求经济持续增长, 同时又要保证能源供应和减少碳排放. 目前已有较多研究表明我国经济发展与能源需求、环境效益存在着双向因果关系, 开发经济–能源–环境(economy-energy-environment, 3E)系统模型已经迫在眉睫 [15]; 而科学合理的 CO_2排放绩效应该能够反映中国3E系统的协调发展程度, 这也是本文所定义的全要素 CO_2排放绩效所具有的特征. 因此, 本文假定在生产可能集下, 无效的经济体只有在其投入和非期望产出缩减至最小, 同时期望产出扩张至最大时才为有效.

本文尝试采用 Tone [16]提出的考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型, 在完全有效的前提假设下, 测度我国 29 个省级行政区域(包括直辖市和自治区, 以下简称省市; 本文不考虑西藏和港澳台地区, 并将重庆市并入四川省)在 1997—2009 年间的全要素 CO_2排放绩效, 并在此基础上考察区域 CO_2排放绩效的变动趋势和收敛特征.

2 全要素 CO_2 排放绩效指标的构造

2.1 基于 SBM-DEA 模型的指标构造

Tone 通过对文献[17]的 SBM-DEA 模型加以改进, 提出了考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型. 改进后的模型与传统的 CCR 和 BCC 模型的不同之处在于, 它把所有的松弛变量直接放入目标函数中. 这一方面解决了投入和期望产出的松弛性问题, 另一方面也解决了非期望产出存在下的效率测度问题. 该方法能够识别所有生产要素的非有效性, 因此可以被理解为是一种基于利润最大化的分析技术. 本文采用了基于非期望产出的 SBM-DEA 模型构造 CO_2排放绩效指标. 假定生产系统有 N 个决策单元(decision making unit, DMU),每个 DMU 都有投入、期望产出和非期望产出三个向量, 分别表示成 $\boldsymbol{x} \in R^M, \boldsymbol{y} \in R^K, \boldsymbol{u} \in R^L$, 投入产出矩阵为 $\boldsymbol{X} = (x_{mn}) \in R^{M\times N}, \boldsymbol{Y} = (y_{kn}) \in R^{K\times N}, \boldsymbol{U} = (u_{ln}) \in R^{L\times N}$, 并且 $\boldsymbol{X} > \boldsymbol{0}, \boldsymbol{Y} > \boldsymbol{0}, \boldsymbol{U} > \boldsymbol{0}$.

假定规模报酬不变情况下的生产可能集为

$$P = \{(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{u}) \,|\boldsymbol{x} \geqslant \boldsymbol{X\lambda}, \boldsymbol{y} \leqslant \boldsymbol{Y\lambda}, \boldsymbol{u} \geqslant \boldsymbol{U\lambda}, \boldsymbol{\lambda} \geqslant \boldsymbol{0}\}, \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{\lambda}$ 为 $N \times 1$ 的常向量.

对于决策单元 $\mathrm{DMU}_0(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{y}_0, \boldsymbol{u}_0)$, 非期望产出的 SBM-DEA 模型为

$$\begin{cases} \mathrm{Min}\ \rho = \dfrac{1 - \dfrac{1}{M}\displaystyle\sum_{m=1}^{M}\dfrac{s_m^-}{x_{0m}}}{1 + \dfrac{1}{K+L}\left(\displaystyle\sum_{k=1}^{K}\dfrac{s_{\mathrm{g}k}^+}{y_{0k}} + \sum_{l=1}^{L}\dfrac{s_{\mathrm{b}l}^-}{u_{0l}}\right)} \\ \mathrm{s.t.} \\ \quad \boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{X\lambda} + \boldsymbol{s}^- \\ \quad \boldsymbol{y}_0 = \boldsymbol{Y\lambda} - \boldsymbol{s}_{\mathrm{g}}^+ \\ \quad \boldsymbol{u}_0 = \boldsymbol{U\lambda} + \boldsymbol{s}_{\mathrm{b}}^- \\ \quad \boldsymbol{s}^- \geqslant \boldsymbol{0}, \boldsymbol{s}_{\mathrm{g}}^+ \geqslant \boldsymbol{0}, \boldsymbol{s}_{\mathrm{b}}^- \geqslant \boldsymbol{0}, \boldsymbol{\lambda} \geqslant \boldsymbol{0}, \end{cases} \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{s}^-, \boldsymbol{s}_{\mathrm{g}}^+, \boldsymbol{s}_{\mathrm{b}}^-$ 表示投入、期望产出和非期望产出的松弛变量. 目标函数 ρ 关于 $\boldsymbol{s}^-, \boldsymbol{s}_{\mathrm{g}}^+, \boldsymbol{s}_{\mathrm{b}}^-$ 严格递减, 且 $0 < \rho \leqslant 1$.

假设 $\left(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{s}^{-*}, \boldsymbol{s}_{\mathrm{g}}^{+*}, \boldsymbol{s}_{\mathrm{b}}^{-*}\right)$ 为模型(2)的一组最优解, 当且仅当 $\rho = 1$, 也即 $\boldsymbol{s}^{-*} = \boldsymbol{0}$, $\boldsymbol{s}_{\mathrm{g}}^{+*} = \boldsymbol{0}, \boldsymbol{s}_{\mathrm{b}}^{-*} = \boldsymbol{0}$ 时, DMU_0 是有效的. 若 $\rho < 1$, DMU_0 是无效的, 存在着对投入产出进行调整的必要性, 其非期望产出的最大可减排量为 $\boldsymbol{s}_{\mathrm{b}}^{-*}$.

本文设定一个决策单元的实际 CO_2排放量与其最大可减排量的差就是其目标 CO_2排放量. 地区 i 在时期 t 的全要素 CO_2排放绩效(total-factor CO_2 emission performance index, TFCPI)为

$$\mathrm{TFCPI}_{(i,t)} = \frac{\text{目标 } \mathrm{CO_2} \text{ 排放量}_{(i,t)}}{\text{实际 } \mathrm{CO_2} \text{ 排放量}_{(i,t)}}. \tag{3}$$

2.2 基于动态时间窗改进的SBM-DEA模型

普通的 DEA 方法一般用来分析横截面数据, 即被评价的决策单元只与同时期的其他决策单元进行比较, 而忽略了时间的作用, 因此无法考察效率的动态变化. Charnes 等[18]提出了DEA窗口分析方法, 它能够处理不同决策单元随时间变化的数据. DEA 窗口分析的思想是, 把处于不同时段的同一个决策单元视为不同

的决策单元, 通过类似移动平均法选定不同的参考集(窗口)来评价该决策单元的相对效率.

假设有 N 个决策单元, M 种投入, K 种期望产出, L 种非期望产出. 起始于第 $t(t=1,2,\ldots,T)$ 年的窗口 W_t, 其窗口宽度为 $w(1\leqslant w\leqslant T-t+1$, 即窗口 W_t 覆盖相邻的 w 个时段), 该窗口则有 $N\times w$ 个观测对象. 窗口 W_t 的投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵分别为

$$\boldsymbol{X}_{W_t}=\left(\boldsymbol{x}_t^1,\boldsymbol{x}_t^2,\ldots,\boldsymbol{x}_t^N,\boldsymbol{x}_{t+1}^1,\boldsymbol{x}_{t+1}^2,\ldots,\boldsymbol{x}_{t+1}^N,\ldots,\boldsymbol{x}_{t+w-1}^1,\boldsymbol{x}_{t+w-1}^2,\ldots,\boldsymbol{x}_{t+w-1}^N\right),\tag{4}$$

$$\boldsymbol{Y}_{W_t}=\left(\boldsymbol{y}_t^1,\boldsymbol{y}_t^2,\ldots,\boldsymbol{y}_t^N,\boldsymbol{y}_{t+1}^1,\boldsymbol{y}_{t+1}^2,\ldots,\boldsymbol{y}_{t+1}^N,\ldots,\boldsymbol{y}_{t+w-1}^1,\boldsymbol{y}_{t+w-1}^2,\ldots,\boldsymbol{y}_{t+w-1}^N\right),\tag{5}$$

$$\boldsymbol{U}_{W_t}=\left(\boldsymbol{u}_t^1,\boldsymbol{u}_t^2,\ldots,\boldsymbol{u}_t^N,\boldsymbol{u}_{t+1}^1,\boldsymbol{u}_{t+1}^2,\ldots,\boldsymbol{u}_{t+1}^N,\ldots,\boldsymbol{u}_{t+w-1}^1,\boldsymbol{u}_{t+w-1}^2,\ldots,\boldsymbol{u}_{t+w-1}^N\right).\tag{6}$$

目前, 窗口宽度的确定并没有严格的理论依据. Charnes 等[19]发现窗口宽度一般取 3 或 4 个时间段, 倾向于能够获得最平衡的信息量和稳定的效率得分. 不失一般性, 本文设定窗口宽度为 3, 且以 1 年的时间移动.

3　数据处理及说明

除西藏和港澳台地区外, 并将重庆市并入四川省, 本文研究总共包含 29 个省市. 采用年度面板数据, 样本区间为1997—2009年; 以资本、劳动力和能源作为投入要素, GDP 为期望产出, CO_2排放量为非期望产出.

以资本存量表示资本投入量. 本文 1997—2006 年资本存量的数据来自文献[20], 2007—2009 年的数据则采用“永续盘存法”计算获得. 劳动力投入以各省市年末就业人数计算. 能源消费投入以各地区消耗的各类能源为基础数据, 按照各种能源标准煤系数统一换算为标准煤. 参考文献[21]及《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》, CO_2排放量基于能源平衡表的能源消费数据核算得到.

资本存量与 GDP 以 1997 年不变价格换算. 各省市的 GDP 和劳动力数据来自《中国统计年鉴》,能源消费数据来自《中国能源统计年鉴》, CO_2排放因子来自《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》.

4　中国区域全要素 CO_2排放绩效

本文研究的29个省市使用化石燃料所产生的CO_2排放量自1997年的33.03亿吨上升至2009年的83.80亿吨, 13年期间的CO_2排放总量高达675.38亿吨[1]. 按1997年不变价格计算, 我国CO_2排放强度由1997年的每万元4.3吨持续下降至2009年每万元2.9吨. 根据“十一五”规划, 本文将29个省市划分为东部、中部、西部和东北(见表1)四大区域. 基于前文所述方法, 本文测算了1997—2009年我国29个省市和四大区域每年的CO_2可减排量及TFCPI值. 样本期间内我国CO_2可减排总量为312.90亿吨, 各省市的TFCPI值[2] 等结果详见表1.

4.1　静态评价

由表1可以看出, 我国29个省市在样本期内的平均TFCPI值仅为0.521, 说明我国CO_2排放绩效还有待大幅度提高. CO_2排放高绩效的省市多集中在经济发达的南部沿海和东部沿海地区. 这两个地区的GDP占29个省市总GDP的34.7%, 而CO_2排放量仅占总排放量的21.2%, 样本期内所有省市的平均TFCPI值均超过0.7. 从CO_2可减排量来看, 河北、山西、山东、河南、内蒙和辽宁的CO_2可减排量明显高于其他省市, 占可减排总量的50.9%. 其中河北省的CO_2排放绩效在沿海地区最低, 但可减排量排名第一, 占全国可减排总量的10.8%.

[1]本文计算的中国碳排放量比国际能源署(International Energy Agency, IEA) 2011年公布的数据高, 主要原因在于能源消费量的计算方法和数据来源不同.

[2]由于窗口的重叠, 以同一年不同窗口TFCPI的均值作为该地区当年的全要素 CO_2排放绩效值.

为进一步考察中国区域CO_2的减排潜力, 本文采用沃德法(Ward's method),按照1997—2009年间的年均TFCPI值和年均CO_2可减排量, 对29个省市进行聚类分析. 聚类结果及其特征如表2所示. 由于TFCPI值在一定程度上反应了经济、能源和环境(3E)发展的协调性, 即高排放绩效地区, 其3E协调性也高; 低排放绩效地区, 其3E协调性也低. G1中的7个省在地理位置上相邻, 它们是中国煤炭开采和煤炭深加工、钢铁工业、有色金属工业的聚集地, 能耗基数大, CO_2排放量高, 其经济结构调整和能源使用技术改进的任务尤为艰巨. G2中的甘肃、宁夏、青海、新疆四省地处我国西北, 经济发展滞后. G4中的省市大多位于东南沿海地区, 经济发达, 产业结构相对合理, 肩负着带动内陆地区发展的艰巨任务.

表 1 各地区全要素CO_2排放绩效(1997—2009)

Table 1 Total-factor CO_2 emission performance by region (1997—2009)

省(市)	区域[1]	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	平均[2]	排名	比例[3]
福建	E	1.000	1.000	1.000	0.99	1.000	0.994	1.000	1.000	0.926	1.000	0.955	0.992	1.000	0.989	1	0.06
广东	E	1.000	1.000	0.886	1.000	0.950	0.939	0.952	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.979	2	0.19
上海	E	0.751	0.927	0.963	0.94	0.951	0.953	0.942	0.923	0.898	1.000	0.963	1.000	1.000	0.939	3	0.35
海南	E	0.768	0.781	0.923	0.905	0.885	0.831	0.813	0.820	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.902	4	0.04
北京	E	0.445	0.744	0.756	0.833	0.877	0.853	0.932	0.865	0.862	1.000	0.934	1.000	1.000	0.854	5	0.49
浙江	E	0.598	0.642	0.659	0.654	0.648	0.726	0.788	0.800	0.823	0.941	0.842	0.893	0.890	0.762	6	1.73
江西	C	1.000	0.755	0.659	0.772	0.774	0.589	0.547	0.593	0.645	0.711	0.705	0.765	0.782	0.715	7	1.04
江苏	E	0.478	0.477	0.626	0.586	0.661	0.766	0.803	0.788	0.731	0.825	0.801	0.855	0.874	0.713	8	3.48
广西	W	0.716	0.708	0.686	0.646	0.641	0.743	0.680	0.616	0.666	0.734	0.715	0.885	0.784	0.709	9	0.96
黑龙江	NE	0.252	0.295	0.314	0.320	0.462	0.712	0.889	0.975	1.000	1.000	0.868	0.791	0.572	0.650	10	2.46
天津	E	0.356	0.461	0.635	0.661	0.681	0.678	0.729	0.630	0.623	0.718	0.663	0.721	0.734	0.638	11	1.26
湖南	C	0.417	0.452	0.592	0.659	0.595	0.632	0.743	0.617	0.524	0.584	0.593	0.684	0.685	0.598	12	2.57
湖北	C	1.000	0.370	0.410	0.422	0.475	0.506	0.516	0.554	0.602	0.667	0.637	0.710	0.710	0.583	13	3.28
四川	W	0.376	0.415	0.438	0.476	0.515	0.535	0.539	0.597	0.684	0.740	0.744	0.695	0.679	0.572	14	4.06
山东	E	0.416	0.471	0.510	0.608	0.530	0.579	0.570	0.580	0.504	0.546	0.535	0.554	0.569	0.536	15	8.54
云南	W	0.370	0.404	0.445	0.480	0.448	0.444	0.393	0.742	0.377	0.397	0.391	0.429	0.413	0.441	16	2.63
河南	C	0.353	0.380	0.393	0.393	0.387	0.406	0.415	0.405	0.410	0.443	0.443	0.473	0.485	0.414	17	7.37
辽宁	NE	0.257	0.285	0.397	0.284	0.318	0.406	0.449	0.422	0.424	0.456	0.459	0.493	0.489	0.395	18	7.29
安徽	C	0.340	0.367	0.371	0.357	0.354	0.405	0.389	0.381	0.388	0.407	0.400	0.433	0.446	0.388	19	5.26
陕西	C	0.240	0.279	0.335	0.366	0.342	0.367	0.374	0.357	0.378	0.480	0.438	0.439	0.423	0.371	20	2.92
青海	W	0.236	0.261	0.234	0.289	0.279	0.336	0.370	0.505	0.514	0.472	0.417	0.375	0.396	0.360	21	0.49
新疆	W	0.236	0.245	0.262	0.276	0.305	0.381	0.493	0.434	0.393	0.427	0.377	0.377	0.330	0.349	22	2.53
吉林	NE	0.188	0.232	0.278	0.267	0.283	0.318	0.362	0.409	0.369	0.410	0.378	0.423	0.441	0.335	23	3.77
河北	E	0.250	0.274	0.281	0.285	0.299	0.307	0.334	0.391	0.346	0.377	0.367	0.375	0.373	0.328	24	10.80
内蒙古	C	0.178	0.599	0.463	0.510	0.688	0.309	0.231	0.223	0.213	0.228	0.205	0.192	0.201	0.326	25	7.34
甘肃	W	0.196	0.209	0.222	0.217	0.248	0.272	0.264	0.288	0.310	0.342	0.341	0.347	0.371	0.279	26	2.46
山西	C	0.130	0.140	0.155	0.157	0.144	0.155	0.171	0.185	0.199	0.220	0.221	0.216	0.205	0.177	27	9.51
贵州	W	0.130	0.124	0.134	0.140	0.153	0.173	0.152	0.176	0.168	0.170	0.179	0.210	0.195	0.162	28	5.14
宁夏	W	0.131	0.155	0.166	0.125	0.106	0.105	0.120	0.153	0.142	0.153	0.137	0.130	0.130	0.135	29	1.98
东部	E	0.545	0.570	0.637	0.672	0.667	0.695	0.713	0.725	0.674	0.735	0.710	0.736	0.746	0.679	1	26.95
中部	C	0.426	0.378	0.390	0.409	0.421	0.379	0.379	0.378	0.385	0.422	0.414	0.431	0.435	0.404	3	39.28
西部	W	0.315	0.331	0.347	0.355	0.369	0.398	0.391	0.444	0.433	0.462	0.459	0.478	0.460	0.403	4	20.24
东北	NE	0.239	0.277	0.339	0.292	0.353	0.477	0.563	0.581	0.576	0.599	0.555	0.564	0.502	0.455	2	13.52
全国		0.426	0.428	0.477	0.489	0.503	0.523	0.540	0.554	0.537	0.580	0.561	0.579	0.574	0.521		100

注: [1] E代表东部地区, C代表中部地区, W代表西部地区, NE代表东北地区.

[2] 不考虑西藏和港澳台地区, 并将重庆市并入四川省后, 我国29个省市按1997—2009年的平均TFCPI值排名.

[3] 各省市1997—2009年的CO_2可减排总量占29个省市CO_2可减排总量的百分比.

表 2 中国CO_2减排潜力的分区比较

Table 2 Clustering analysis of China's regional CO_2 emissions reduction potentials

群组	特征描述	省(市)	个数
G1	较低绩效, 高可减排量, 高减排潜力, 不协调	河北、河南、山东、内蒙古、山西、安徽、辽宁	7
G2	低绩效, 较高可减排量, 较高减排潜力, 较不协调	陕西、贵州、云南、甘肃、宁夏、青海、新疆、吉林	8
G3	较高绩效, 较低可减排量, 较低减排潜力, 较协调	天津、江苏、浙江、湖北、湖南、江西、广西、四川(含重庆)、黑龙江	9
G4	高绩效, 低可减排量, 低减排潜力, 协调	北京、上海、福建、广东、海南	5

4.2 动态评价

从整体来看, 中国的TFCPI值由1997年的0.426逐渐上升至2006年的0.580, 到2009年回落0.574. 从四大区域来看(见表1), 除中部地区外, 其他三个地区的TFCPI值在样本期间内都逐步提高; 其中, 东北地区提

升幅度最大, 年平均增长速度为 6.4%, 西部次之. 为便于分析, 绘制不同时期各省市平均 TFCPI 值的雷达图如图 1 所示. 可以发现, 黑龙江、江苏、北京、青海、新疆和四川六省市的平均排放绩效提升幅度较大, 其中黑龙江省的年平均 CO_2排放绩效由 1997—2001 年的 0.329 增长至 2001—2005 年的 0.808, 增幅为 146%, 遥遥领先其他省市; 而内蒙古和江西则大幅度下降. 在 2005—2009 年期间, 湖北、四川、海南和浙江四省的排放绩效有较大提高, 而内蒙古的排放绩效进一步下降, 由 2001 年的 0.688 降低至 2009 年的 0.201.

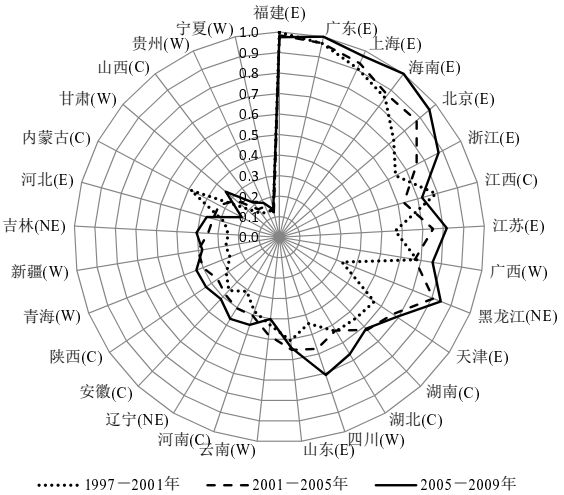

图 1　各地区全要素 CO_2排放绩效的演化

Fig. 1　Evolution of total-factor CO_2 emission performance by region

5　全要素 CO_2排放绩效的收敛分析

通过上述分析可以看出, 我国区域 CO_2排放绩效存在显著差异, 然而各地区 CO_2排放绩效的差距是否会随着时间的推移而缩小? 排放绩效低的地区是否比绩效高的地区具有更高的绩效增长速度? 为回答这些问题, 下文对我国整体及四大区域的排放绩效进行了收敛检验. 收敛检验一般包括 σ 收敛、绝对 β 收敛和条件 β 收敛(简称条件收敛); 其中 σ 收敛和绝对 β 收敛都属于绝对收敛.

图 2 显示, 经济发达的东部地区碳排放绩效较为均衡, 而西部地区碳排放绩效差异较大. 总体来看, 全国各省市之间、四大区域内部(除中部地区以外),碳排放绩效的差异逐渐减小或趋于稳定.

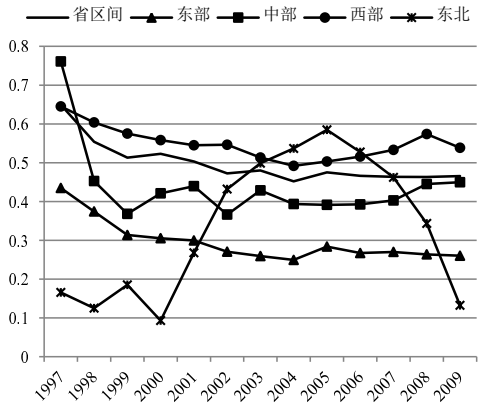

图 2　全要素 CO_2排放绩效的变异系数

Fig. 2　Coefficient of variation of total-factor CO_2 emission performance

5.1　绝对收敛分析

σ 收敛是指不同地区间排放绩效水平的离差随时间的推移而趋于零. 绝对 β 收敛又是指在各地区拥有共同稳态的前提下, 相比于初始排放绩效高的地区, 初始排放绩效低的地区如果具有更高的增长率, 使得所

有地区的排放绩效最终趋于共同稳态. 本文借助变异系数进行 σ 收敛检验, 采用收敛回归模型进行绝对 β 收敛检验.

下面采用基于新古典增长理论的经典趋同模型[22]对中国 29 个省市和四大区域的排放绩效进行绝对 β 收敛检验. 模型如下

$$\frac{1}{T}(\ln y_{i,t+T}-\ln y_{i,t})=\alpha+\beta\ln y_{i,t}+\varepsilon_{i,t}, \tag{7}$$

其中 i 为地区编号, y 为 TFCPI 值, T 某一段时间, $(\ln y_{i,t+T}-\ln y_{i,t})/T$ 表示从 t 到 $t+T$ 时期地区 i 排放绩效的年均增长率, α 为截距, $\varepsilon_{i,t}$ 为随机误差项. 若 $\beta<0$, 则表示存在绝对 β 收敛; 反之, 则不存在.

令 $y_{i,t}$ 取 1997, 1998, . . .,2008 年地区 i 的 CO_2 排放绩效值, $y_{i,t+T}$ 取该地区 2009 年的排放绩效值, 采用面板数据的混合 GLS 估计, 得到结果如表 3 所示.

从绝对 β 收敛检验结果来看, 全国和四大区域的 β 值在 1% 的显著性水平下皆为负, 这表明全国和四大区域内部皆存在绝对 β 收敛, 即 CO_2 排放绩效较低的省市其排放绩效增长速度要高于绩效较高的省市, 存在落后者对先进者的"追赶效应". 从 β 的绝对值来看, 西部地区最大, 因此西部能最快到达其内部稳态水平, 东部次之, 东北则最为缓慢.

表 3 CO_2 排放绩效的 β 收敛检验

Table 3 Tests for β-convergence of CO_2 emission performance

	全国	东部	中部	西部	东北
			绝对 β 收敛(混合估计模型)		
β	−0.133***	−0.120***	−0.115***	−0.196***	−0.088***
T 统计量	−26.189	−16.751	−13.749	−17.991	−6.043
调整后 R^2	0.838	0.798	0.837	0.850	0.953
F 统计量	825.596***	131.321***	223.945***	149.877***	325.915***
			条件 β 收敛(固定效应模型)		
β	−0.138***	−0.100***	−0.110***	−0.154***	−0.234***
T 统计量	−20.290	−15.191	−15.501	−8.900	−4.265
调整后 R^2	0.722	0.833	0.843	0.692	0.659
F 统计量	23.521***	29.348***	27.913***	12.256***	5.839***

注: ***、** 和 *分别表示在1%、5% 和 10%水平上显著.

5.2 条件收敛分析

条件收敛是指各个地区的排放绩效趋近于各自的稳态水平, 而这个稳态水平依赖于各地区自身特征, 说明地区之间的 CO_2 排放绩效差异会持久存在. 本文运用面板数据固定效应模型进行条件收敛检验, 其最大的优点是能够避免遗漏解释变量, 并且避开了对解释变量的选择问题[23]. 面板数据模型的固定效应项对应着不同地区各自不同的稳态条件, 能够满足条件收敛的假定, 因此无需加入额外的控制变量[24]. 本文在模型(7)的基础上引入个体固定效应项和时间固定效应项, 即采用双固定效应模型来检验条件收敛. 同样, 若 $\beta<0$, 则存在条件收敛; 反之, 则不存在. 固定效应模型的估计结果如表 3 所示.

表 3 中条件 β 收敛检验的结果显示: 全国和四大区域的 β 值在 1% 的显著性水平下皆为负, 这表明全国和四大区域的 CO_2 排放绩效除了存在绝对收敛以外还存在着显著的条件收敛趋势. 从 β 的绝对值来看, 东北地区最大, 其内各省能最快达到自身的稳态水平, 西部地区次之, 东部则最为缓慢.

6 结束语

本文在全要素框架下, 采用基于非期望产出的 SBM-DEA 模型, 结合窗口分析方法, 通过定义全要素 CO_2 排放绩效指标(TFCPI), 对中国 29 个省市 1997—2009 年的 CO_2 排放绩效和减排潜力进行了评价, 最后借助变异系数和面板回归模型对我国整体及东部、中部、西部以及东北四大区域的碳排放绩效进行了收敛检验.

研究结果表明, 在1997—2009年期间, 我国CO_2排放绩效整体水平持续提高, 但地区差异显著, 呈现了由东南沿海向西北内陆递减的分布特征. 按照各省年均CO_2排放的绩效值和可减排量, 我国29个省市可分为四个减排潜力组. 其中福建、广东、上海、海南和北京是碳排放绩效排名前五的省市, 样本期间内的平均碳排放绩效值均在0.85以上, 其经济、能源和环境之间发展协调. 河北、山东、辽宁、内蒙古、山西、河南和安徽七省的碳排放绩效较低, 但CO_2可减排量大, 样本期间内的累计CO_2可减排量占29省市可减排总量的56.1%. 在2001—2005年期间, 黑龙江省碳排放绩效提升幅度最大; 在2005—2009年期间, 湖北省碳排放绩效提升幅度最大; 而内蒙古在2001—2009年间碳排放绩效下降幅度最大, 由2001年的0.688降低至2009年的0.201. 此外, 收敛分析结果表明: 我国整体和四大区域的CO_2排放绩效皆有显著的绝对收敛和条件收敛的趋势, CO_2排放绩效较低省市的排放绩效增长速度高于绩效较高的省市, 各地区碳排放绩效的差距将随着时间的推移而减小.

综上, 在符合我国全局利益的前提下, 首先要基于不同区域的实际情况制定不同的减排政策, 并向中西部倾斜制定相关的配套政策, 同时保证东部沿海地区CO_2排放绩效的稳步提升, 以辐射作用带动内陆地区碳排放绩效的提高.

参考文献:

[1] Mielnik O, Goldemberg J. The evolution of the “carbonization index” in developing countries[J]. Energy Policy, 1999, 27(5): 307–308.

[2] Ang B W. Is the energy intensity a less useful indicator than the carbon factor in the study of climate change[J]. Energy Policy, 1999, 27(5): 943–946.

[3] Sun J W. The decrease of CO_2 emission intensity is decarbonization at national and global levels[J]. Energy Policy, 2005, 33(8): 975–978.

[4] Zhang Z Q, Qu J S, Zeng J J. A quantitative comparison and analysis on the assessment indicators of greenhouse gases emission[J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(4): 387–399.

[5] Zhou P, Ang B W, Poh K L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(1): 1–18.

[6] Zhou P, Ang B W, Han J Y. Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis[J]. Energy Economics, 2010, 32(1): 194–201.

[7] 王群伟, 周　鹏, 周德群. 我国CO_2排放绩效的动变化、区域差异及影响因素[J]. 中国工业经济, 2010, 28(1): 45–54.
Wang Qunwei, Zhou Peng, Zhou Dequn. Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China[J]. China Industrial Economy, 2010, 28(1): 45–54.　(in Chinese).

[8] 王群伟, 周德群, 周　鹏. 区域CO_2排放绩效及减排潜力研究: 以我国主要工业省区为例[J]. 科学学研究, 2011, 29(6): 868–875.
Wang Qunwei1, Zhou Dequn, Zhou Peng. Regional carbon dioxide emission performance and its reduction potential based on environmental production technology: The case of main industrial provinces in China[J]. Studies in Science of Science, 2011, 29(6): 868–875. (in Chinese)

[9] Guo X D, Zhu L, Fan Y, et al. Evaluation of potential reductions in carbon emissions in Chinese provinces based on environmental DEA[J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2352–2360.

[10] 尤建新, 陈　震, 张玲红, 等. 我国连续性全要素CO_2排放绩效空间差异及成因研究: 基于Sequential Malmquist-Luenberger指数分析[J]. 预测, 2012, 31(2): 57–61.
You Jianxin, Chen Zhen, Zhang Linghong, er al. Spatial difference and causes research on continuous total factor CO_2 emission performance in China: Based on sequential Malmquist-luenberger index analysis[J]. Forecasting, 2012, 31(2): 57–61. (in Chinese)

[11] 刘明磊, 朱　磊, 范　英. 我国省级碳排放绩效评价及边际减排成本估计: 基于非参数距离函数方法[J]. 中国软科学, 2011, 26(3): 106–114.
Liu Minglei, Zhu Lei, Fan Ying. Evaluation of carbon emission performance and estimation of marginal CO_2 abatement costs for provinces of China: A non-parametric distance function approach[J]. China Soft Science, 2011, 26(3): 106–114. (in Chinese)

[12] 卞亦文. 非合作博弈两阶段生产系统的环境效率评价[J]. 管理科学学报, 2012, 15(7): 11–19.
Bian Yiwen. Eco-efficiency evaluation of non-cooperative game two-tage production system[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(7): 11–19. (in Chinese)

[13] Zhou P, Ang B W, Poh K L. Slacks-based efficiency measures for modeling environmental performance[J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 111–118.

[14] 李 涛, 傅 强. 中国省际碳排放效率研究[J]. 统计研究, 2011, 28(7): 62–71.
Li Tao, Fu Qiang. Study on China's carbon dioxide emissions efficiency[J]. Statistical Research, 2011, 28(7): 62–71. (in Chinese)

[15] 李继峰, 张阿玲. 混合式能源–经济–环境系统模型构建方法论[J]. 系统工程学报, 2007, 22(2): 170–175.
Li Jifeng, Zhang Aling. Review of hybrid approaches of energy-economy-environmental system model[J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(2): 170–175. (in Chinese)

[16] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure(SBM) approach[C]. // Japan Tokyo: National Graduate Institute for Policy Studies, 2003: 1–16.

[17] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001. 130(3): 498–509.

[18] Charnes A, Cooper W W. Preface to topics in data envelopment analysis[J]. Annals of Operation Research, 1984, 2(1): 59–94.

[19] Charnes A, Cooper W W, Lewin Y A, et al. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application[M]. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers, 1994: 49–62.

[20] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952–2006年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17–31.
Shan Haojie. Reestimating the capital stock of China: 1952–2006[J]. Journal of Quantitative and Technical Economics, 2008, 25(10): 17–31. (in Chinese)

[21] 刘占成, 王安建, 于汶加, 等. 中国区域碳排放研究[J]. 地球学报, 2010, 32(5): 727–732.
Liu Zhancheng, Wang Anjian, Yu Wenjia, et al. Research on regional carbon emissions in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(5): 727–732. (in Chinese)

[22] Sala-i-Martin X X. The classical approach to convergence analysis[J]. The Economic Journal, 1996, 106(437): 1019–10361.

[23] 彭国华. 中国地区收入差距、全要素生产率及其收敛分析[J]. 经济研究, 2005, 39(9): 19–29.
Peng Guohua. The disparity of income, TFP and the convergence hypothesis in Chinese provinces[J]. Economic Research Journal, 2005, 39(9): 19–29. (in Chinese)

[24] Miller S M, Upadhyay M P. Total factor productivity and the convergence hypothesis[J]. Journal of Macroeconomics, 2002, 24(2): 267–286.

作者简介:

杜慧滨 (1977—), 女, 吉林长春人, 博士, 副教授, 研究方向: 能源–经济–环境系统, Email: duhuibin@tju.edu.cn;

王洋洋 (1988—), 女, 福建泉州人, 硕士生, 研究方向: 能源–经济–环境系统, Email:y.wang_tju@yahoo.cn.