

【产业经济】

# 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素

王群伟, 周鹏, 周德群

(南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 本文利用含有非期望产出的DEA模型构建了可用于研究二氧化碳排放绩效动态变化的Malmquist指数,以此为基础,测度了1996—2007年我国28个省区市二氧化碳的排放绩效,并借助收敛理论和面板数据回归模型分析区域差异及其影响因素。研究发现:样本期间我国二氧化碳排放绩效主要因技术进步而不断提高,平均改善率为3.25%,累计改善为40.86%;四大区域的二氧化碳排放绩效有所差异,东部最高,东北和中部稍低,西部较为落后,但差异性有下降趋势,二氧化碳排放绩效存在收敛性;全国范围内,经济发展水平、产业结构高级化程度、能源强度和所有制结构对二氧化碳排放绩效有显著影响,对外开放的影响则不明显。

[关键词] 二氧化碳; 非期望产出; Malmquist指数; 收敛; 面板数据模型

[中图分类号]F124.6 [文献标识码]A [文章编号]1006-480X(2010)01-0045-10

## 一、引言

自1992年联合国气候变化专门委员会(IPCC)达成《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)以来,如何有效控制和缓解全球气候变暖趋势已受到世界各国的高度重视。进入后京都时代,为应对气候变化和温室气体排放,我国既面临着温室气体减排国际新框架的艰难谈判和不同利益集团在政治外交上的博弈,同时也面临着国内资源生态环境承载力不足的巨大压力和挑战。面对国际国内两种压力,要实现到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%—45%的减排目标,开展的各项减排活动及采取的各项政策措施都首先依赖于对二氧化碳等温室气体排放历史和现状的精确评估,这是进一步制定和明确各地区温室气体减排任务的基础,也是衡量温室气体排放

[收稿日期] 2009-12-15

[基金项目] 国家社会科学基金重大项目“不确定条件下我国能源开发、利用和储备可持续发展战略研究”(批准号08&ZD046);国家自然科学基金青年项目“考虑非期望产出的效率模型及其在能源效率和环境绩效评价中的应用”(批准号70903031);国家自然科学基金面上项目“考虑影响因素交互作用和能源回弹效应的能效政策分析模型”(批准号70873058);国家自然科学基金应急项目“考虑能源结构、区域差异和行业特点的节能减排政策选择研究”(批准号70941038);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目“能源效率测度与能效政策分析框架——非期望产出和回弹效应的视角”(批准号CX09B-052R)。

[作者简介] 王群伟(1983—),男,江苏苏州人,南京航空航天大学经济与管理学院博士研究生;周鹏(1978—),男,山东诸城人,南京航空航天大学经济与管理学院教授;周德群(1963—),男,江苏盐城人,南京航空航天大学经济与管理学院副院长,教授,博士生导师。

绩效、公平发展机会的重要依据。

从现有文献来看,有关二氧化碳排放的研究已取得了一些成果。在二氧化碳排放绩效评价方面,根据不同范围、不同时段和不同角度,国际上形成了若干指标。20世纪90年代,基于《京都议定书》所规定的减排义务,以国家为单元进行排放量计算的指标(国别指标)最早开始应用,此后又逐步形成其他一些指标。Mielnik et al.(1999)提出可用单位能源的二氧化碳排放量作为发展中国家应对气候变化及经济发展模式评价的主要标准;Ang(1999)认为在研究气候变化时单位GDP能耗变化基本就代表了二氧化碳排放的情况,几乎可以同等看待;Sun(2005)强调在评价国家能源政策和碳减排效果时,单位GDP二氧化碳排放量是一个理想的指标;Zhang et al.(2008)在系统梳理已有二氧化碳排放指标优缺点的基础上,认为工业化累计人均排放量和人均单位GDP排放量等新的评价指标更多地体现了科学、公正、合理的原则,并以典型发达国家和发展中国家为代表进行了测算与比较。概括地说,上述指标都具有“单要素”特征,多以二氧化碳排放总量与某一要素的比值来表示。单要素指标易于理解和操作,但二氧化碳排放绩效是能源消费、经济发展等多要素共同作用的结果,显示出明显的“全要素”特点,考虑相关要素构造的指标才更为合适(Ramanathan,2002)。基于全要素和要素替代的思想,数据包络分析(DEA)开始广泛应用于有关二氧化碳排放等环境绩效评价中(Zhou et al.,2008a)。如Zaim and Taskin(2000)、Zofio and Prieto(2001)、Zhou et al.(2006)利用不同的DEA模型从宏观层面上对OECD国家和部分地区二氧化碳的排放绩效进行了评价;Kortelainen(2008)基于生态效率的概念,用Malmquist指数法分析了欧盟20国1990—2003年的动态环境绩效。有关DEA模型在环境及能源领域应用的更多信息可参考Zhou et al.(2008a)的综述性文献。在影响因素方面,不少学者热衷于通过应用库茨涅茨曲线假设,从实证的角度分析经济发展与二氧化碳排放是否存在倒U型曲线关系。如Friedl et al.(2003)和Mills et al.(2009)等学者利用不同的时间序列数据对部分国家做了相关研究,但所得结论不尽相同。另外一些研究则多利用指数分解法从能源消费、能源效率、产业结构变化等多个方面分析对二氧化碳排放的影响(Fan et al.,2007;Zhang et al.,2009)。

上述研究的不足是有关二氧化碳排放绩效的评价多是静态和单要素的,所得绩效值适合地区间的横向比较而不利于时间维度的纵向对比。有关二氧化碳影响因素的识别与测度注重于排放量与某一具体要素关系的检验,而基于指标特点从效率变化、技术进步角度分析的较少,也缺乏多要素共同作用的综合分析。在此基础上,探讨一国范围内二氧化碳排放绩效差异性的研究更是鲜见。因此,本文借鉴Zhou et al.(2010)的思想,从生产理论的角度,综合考虑能源、资本、劳动力等相关要素,利用环境生产技术构造一种可考察动态变化的Malmquist二氧化碳排放绩效指数。然后利用1995—2007年我国28个省区的面板数据对二氧化碳排放绩效进行实证研究,并讨论其区域差异性和影响因素。

## 二、研究方法和指数构建

### 1. 环境生产技术

一般经济系统的生产过程在投入一定的生产要素后,除了获得期望产出(好的产出)外,还往往同时带来如废水、废气、固体废弃物之类的非期望产出(坏的产出)。参照Kemfert et al.(2000)和郝照宁、刘德顺(2004)等人有关经济增长模型中指标选择的思路,假设某一地区因资本( $K$ )、劳动力( $L$ )和能源( $E$ )三要素的投入形成国内生产总值( $Y$ )一种期望产出和二氧化碳( $C$ )一种非期望产出,则该生产过程可描述为 $P(K,L,E)=\{(Y,C):(K,L,E,Y,C)\in T\}$ 。 $T$ 代表特定生产过程中的技术关系, $P(K,L,E)$ 是产出集,表示所有可能产出的集合。由于该生产过程将环境污染等非期望产出也包含在内,这种技术常被称为环境生产技术(Zhou et al.,2008b)。

产出集 $P(K,L,E)$ 具有闭合、有界和凸性的特征,即使用给定的投入不可能有无限的产出水平,

如果使用给定的投入向量可以生产出两组产出水平,那么也能生产出这两种产出向量的任意加权平均。 $P(K,L,E)$ 除满足一般生产技术所具有的投入和期望产出的强可处置性外,根据 Chung et al. (1997)和 Färe(2007)对环境生产技术的描述, $P(K,L,E)$ 还满足如下两个条件:

(1) $P(K,L,E)$ 满足非期望产出的弱可处置性,若 $(Y,C) \in P(K,L,E)$ 且 $0 \leq \theta \leq 1$ ,则 $(\theta Y, \theta C) \in P(K,L,E)$ 。弱可处置性表明二氧化碳的减少必须以牺牲期望产出为代价,两者的同比例减少才是可能的。

(2) $P(K,L,E)$ 满足期望产出和非期望产出的“零结合”性,若 $(Y,C) \in P(K,L,E)$ 且 $C=0$ ,则 $Y=0$ 。“零结合”性表明在生产活动中只要存在期望产出,就必然伴随非期望产出,即避免二氧化碳产出的唯一办法就是停止一切生产活动。

上述环境生产技术的构造将期望产出和非期望产出进行了有效的结合,便于概念的理解,但还无法用于具体的计算和实证研究,实际操作中的一个普遍做法是利用 DEA 方法将上述思想模型化 (Chung et al., 1997)。设共有  $I$  个地区,第  $i$  个地区的投入、期望产出和非期望产出向量为 $(K_i, L_i, E_i, Y_i, C_i)$ ,则规模报酬不变条件下的生产过程可由式(1)的线性规划模型进行描述。

$$P(K,L,E)=\{(K,L,E,Y,C)\}:$$

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i K_i \leq K; \sum_{i=1}^I \lambda_i L_i \leq L; \sum_{i=1}^I \lambda_i E_i \leq E; \sum_{i=1}^I \lambda_i Y_i \geq Y; \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i = C \quad (1)$$

$$\lambda_i \geq 0, i=1, 2, \dots, I$$

式(1)中 $\lambda_i$ 表示每一个横截面观测值的权重,非负的权重变量表示生产技术的规模报酬不变的。不等式约束表明了投入要素和期望产出的强可处置性,结合非期望产出的等式约束则说明了非期望产出的弱可处置性及两类产出的“零结合”性。利用 DEA 方法刻画的环境生产技术因其易于理解、贴近实际等特点而在能源、环境、生产效率等方面被广泛应用(Zhou et al., 2008a)。

## 2. Malmquist 二氧化碳排放绩效指数

Malmquist 生产率指数最早是由 Caves et al.(1982)定义,后经 Färe et al.(1994)等学者不断完善,以距离函数来描述的一种非参数方法。定义 Malmquist 指数的 Shephard 距离函数包括投入导向和产出导向两种。其中,产出导向的距离函数寻求在不增加投入要素的前提下实现产出的最大扩张比例,投入导向的距离函数寻求在不减少产出要素的前提下实现投入的最大收缩比例。由于本文将二氧化碳纳入了生产过程,传统的 Shephard 产出距离函数难以满足要求,借鉴 Tyteca(1997)评价静态环境绩效的思路,定义二氧化碳导向的距离函数,如式(2)。

$$D_c(K,L,E,Y,C)=\sup\{\delta: (K,L,E,Y,C/\delta) \in P(K,L,E)\} \quad (2)$$

式(2)的目标在于通过确定 $\delta$ 值来寻求二氧化碳排放的最大收缩比例,从而可判断被评价地区的静态二氧化碳绩效。为监测和研究二氧化碳排放的动态变化特征,本文对 Malmquist 生产率指数进行拓展,基于二氧化碳导向的距离函数构建 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数 (Malmquist CO<sub>2</sub> Emission Performance Index, MCPI)。

与 Malmquist 生产率指数类似,MCPI 既可以  $t$  时期的技术  $T(t)$  为参照,同时也可以  $t+1$  时期的技术  $T(t+1)$  为参照,为避免因参照基准选择上的任意性而造成差异,以两种参照情况下 MCPI 值的几何平均值作为衡量从  $t$  时期到  $t+1$  时期二氧化碳排放绩效的变化情况,如式(3)。

$$MCPI_c(t,t+1)=\left[ \frac{D_c^t(K^t, L^t, E^t, Y^t, C^t) \cdot D_c^{t+1}(K^t, L^t, E^t, Y^t, C^t)}{D_c^t(K^{t+1}, L^{t+1}, E^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1}) \cdot D_c^{t+1}(K^{t+1}, L^{t+1}, E^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, $(K^t, L^t, E^t, Y^t, C^t)$ 和 $(K^{t+1}, L^{t+1}, E^{t+1}, Y^{t+1}, C^{t+1})$ 分别表示  $t$  时期和  $t+1$  时期的投入产出向量; $D_c^t$ 和 $D_c^{t+1}$ 分别表示以  $t$  时期的技术  $T(t)$ 和以  $t+1$  时期的技术  $T(t+1)$ 为参照的二氧化碳导向的距

离函数。同样的,在不变规模报酬假定下,通过对式(3)的变形,Malmquist 二氧化碳排放绩效指数可进一步分解为技术效率指数(EFFCH)和技术进步指数(TECHCH)两个部分,如式(4)和式(5)。EFFCH 测度了从  $t$  时期到  $t+1$  时期每一个被评价地区对生产可能性边界的追赶程度,TECHCH 测度了技术边界从  $t$  时期到  $t+1$  时期之间的变动情况。当 EFFCH 或 TECHCH 大于 1,表示其是二氧化碳排放绩效得以提高的源泉,反之则是导致绩效降低的根源。

$$EFFCH(t,t+1)=\frac{D_c^t(K^t,L^t,E^t,Y^t,C^t)}{D_c^{t+1}(K^{t+1},L^{t+1},E^{t+1},Y^{t+1},C^{t+1})} \quad (4)$$

$$TECHCH(t,t+1)=\left[\frac{D_c^{t+1}(K^t,L^t,E^t,Y^t,C^t)\cdot D_c^{t+1}(K^{t+1},L^{t+1},E^{t+1},Y^{t+1},C^{t+1})}{D_c^t(K^t,L^t,E^t,Y^t,C^t)\cdot D_c^t(K^{t+1},L^{t+1},E^{t+1},Y^{t+1},C^{t+1})}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

为具体测算每一个被评价地区的 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数,需要计算以不同时期的技术为参照的四个距离函数,而这些距离函数可以在环境生产技术框架下,通过求解与  $i$  地区相对应的线性规划问题来完成,如式(6)。其中的  $p$  和  $q$  表示时期,且  $p,q \in \{t,t+1\}$ 。

$$\begin{aligned} & \left[ D_c^p(K_i^q,L_i^q,E_i^q,Y_i^q,C_i^q) \right]^{-1} = \min \rho \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^I \lambda_i K_i^p \leq L_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i L_i^p \leq L_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i E_i^p \leq E_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i Y_i^p \geq Y_i^q; \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i^p = \rho C_i^q \\ & \lambda_i \geq 0, i=1,2,\dots,I \end{aligned} \quad (6)$$

### 三、数据说明和实证结果

#### 1. 数据来源与说明

基于数据的可得性和实证研究的需要,本文以我国 28 个省区市 1995—2007 年的投入产出数据为样本。海南和西藏因数据缺失过多而不包括在内,重庆则并入四川一起统计。其中,以资本存量数据表示地区的资本投入量,由于资本存量无法直接从统计年鉴获得,一般采用永续盘存法进行估算。单豪杰(2008)在总结他人估算方法的基础上进行了完善,因而采用其估算的以 1952 年不变价格换算的 1995—2006 年的资本存量数据,2007 年数据则根据相同的方法进行补充计算,单位为亿元。劳动力的投入以各地区年初、年末就业人数的平均值计算,单位为万人。能源数据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,单位为万吨。各地区的期望产出以国内生产总值计算,为与资本存量价格保持一致,也以 1952 年不变价格换算,单位为亿元。二氧化碳数据同样无法从统计年鉴获得,本文用各地区煤炭、原油和天然气三种一次能源的消耗量与相应排放系数的乘积和来估算其排放量,单位为万吨。除二氧化碳和资本存量外的所有数据均来源于历年《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》或经整理而得。相关数据的统计性描述如表 1 所示。

表 1 1995—2007 年投入产出指标的统计描述

	单位	均值	中值	最大值	最小值	标准差
资本存量(K)	亿元	2429.39	1419.13	14822.19	69.7	2667.76
劳动力(L)	万人	2302.37	1958.04	6568.20	230.40	1549.75
能源(E)	万吨标煤	6730.38	5518.50	28554.41	688.00	4604.44
GDP(Y)	亿元	1134.96	786.95	5695.40	41.20	1046.61
二氧化碳(C)	万吨	20718.13	16405.38	96578.10	1475.34	15236.64

资料来源:根据历年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》等整理获得。

## 2. 二氧化碳排放绩效动态变化的总体分析

基于 DEA 的 Malmquist 指数法的一个基本思想是通过决策单元来构造前沿面,进而求解相应的线性规划,因此,决策单元的多少对于前沿面的形成至关重要。为避免由于决策单元少、数据稀疏而无法构造近似光滑的前沿面,出现线性规划无解的情况,本文用窗口法(Window)将决策单元进行扩展(Nghiem et al.,2002;王亚华等,2008)。窗口法可以将包括当期在内的前  $S$  期的投入产出数据作为当期的参考技术集。同时,应用窗口法会使计算时段减少  $S-1$  个周期。本文将  $S$  取 2,即每一年的参考技术由当期和前期的投入产出值所决定,则计算时段的初始年份由 1995 年改变为 1996 年。

根据式(3)、式(4)、式(5)和式(6),本文计算了我国 1996—2007 年间我国 28 个省区市的 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数。表 2 给出了历年平均的 MCPI 及其分解值,图 1 则是累计的 MCPI 及其组成部分  $EFFCH$ 、 $TECHCH$  的变动情况<sup>①</sup>。

从表 2 和图 1 可以看出,样本期内,技术效率平均降幅为 1.49%,累计降幅为 15.94%,大致呈现出先增后减的趋势;技术进步的平均增长率是 5.09%,增幅较为明显,且基本保持增长的趋势,累计上升幅度为 71.35%。由于技术效率的退化作用小于技术进步的增长作用,1996—2007 年间我国二氧化碳排放绩效仍维持了年均 3.25%的改进水平,与基期相比,总体的改进幅度为 40.86%。通过 MCPI 及其分解值的变化可以在总体上了解二氧化碳排放绩效的改进情况,但尚不能确定哪些地区推动了生产可能性边界的移动,即需要确认“创新者”(Innovator)。根据 Färe et al.(1994)的判断标准和 Kumar(2006)的具体实施情况,表 2 进一步列出了每一个时段推动生产可能性边界向外扩展的地区。可以发现,不同时段作为“创新者”的地区虽有所差异,但主要集中在辽宁、上海、天津、福建和云南五个省区。也就是说,这些地区为促进二氧化碳排放绩效的提高起到了示范和带动作用。

表 2 历年平均 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数及其分解

	$EFFCH$	$TECHCH$	$MCPI$	“创新者”的地区
1997/1996	0.9980	1.1172	1.1127	辽宁、上海、福建
1998/1997	1.0104	1.0588	1.0700	云南
1999/1998	1.0333	1.0476	1.0761	辽宁、上海、福建、云南
2000/1999	1.0518	1.0105	1.0624	辽宁、上海、福建
2001/2000	0.9678	1.0710	1.0363	辽宁、上海、福建
2002/2001	1.0153	1.0196	1.0332	辽宁、上海、云南
2003/2002	0.9702	0.9985	0.9683	天津、辽宁、上海、福建
2004/2003	0.9477	1.0443	0.9856	天津、辽宁、上海、福建
2005/2004	0.9861	0.9963	0.9799	天津、辽宁、上海
2006/2005	0.9197	1.1043	1.0125	天津、辽宁、上海
2007/2006	0.9360	1.0924	1.0209	天津、辽宁、上海、云南
平均	0.9851	1.0509	1.0325	

资料来源:根据本文的计算结果整理获得。

值得注意的是,2003—2005 年间,二氧化碳排放绩效出现了一定程度的退化。其中,2003 和 2005 年绩效的下降是源于技术效率和技术进步的共同作用,这也是仅有的技术进步未发挥正面作用的两个年份;2004 年下滑的原因则是技术效率 5.23%的衰退。这一时段二氧化碳排放绩效的变动特征与郭庆旺等(2005)研究的我国省际全要素生产率、袁晓玲等(2009)研究的能源效率的变动是

<sup>①</sup> 设 1996 年为参考年份,记为 1;累计的 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数、技术效率指数和技术进步指数分别记为  $CMCPI$ 、 $CEFFCH$  和  $CTECHCH$ 。

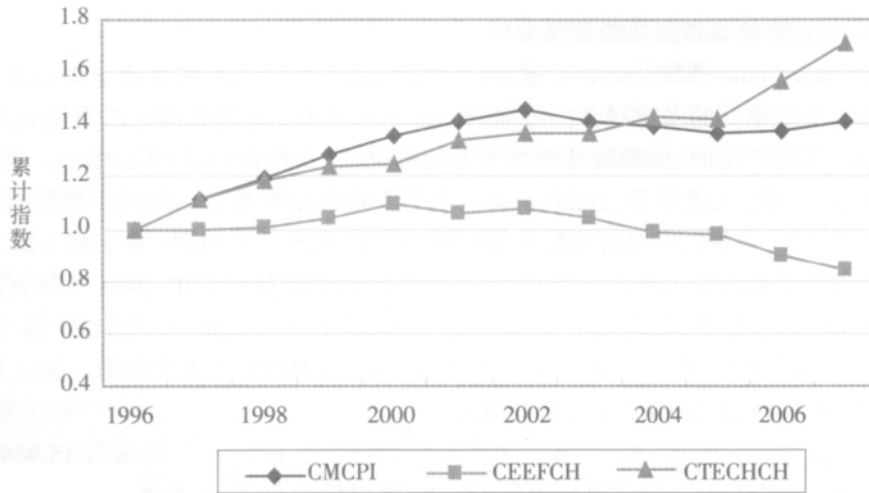


图 1 1996—2007 年的 CM CPI 及其分解

基本一致的。二氧化碳绩效的恶化很大程度上可能源于“十一五”中后期我国经济发展模式的逆转，钢铁、水泥、电解铝、煤炭等行业发展过快，重新转向低质量、低效益、低就业、高能耗和污染高排放的增长模式，2005 年重工业占工业总产值的比重高达 69%，显现出过度工业化的特征。根据美国能源署(EIA)2007 年的数据，我国二氧化碳排放总量的平均增长率也由 1994—2005 年间的 6.02% 急剧上升为 2002—2005 年间的 15.66%。

### 3. 二氧化碳排放绩效动态变化的区域差异分析

受区域经济发展水平、区位环境和管理体制等诸多因素的影响，我国二氧化碳排放绩效可能呈现出一定程度的区域特征。为此，考虑到国家二氧化碳减排任务制定的针对性和可操作性，表 3 给出了东部、东北、中部和西部四大区域 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数及其组成部分历年的平均值和累计值<sup>①</sup>。

表 3 四大区域 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数及其分解的均值和累计值

	均值			累计值		
	<i>EFFCH</i>	<i>TECHCH</i>	<i>MCPI</i>	<i>CEFFCH</i>	<i>CTECHCH</i>	<i>CMCPI</i>
东部	0.9857	1.0561	1.0391	0.8491	1.8085	1.5159
东北	1.0073	1.0331	1.0392	1.0685	1.4147	1.4994
中部	0.9937	1.0480	1.0389	0.9208	1.6520	1.4928
西部	0.9728	1.0535	1.0207	0.7271	1.7600	1.2366

资料来源：根据本文的计算结果整理获得。

1996—2007 年间，我国四大区域的二氧化碳排放绩效均有所改善，表现为平均 *MCPI* 大于 1。东部的累计改善幅度在 50% 以上，是四个区域中最高的，东北和中部相当，接近 50%，远高于西部的 23.66%。技术效率和技术进步在各个区域表现出不一致的特征，其中，东北地区二氧化碳排放绩效的提高来自于技术效率和技术进步的双重贡献，*EFFCH* 和 *TECHCH* 的均值分别为 1.0073 和

① 东部包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东和广东，东北包括辽宁、吉林、黑龙江，中部包括山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南，西部包括广西、贵州、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、内蒙古。

1.0331;其他三个区域的技术效率均出现了退化,主要依靠技术进步的提高来改善二氧化碳排放绩效,累计的技术进步提高幅度均在 65%以上。

进一步的,为揭示区域内部及全国范围内二氧化碳排放绩效的演进过程,本文用绝对  $\beta$  收敛理论进行检验 (Barro, 1992),其检验模型如式(7)。

$$\ln(y_{i,t}/y_{i,0})=\alpha+\beta\ln(y_{i,0})+\varepsilon_{i,t} \quad (7)$$

在式(7)中, $y_{i,0}$ 和 $y_{i,t}$ 分别表示基期和 $t$ 时期 $i$ 地区二氧化碳排放绩效的变动指数, $\ln(y_{i,t}/y_{i,0})$ 为从基期到 $t$ 时期 $i$ 地区二氧化碳排放绩效的平均增长率, $\alpha$ 为截距项, $\beta$ 为基期二氧化碳排放绩效 $\ln(y_{i,0})$ 的系数, $\varepsilon_{i,t}$ 为随机扰动项。若系数 $\beta$ 为负,表明各地区二氧化碳排放绩效的增长率与其初始水平成反向关系,存在收敛性,反之则不存在收敛性。

本文利用面板数据对式(7)进行估计,Hausman 检验表明采用固定效应回归模型更为合适,具体估算结果如表 4。从表 4 可以看出,在东部、东北、中部、西部和全国范围内,系数 $\beta$ 在 1%显著性水平下均为负值,存在绝对  $\beta$  收敛。二氧化碳排放绩效水平较低的地区其增长率要高于相应绩效水平高的地区,存在落后者对先进者的“追赶效应”,各地区的绩效水平存在趋同的趋势。 $\beta$ 数值的大小也表明西部地区内部的收敛速度和趋同性要更快些,东部次之,中部第三,东北则最为缓慢。今后,为进一步增进这种收敛性,缩小不同地区二氧化碳排放绩效的差异性,有必要采取一定的政策措施来加强地区间有关二氧化碳减排技术、管理制度安排等方面的交流和沟通,更好的促进先进技术和理念的扩散。

表 4 各区域 Malmquist 二氧化碳排放绩效收敛性结果

	东部	东北	中部	西部	全国
常数项	0.0236** (3.2585)	0.0178 (1.1892)	0.0126 (1.1749)	0.0113 (1.1537)	0.0178*** (3.5767)
$\beta$ 系数	-0.7887*** (-7.6644)	-0.5943*** (-3.1555)	-0.7331*** (-6.5713)	-1.0755*** (-10.9901)	-0.8884*** (-15.4299)
调整后 R <sup>2</sup>	0.3619	0.2055	0.3896	0.5309	0.4335

注:括号内为 $t$ 统计量,\*\*\*、\*\*、\*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平。

#### 四、Malmquist 二氧化碳排放绩效的影响因素分析

前文分析了二氧化碳排放绩效指数及其组成部分的变动情况和区域特征,但尚未对影响此种变动及差异性的原因做出解释,为此,本文对相关变量做进一步的分析。利用指数分解法考察二氧化碳排放水平变化的研究表明,能源强度是影响二氧化碳排放的一个最直接的因素,有时甚至可以同等看待 (Ang, 1999)。尽管对于经济发展与环境变化是否存在倒 U 型关系,不同学者对于不同国家的研究结论不一致,但都普遍认为经济发展是影响二氧化碳排放的一个重要因素 (Mills et al., 2009)。一般认为,产业结构的转化升级有助于二氧化碳排放总量的下降,一个地区的对外开放程度也可能因为有关减排技术的溢出而导致二氧化碳排放绩效的差别。地区所有制结构的不同对废水、废气等排放也存在正面或负面的影响 (李永友等, 2008)。因此,基于已有的研究成果,本文从能源强度、经济发展、产业结构、对外开放和所有制结构五个方面来考察对二氧化碳排放绩效的影响,表 5 给出了相关变量的定义,并对数据来源给予说明,式(8)则是基于面板数据构建的影响因素回归模型。

$$CMCPI_{i,t}=\gamma_0+\gamma_1EI_{i,t}+\gamma_2PC_{i,t}+\gamma_3STR_{i,t}+\gamma_4OP_{i,t}+\gamma_5SE_{i,t}+\mu_{i,t} \quad (8)$$

其中, $CMCPI_{i,t}$ 表示 $i$ 地区 $t$ 时期累计的 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数 (因变量), $EI$ 、 $PC$ 、 $STR$ 、 $OP$ 和 $SE$ 是影响二氧化碳排放绩效的因素 (解释变量), $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 、 $\gamma_4$ 和 $\gamma_5$ 是待估参数, $\gamma_0$ 是截距项, $\mu_{i,t}$ 是随机扰动项。考虑到面板数据分析可能存在的异方差性和序列相关性,本文对相应数据

进行基于广义最小二乘法的回归分析, Hausman 检验表明对 Malmquist 二氧化碳排放绩效的回归应采用固定效应模型, 表 6 给出了回归结果。

表 5 回归模型中相关变量的定义及说明

变量名	变量定义	单位	数据来源
能源强度( <i>EI</i> )	能源消费总量/GDP 总量	吨标煤/万元	《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《第三产业统计年鉴》、《新中国五十五年统计资料汇编》
经济发展( <i>PC</i> )	GDP 总量/总人口	千元/人	
产业结构( <i>STR</i> )	第三产业增加值/工业增加值	%	
对外开放( <i>OP</i> )	贸易总额/GDP 总量	%	
所有制结构( <i>SE</i> )	国有企业职工数/总就业人数	%	

表 6 Malmquist 二氧化碳排放绩效影响因素回归结果

变量名	全国	东部	东北	中部	西部
<i>ro</i>	1.8343*** (26.9534)	1.9512*** (10.7230)	2.0089*** (5.9591)	2.2380*** (8.9767)	1.6754*** (7.7507)
<i>EI</i>	-0.0966*** (26.9534)	-0.1469*** (-5.0142)	-0.1560*** (-7.1244)	-0.1122*** (-7.5995)	-0.0743*** (-7.0369)
<i>PC</i>	0.0347*** (5.6396)	0.0269*** (2.6690)	0.0172 (0.5561)	-0.0487 (-0.9925)	0.0501* (1.8868)
<i>STR</i>	0.1415*** (7.4581)	0.1225** (2.3080)	0.1794 (1.3554)	0.1546*** (3.2005)	0.0875* (1.7907)
<i>OP</i>	0.0658 (1.0338)	-0.0820 (-0.9594)	0.8143* (1.8042)	1.0648 (1.2409)	0.6430* (1.9039)
<i>SE</i>	-0.8433*** (-6.7508)	-1.7138*** (-4.3268)	0.6444 (1.2885)	-1.2776** (-2.0465)	0.3101 (0.9290)
调整后 R <sup>2</sup>	0.8974	0.8361	0.91334	0.8334	0.8287

注: 括号内为 t 统计量, \*\*\*, \*\*, \* 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平。

## 五、结论和政策启示

环境问题,特别是温室气体排放问题已受到各界的普遍关注与重视,建立合理指标对二氧化碳排放绩效进行动态监测,在此基础上分析其区域特征和影响因素是制定相关政策、履行国际公约、完成减排任务的重要依据。本文利用环境生产技术,在全要素的框架下构建了 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数,对我国 28 个省区市 1996—2007 年二氧化碳的排放情况、区域差异和影响因素进行了实证研究,结果表明:①总体上,样本期间我国二氧化碳的排放绩效有了较大程度的改进,平均增幅为 3.25%,累计提高幅度为 40.86%。其中,技术进步是绩效提高的主要源泉,平均增速为 5.09%,技术效率平均 1.49% 的退化则起了相反的作用。②在区域层面,东部的二氧化碳排放绩效最高,累计增幅在 50% 以上,东北和中部稍低,累计增幅接近 50%,西部则由于技术效率退化较为严重,累计增幅不足 25%。但从收敛性看,全国范围和区域范围内都存在显著的收敛特征,“追赶效应”较为明显,差异性也将逐步缩小。③全国范围内,影响二氧化碳排放绩效的因素中,经济发展水平和产业结构高级化程度具有显著的正面影响,能源强度和所有制结构则抑制了二氧化碳排放绩效的进一步提高。若其他因素保持相对不变,人均 GDP、第三产业增加值与工业增加值的比重、单位 GDP 能耗以及国有单位比重每增加 1 个单位将导致二氧化碳的排放绩效分别提高 0.0347、0.1415 个单位和降



低 0.0966、0.8433 个单位。在四大区域内,不同变量的显著性则有所差异,也从一个侧面说明了政策制定和实施的难度。

上述结论在政策层面是有重要意义的。一是运用 Malmquist 二氧化碳排放绩效指数(包括累计指数)可以有效地监测温室气体的排放水平并做纵向比较,各级政府可以考虑以此为基础,建立一套相关的测评体系,作为衡量减排绩效的一项依据。二是技术进步和技术效率的不协调现象表明,控制二氧化碳排放还需要在管理创新、制度创新和提高人员素质等方面大力加强,既要注重作为减排“硬”技术的科技创新,同时也必须提高“软”技术的水平。三是针对区域二氧化碳排放绩效的差异性,可尝试建立一种多边的或双边的定期交流制度,进一步加强节能减排技术、制度安排等方面的交流和扩散。四是在实现经济又好又快发展、不断改善人民生活水平的前提下,必须针对国际国内的新形势,依据目前我国经济发展的新要求,切实加快产业结构高级化的步伐。在改善和优化第二产业(特别是工业)结构、相应提高第三产业比重的同时,努力降低能源强度,提高能源消费效率。把经济发展、产业结构调整 and 降低能耗结合起来,并考虑所有制的变动,把上述因素的综合效果作为改善二氧化碳排放绩效的重要举措。五是要充分认识到对外开放程度、经济发展水平和所有制结构等相关变量对二氧化碳排放绩效影响的复杂性及对不同区域影响的差异性,在审慎的态度下有的放矢地制定相关政策并采取相应措施。

#### [参考文献]

- [1]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(15).
- [2]Barro R. X., Sala-i-Martin X. Convergence [J]. Journal of Political Economy, 1992,100 (2).
- [3]Caves D.W., Christensen L.R., Diewert W. E. Multilateral Comparisons of Output, Input and Productivity Using Superlative Index Numbers[J]. The Economic Journal, 1982, 92(365).
- [4]Chung Y.H., Färe R., Grosskopf S. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach[J]. Journal of Environmental Management, 1997,51(3).
- [5]Fan Y., Liu L. C., Wu G., Tsai H. T., Wei Y. M. Changes in Carbon Intensity in China: Empirical Findings from 1980—2003[J]. Ecological Economics, 2007, 62(3).
- [6]Färe G., Grosskopf S., Pasurka Jr. C. A. Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions[J]. Energy, 2007, 32(7).
- [7]Färe R., Grosskopf S., Norris M., Zhang Z. Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Industrialized Countries[J]. American Economic Review, 1994, 84(1).
- [8]Friedl B., Getzner M. Determinants of CO<sub>2</sub> Emissions in a Small Open Economy [J]. Ecological Economics, 2003, 45(1).
- [9]Kemfert C., Welsch H. Energy –Capital –Labor Substitution and the Economic Effects of CO<sub>2</sub> Abatement: Evidence for Germany[J]. Journal of Policy Modeling, 2000, 22(6).
- [10]Kortelainen M. Dynamic Environmental Performance Analysis: A Malmquist Index Approach [J]. Ecological Economics, 2008, 64(4).
- [11]Kumar S. Environmentally Sensitive Productivity Growth: A Global Analysis Using Malmquist–Luenberger Index [J]. Ecological Economics, 2006, 56(4).
- [12]Mielnik O., Goldemberg J. The Evolution of the “Carbonization Index” in Developing Countries [J]. Energy Policy, 1999, 27(5).
- [13]Mills J. H., Waite T A. Economic Prosperity, Biodiversity Conservation, and the Environmental Kuznets Curve [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7).
- [14]Nghiem, H., Coelli T. The Effect of Incentive Reforms upon Productivity: Evidence from the Vietnamese Rice Industry[J]. Journal of Development Studies, 2002, 39(1).
- [15]Ramanathan R. Combining Indicators of Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions: A Cross-country Comparison

- [J]. International Journal of Global Energy Issues, 2002, 17(3).
- [16]Sun J. W. The Decrease of CO<sub>2</sub> Emission Intensity Is Decarbonization at National and Global Levels[J]. Energy Policy, 2005, 33(8).
- [17]Tyteca D. On the Measurement of the Environmental Performance of Firms: A Literature Review and a Productive Efficiency Perspective[J]. Journal of Environmental Management, 1997, 46(3).
- [18]Zaim O., Taskin F. Environmental Efficiency in Carbon Dioxide Emissions in the OECD: A Non-parametric Approach[J]. Journal of Environmental Management, 2000, 58(2).
- [19]Zhang M., Mu H. L., Ning Y. D. Accounting for Energy-related CO<sub>2</sub> Emission in China, 1991—2006[J]. Energy Policy, 2009, 37(3).
- [20]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).
- [21]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, 2008a, 189(1).
- [22]Zhou P., Ang B. W., Poh K. L. Slacks-based Efficiency Measures for Modeling Environmental Performance[J]. Ecological Economics, 2006, 60(1).
- [23]Zhou P., Ang B. W., Poh K. L. Measuring Environmental Performance under Different Environmental DEA Technologies[J]. Energy Economics, 2008b, 30(1).
- [24]Zhou P., Ang B. W., Han J. Y. Total Factor Carbon Emission Performance: A Malmquist Index Analysis[J]. Energy Economics, 2010, 32(1).
- [25]Zofio J. L., Prieto A. M. Environmental Efficiency and Regulatory Standards: The Case of CO<sub>2</sub> Emissions from OECD Industries[J]. Resource and Energy Economics, 2001, 23(1).
- [26]单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算:1952—2006[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, (10).
- [27]郭庆旺, 赵志耘, 贾俊雪. 中国省份经济的全要素生产率分析[J]. 世界经济, 2005, (5).
- [28]李永友, 沈坤荣. 我国污染控制政策的减排效果——基于省际工业污染数据的实证分析[J]. 管理世界, 2008, (7).
- [29]王亚华, 吴凡, 王争. 交通行业生产率变动的 Bootstrap-Malmquist 指数分析(1980—2005)[J]. 经济学(季刊), 2008, 7(3).
- [30]袁晓玲, 张宝山, 杨万平. 基于环境污染的中国全要素能源效率研究[J]. 中国工业经济, 2009, (2).
- [31]郑照宁, 刘德顺. 考虑资本—能源—劳动投入的中国超越对数生产函数[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(5).

## Research on Dynamic Carbon Dioxide Emissions Performance, Regional Disparity and Affecting Factors in China

WANG Qun-wei, ZHOU Peng, ZHOU De-qun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** This paper evaluates the carbon dioxide emission performance of China by the proposed method, Malmquist index, during 1996—2007, and then regional disparity and the factors influencing performance is analyzed based on convergence theory and panel date model. The main results show that carbon dioxide emission performance improved 40.86% over the period with the average increasing of 3.25% and this was mainly driven by technology progress, the performance differences between four regions was found while the convergence of performance was existed, economic development, industry structure, energy intensity and ownership structure had a significant influence on carbon dioxide emission performance, though openness was not.

**Key Words:** carbon dioxide; undesirable output; Malmquist index; convergence; panel date model

[责任编辑:王燕梅]