

# 中国碳排放效率、减排潜力及实施路径分析

丰 超,黄健柏

(中南大学 商学院,湖南 长沙 410083;中南大学 金属资源战略研究院,湖南 长沙 410083)

**[摘 要]**首次运用非参数方法,从结构、技术和管理三个层面对碳排放效率、减排潜力进行了分解,实证分析了中国的碳排放效率、减排潜力及实施路径。研究发现:中国碳排放效率总体上处于较低水平,结构无效率、技术无效率和管理无效率是碳排放低效的共同成因;通过产业结构调整、区域技术平衡、市场化改革和环境管制实现的碳减排潜力约为当前排放总量的60%。因此,各省份应制定各自的碳减排策略,明确产业结构调整方向和产业碳排放效率提升路径。

**[关键词]**碳排放;共同前沿DEA;结构调整;区域平衡

**[中图分类号]** F205

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1007-9556(2016)04-0001-12

## Carbon Emission Efficiency, Reduction Potential and Its Implementing Path in China

FENG Chao<sup>1 2</sup>, HUANG Jian-bai<sup>1 2</sup>

(1.School of Business, Central South University, Changsha 410083;

2.Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** :This paper firstly decomposes carbon emission efficiency and emission reduction into three components :structural component, technical component and management component. On this basis, we then make an empirical analysis of China's total-factor carbon emission efficiency, carbon emission reduction and its corresponding implementing path. The results show that, carbon efficiency in mainland China is relatively low. And structural inefficiency, technical inefficiency and management inefficiency are three common causes of carbon emission inefficiency in China. The Chinese government is expected to realize a large amount of carbon emission reduction potential(nearly 60 percent of the current total carbon emission) through adjusting the industrial structure, narrowing the technology gap between the regions, promoting the reform of marketization, and strengthening environmental regulation. This article takes a further step to formulate emission reduction strategies for 30 provinces according to their specific situations, pointing out the direction of industrial structure adjustment and the path of improving carbon efficiency.

**Key Words**: carbon emission; meta-frontier DEA; structure adjustment; regional balance

### 一、引言

工业革命以来,以二氧化碳为首的全球温室气体排放量急剧增长,温室气体浓度渐增所导致的全球变暖正通过影响一些极端天气或气候极值的强度和频率改变自然灾害爆发的规律,并进一步影响全球粮食产量、人类生活和自然环境(张华 2014)<sup>[1]</sup>。

IPCC 第五次评估报告指出,大幅和持续减少温室气体排放是未来防控气候变化风险的核心。数据显示,2013 年全球二氧化碳排放总量为 361 亿吨,较 2012 年增长 2.3%。其中,中国的排放总量达 100 亿吨,约占全球排放总量的 28%,碳排放增长率是世界平均水平的两倍以上(Friedlingstein et al. 2014)<sup>[2]</sup>。作为

**[收稿日期]** 2016-03-04

**[基金项目]** 国家社会科学基金重大项目(13&ZD024);国家自然科学基金面上项目(71373283、71573282);国家自然科学基金青年项目(71403298)

**[作者简介]** 丰 超(1989-),男,湖南湘西人,中南大学商学院博士研究生,主要研究方向是资源与环境管理;黄健柏(1954-),男,湖南临武人,中南大学商学院教授,管理学博士,主要研究方向是金属资源安全战略。

全球最大的二氧化碳排放国,中国经济高速发展所带来的二氧化碳减排压力与日俱增,“粗放式”发展难以为继。如何做好二氧化碳减排,提升二氧化碳排放效率,进而实现低碳发展,成为中国经济发展面临的重大挑战。

近年来,中国政府已经意识到二氧化碳减排的重要性,并采取各种措施应对这一挑战。中国政府设立了应对气候变化的专门机构,在重大规划纲领中明确设定了二氧化碳排放约束性指标,并且在国际重要场合公开做出二氧化碳减排承诺。2007年,中国成立了应对气候变化领导小组。2008年,国家发展和改革委员会设立了应对气候变化司。2009年,中国在哥本哈根会议上承诺,到2020年单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放较2005年下降40%~45%。2011年,中国在“十二五”规划中提出到2015年单位GDP二氧化碳较2010年降低17%的约束性指标。2015年,中共中央政治局会议首次提出“绿色化”,把生态文明摆到非常高的位置,旨在引领经济社会生产和生活行为方式向绿色低碳方向发展。毋庸置疑,以低碳经济为内涵的发展模式已然成为中国未来发展的必然选择,而如何做好二氧化碳减排,提升二氧化碳排放效率,进而实现低碳发展,是未来需要进一步探索的重点领域。

## 二、文献综述

近年来,众多学者开始研究中国的二氧化碳排放效率和减排潜力问题。关于二氧化碳排放效率的测度,传统的单要素二氧化碳排放效率衡量了二氧化碳排放与单一投入或产出之间的一个比例关系,较为常用的指标包括人均二氧化碳排放、单位能源二氧化碳排放、单位GDP二氧化碳排放等(Mielnik and Goldemberg, 1999; Wang et al., 2005; Aldy, 2006; Aldy, 2007; Jobert et al., 2010; Fan et al., 2007; Canadell et al., 2007)<sup>[3-9]</sup>。采用单要素方法测算二氧化碳排放效率计算简单、可操作性强,但该方法的缺陷也是显而易见的:一是单要素二氧化碳排放效率衡量的是二氧化碳排放与有效产出或投入之间的一种单一比例关系,它无法度量潜在的二氧化碳排放技术效率;二是二氧化碳排放本身作为一种非合意产出,单要素二氧化碳排放效率不能反映二氧化碳产生的过程,忽略了能源结构、经济发展、要素替代等的作用。

鉴于此,Zhou等(2010)<sup>[10]</sup>基于全要素这一概念框架,运用非参数的数据包络分析方法(DEA),考察了能源、劳动力、资本等多种投入要素与有效产出和二氧化碳非合意产出之间的生产关系,并以二氧化碳排放目标值与实际值的比值作为全要素二氧化碳

排放效率的评价指标,很好地克服了单要素效率评价方法的缺陷。其后,多位学者基于全要素框架对中国的二氧化碳排放效率现状和减排潜力进行了探究,并取得了一系列成果。王群伟等(2010, 2011)<sup>[11, 12]</sup>、刘明磊等(2011)<sup>[13]</sup>对中国二氧化碳排放绩效进行了测算和评价,但其研究仅停留在绩效评价上,而对绩效损失的原因探讨不足。王群伟等(2014)<sup>[14]</sup>、Wang等(2013)<sup>[15]</sup>、Zhang等(2013)<sup>[16]</sup>、Du等(2014)<sup>[17]</sup>、Yao等(2015)<sup>[18]</sup>进一步考虑了生产技术的异质性,利用共同前沿和非参数方法,从生产技术差距和管理无效两个角度分析了中国二氧化碳排放绩效损失的来源,认为技术差距无效率和管理无效率是二氧化碳排放绩效损失的原因所在。这一系列研究对于中国二氧化碳排放绩效领域的探索具有重要的借鉴意义。

以上研究存在的主要缺陷是,没有考虑如下事实:除了技术和管理水平,产业结构也是引致各地区二氧化碳排放绩效差异的重要原因(王群伟等, 2010)<sup>[11]</sup>。因此,将二氧化碳排放绩效在结构层面进一步分解具有重要的意义。一直以来,中国政府都在倡导产业结构调整,以实现二氧化碳减排。然而,产业结构调整究竟能够在多大程度上实现二氧化碳减排?本文将二氧化碳排放绩效的影响因素在结构、技术和管理三个层面进行解剖,通过构造三层级共同前沿DEA模型,将二氧化碳排放效率解构为结构效率、技术效率和管理效率。在此基础上,本文基于“结构—技术—管理”三重视角,分析二氧化碳排放效率现状,揭示二氧化碳排放无效率的成因及减排潜力之所在,进而探索中国低碳发展的可行路径,以期对未来二氧化碳减排政策的制定提供指引和借鉴。

## 三、研究方法

鉴于当前关于二氧化碳排放绩效影响因素分解的研究还不够成熟,本文将首先梳理二氧化碳排放绩效的影响因素,并在结构、技术和管理三个层面进行解剖,然后构造三层级共同前沿DEA模型,将二氧化碳排放效率、减排潜力在“结构—技术—管理”三个层面进行分解。

### (一)二氧化碳排放绩效的影响因素解剖

目前关于中国二氧化碳排放影响因素的研究侧重于应用结构分解分析(structural decomposition analysis, SDA)和指数分解分析(index decomposition analysis, IDA),即对二氧化碳排放总量、人均二氧化碳排放量等指标的影响因素进行分解,而对二氧化碳排放绩效影响因素分解的研究还不够成熟。本文将在已有研究的基础上,梳理二氧化碳排放总量、人均二氧化碳排放量等指标的分解。

1.结构因素包括能源结构和产业结构,分别用能源消费占比和产业增加值占比表示。将能源结构作为二氧化碳排放的影响因素,是因为各种能源的热值、氧化率及二氧化碳排放系数各不相同,能源结构引致二氧化碳排放差异的原因和机理是显而易见的。中国一次能源消耗中的非化石能源占比还不到10%,提高一次能源消耗中非化石能源的比重会明显降低二氧化碳排放。之所以将产业结构作为二氧化碳排放的影响因素之一,是因为各个产业的能源密集程度存在巨大差异。以三次产业为例,第二产业为典型的能源密集型产业,同时也是能源消费和二氧化碳排放的主体。林伯强和蒋竺均(2009)<sup>[19]</sup>的研究表明,产业结构和能源结构变迁是中国人均二氧化碳排放变化的主要影响因素。

2.技术因素包括能源强度和二氧化碳强度,分别用单位生产总值能源消耗量和单位生产总值二氧化碳排放量表示。能源强度和二氧化碳强度均是衡量生产技术的指标,在其他条件相同的情况下,生产技术水平的高低决定了二氧化碳排放总量、人均二氧化碳排放量。Zhang等(2009)<sup>[20]</sup>在对中国1991-2006年能源消耗所产生的二氧化碳排放的影响因素进行分解时考虑了能源强度、二氧化碳排放强度等,发现样本区间内能源强度和二氧化碳强度的变化对各行业的二氧化碳排放具有差异化影响。

3.经济、人口因素包括经济总量、人口规模、人均收入等。经济总量一般用总产值或增加值表示,人口规模即人口总数,人均收入的替代指标包括人均GDP、人均国民收入等。在同等条件下,经济总量和人口规模的扩张会直接导致能源消费总量的增长,并进一步引致二氧化碳排放总量的增加,而人均收入的变化亦会对二氧化碳排放总量和人均二氧化碳排放量产生一定的影响。徐国泉等(2006)<sup>[21]</sup>、宋德勇和卢忠宝(2009)<sup>[22]</sup>在对中国二氧化碳排放影响因素进行分解时,均考虑了经济规模、人口规模、人均收入等经济和人口因素。

二氧化碳排放影响因素中的能源结构、产业结构、能源强度、二氧化碳强度和人均收入等均为比例关系,而经济总量、人口规模等属于总量范畴。梳理完二氧化碳排放总量、人均碳排放量的主要分解因素之后,就需要考虑二氧化碳排放绩效的影响因素分解问题。已有文献应用共同前沿和非参数方法,从生产技术差距和管理无效两个角度分析了中国二氧化碳排放绩效损失的来源,认为技术差距无效率和管理无效率是二氧化碳绩效损失的原因(王群伟等,2014;Wang et al. 2013;Zhang and Choi 2013;Du et al. 2014;Yao et al. 2015)<sup>[14-18]</sup>。显然,这些研究都忽

略了结构因素对二氧化碳排放绩效的重要影响。

表1 二氧化碳排放绩效影响因素解剖

|       |    |                                |
|-------|----|--------------------------------|
| 碳排放绩效 | 技术 | 能源强度、二氧化碳强度、人均收入等反映技术水平的影响因素   |
|       | 管理 | 能源价格、能源结构、对外开放程度等影响要素资源配置效率的因素 |
|       | 结构 | 产业结构                           |

考虑到因素分解方法(DEA)的特点并结合研究目的,本文首先将二氧化碳排放绩效影响因素从结构、技术和管理三个层面进行解剖(如表1所示),为下文二氧化碳排放绩效解构模型的构建奠定基础。其中,技术和结构因素对二氧化碳排放绩效的影响机理是显而易见的,而管理对二氧化碳排放绩效的影响来自于两个方面。(1)市场这只“看不见的手”。二氧化碳排放主要源于化石能源消耗,通过市场化改革提升资源尤其是能源资源的配置效率,能够提升二氧化碳排放的绩效水平。(2)政府这只“看得见的手”。由于二氧化碳减排的公益性、外部性和动力缺乏性等导致了市场机制失灵,制度成为二氧化碳减排的突破口,适当的环境监管有望对当前的排放行为形成有效约束(张华,2014)<sup>[23]</sup>。

由于经济总量、人口规模等指标属于总量范畴,故本文没有将其归为二氧化碳排放绩效的影响因素。将人均收入归为技术因素而将能源结构归为管理因素的逻辑在于:人均收入代表经济发展水平,有理由认为经济发展水平在一定程度上反映了技术水平;能源结构本身衡量的是各种能源要素投入的一种组合,它是资源配置的结果。

## (二) 基于DEA的二氧化碳排放绩效解构

Zhou等(2010)<sup>[10]</sup>借鉴环境绩效的评价思路,以生产理论为基础,利用数据包络分析(DEA)构建了全要素二氧化碳排放绩效指标。假设有K个决策单元(decision-making units,DMU), $x$ 为生产投入, $y$ 为期望产出, $c$ 为非期望产出二氧化碳,则全要素二氧化碳排放效率(carbon emission efficiency,CEE)可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} CEE = \min \theta \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K z_k x_k \leq x \\ \sum_{k=1}^K z_k y_k \geq y \\ \sum_{k=1}^K z_k c_k = \theta c \\ z_k \geq 0, \text{ for } k=1, \dots, K \end{array} \right. \quad (1)$$

由于与二氧化碳排放相关的生产技术在地区之间存在异质性,王群伟等(2014)<sup>[14]</sup>、Wang等(2013)<sup>[15]</sup>、

Zhang 等(2013)<sup>[16]</sup>、Du 等(2014)<sup>[17]</sup>、Yao 等(2015)<sup>[18]</sup>在考察中国的二氧化碳排放效率时,考虑了生产技术异质性,把各区域按其地理位置进行了组别划分,进而运用共同前沿 DEA 将区域全要素二氧化碳排放效率解构为技术效率和管理效率,共同前沿的概念及基本原理可以参考 Hayami(1969)<sup>[24]</sup>的研究。

事实上,各个产业自身固有的属性决定了产业间二氧化碳排放绩效的差异,我们称这种差异为产业结构异质性。为了区分产业结构异质性,本文将区域数据进一步细分为区域产业数据,然后根据产业进行组别划分。考虑到中国的实际情况,本文按第一、第二和第三产业将产业划分为三组,按区域划分为中、东、西部三大地区。如图 1 所示,共同前沿下存在三个产业分组前沿(I、II、III),而每一个产业分组前沿下又有三个区域分组前沿(I、II、III)。我们将此分组前沿称为三层级共同前沿,相应的 DEA 模型称为三层级共同前沿 DEA 模型。为了便于分析,我们将共同前沿、产业分组前沿和区域分组前沿下的二氧化碳排放效率分别用  $\vartheta^M$ 、 $\vartheta^m$  和  $\vartheta^g$  表示。

需要说明的是,本文之所以先进行产业分组后进行区域分组,而不是先进行区域分组后进行产业分组,其逻辑在于,产业异质性比区域间的技术异质性更易区分,且国家统计局对三次产业有明确的划分标准,相对于区域分组来说,产业分组的依据更为明确。在这种情况下,先进行产业分组后进行区域分组,可以最大限度地减少分组不合理带来的偏差。

共同前沿下的二氧化碳排放效率可以表示为:

$$\begin{cases} CEE = \min \vartheta^M \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^{K_M} z_k X_k \leq x \\ \sum_{k=1}^{K_M} z_k Y_k \geq y \\ \sum_{k=1}^{K_M} z_k C_k = \vartheta^M c \\ z_k \geq 0 \text{ for } k=1, \dots, K_M \end{cases} \quad (2)$$

产业分组前沿下的二氧化碳排放效率可以表示为:

$$\begin{cases} CEE = \min \vartheta^m \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^{K_m} z_k X_k \leq x \\ \sum_{k=1}^{K_m} z_k Y_k \geq y \\ \sum_{k=1}^{K_m} z_k C_k = \vartheta^m c \\ z_k \geq 0 \text{ for } k=1, \dots, K_m \end{cases} \quad (3)$$

区域分组前沿下的二氧化碳排放效率可以表示为:

$$\begin{cases} CEE = \min \vartheta^g \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^{K_g} z_k X_k \leq x \\ \sum_{k=1}^{K_g} z_k Y_k \geq y \\ \sum_{k=1}^{K_g} z_k C_k = \vartheta^g c \\ z_k \geq 0 \text{ for } k=1, \dots, K_g \end{cases} \quad (4)$$

其中  $K_M$ 、 $K_m$ 、 $K_g$  分别表示共同前沿、产业分组前沿和区域分组前沿的决策单元个数。

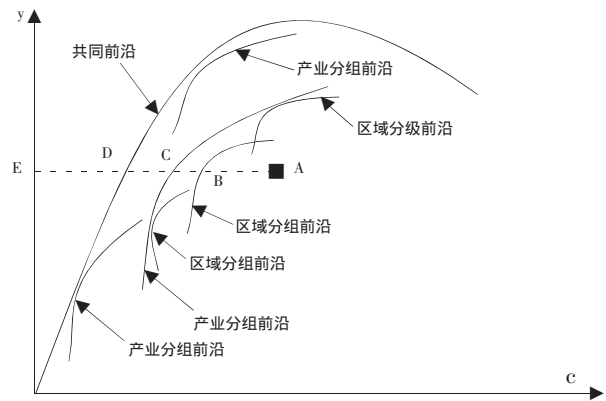


图 1 三层级共同前沿函数

如图 1 所示,对于决策单元 A,其共同前沿、产业分组前沿和区域分组前沿下的二氧化碳排放效率可以表示为:

$$\vartheta^M = \frac{DE}{AE}, \vartheta^m = \frac{CE}{AE}, \vartheta^g = \frac{BE}{AE} \quad (5)$$

由于区域分组前沿是产业分组前沿的子集,而产业分组前沿又是共同前沿的子集,所以总有  $\vartheta^M \leq \vartheta^m \leq \vartheta^g$ 。借鉴 O'Donnell 和 Griffiths(2006)<sup>[25]</sup>、王群伟等(2014)<sup>[14]</sup>的思路,我们定义决策单元 A 的全要素二氧化碳排放效率(CEE)及其解构,以及结构效率(SE)、技术效率(TE)和管理效率(ME)如下:

$$CEE = \vartheta^M, SE = \frac{\vartheta^M}{\vartheta^m}, TE = \frac{\vartheta^m}{\vartheta^g}, ME = \vartheta^g \quad (6)$$

容易证明  $CEE = SE \times TE \times ME$ 。其中 SE 越接近于 1,产业分组前沿与共同前沿下的两个绩效水平越为接近,相应的产业结构异质性程度也越低,反之亦然;TE 越接近于 1,区域分组前沿与产业分组前沿下的两个绩效水平越为接近,相应的生产技术异质性程度也越低,反之亦然;ME 越接近于 1,决策单元越接近区域分组前沿面,反之亦然。至此,本文借助于共同前沿 DEA 方法,成功地将 CEE 解构为 SE、TE 和 ME。需要说明的是,结构效率(SE)表征产业

结构异质性,当  $SE=1$  时,表明该产业具备产业发展优势,应当考虑优先发展;当  $SE<1$  时,表明该产业在二氧化碳排放绩效方面处于劣势,可以考虑向其他产业调整;当  $TE<1$  时,表明该产业存在技术无效率,应着重提升生产技术水平;当  $ME<1$  时,表明该产业存在管理无效率,应重点优化管理。

### (三) 二氧化碳减排潜力分解

上一节中,  $\theta^M$ 、 $\theta^m$  和  $\theta^s$  三个数值之间的差异为二氧化碳排放绩效损失的来源及二氧化碳减排潜力的分解提供了思路(Chiu et al. 2012)<sup>[26]</sup>。以单个决策单元为例,如图 1 所示,决策单元 A 总的绩效损失可以表示为:

$$\frac{AD}{AE} = \frac{AB+BC+CD}{AE} \quad (7)$$

其中,AD 是决策单元 A 总的二氧化碳排放损失量,CD 是由产业分组前沿 II 和共同前沿的产业异质性造成的损失量,BC 是由区域分组前沿 II 和产业分组前沿 II 的生产技术差距造成的损失量,AB 是由决策单元 A 在区域分组前沿 II 内由于自身管理无效造成的损失量。与之相对应,AD/AE、AB/AE、BC/AE、CD/AE 为相应的二氧化碳排放绩效损失。

扩展到一般情况来看,由于共同前沿隐含了所有区域三次产业的最佳水平,某区域单个产业以此为基准测算的损失可以认为是该区域单个产业总的绩效损失(CEI)。其中一部分是由于产业分组前沿和共同前沿的产业异质性造成的结构无效率(SI),另一部分是由于区域分组前沿和产业分组前沿的技术差距造成的技术无效率(TI),还有一部分是由于区域分组前沿组别内的自身管理无效造成的管理无效率(MI),具体形式如下:

$$CEI=1-\theta^M, SI=\theta^m-\theta^M, TI=\theta^s-\theta^m, MI=1-\theta^s \quad (8)$$

根据 DEA 方法的定义,非有效决策单元投入产出与前沿面的差距可以视为投入缩减和产出增长潜力,即无效率水平表征潜力空间。上文已经探讨了二氧化碳排放绩效损失的三大来源:结构无效率、技术无效率和管理无效率。同理,我们将二氧化碳减排潜力(CRP)分解为结构潜力(SP)、技术潜力(TP)和管理潜力(MP),具体形式如下:

$$CRP=(1-\theta^M)*c, SP=(\theta^m-\theta^M)*c, TP=(\theta^s-\theta^m)*c; MP=(1-\theta^s)*c \quad (9)$$

其中,  $c$  为非期望产出二氧化碳。具体来说,结构无效率来源于产业结构异质性,各区域可以通过产业结构调整、发展自身优势产业发挥结构潜力。技术无效率来源于区域间的生产技术异质性,各区域可以通过区域技术平衡、缩小区域间技术差距来发挥技术潜力。管理无效率来自于两个方面:一是自身

市场要素资源配置无效,资源配置的低效率会造成资源尤其是能源资源的浪费,成为二氧化碳排放无效的成因;二是政府环境监管方面的缺位,无疑会导致严重的排放问题。因此,必须通过市场化改革,发挥市场在资源配置中的决定性作用,提升资源配置效率。与此同时,对于具有外部性的排放问题,政府应通过加强环境管制达到减排目的,最终实现管理潜力。

如图 2 所示,本文从“结构—技术—管理”三个层面勾勒出二氧化碳减排的技术路线图。事实上,中国政府一直都在致力于推动产业结构调整、市场化改革等,其努力的方向与本文勾勒的二氧化碳减排技术路径基本一致。有理由相信,准确测算二氧化碳减排进程中结构调整、市场化改革等措施所能带来的潜在二氧化碳减排“红利”,有利于二氧化碳减排政策制定和实施者做到心中有数。

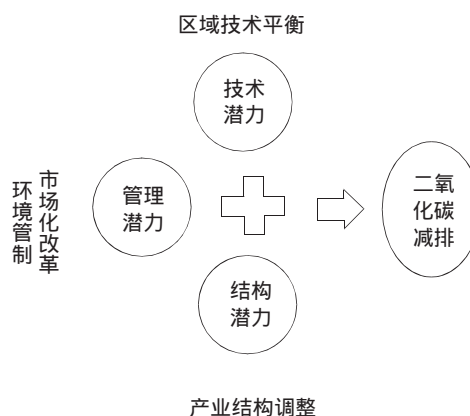


图2 二氧化碳减排的技术路线图

### 四、数据来源及处理

本文采用2012年中国省级三次产业数据,区域跨度为30个省市(西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区除外),产业划分为第一、第二和第三产业,区域划分为东、中、西部三大地区。关于三次产业投入产出指标的选取,已有研究尚未取得共识。我们选取2012年作为基年数据,其逻辑在于:本文最主要的研究目的是测算二氧化碳减排潜力并设计相应的实施路径,而二氧化碳减排潜力是基于当前的状况对未来进行的一种判断。因此,对二氧化碳减排潜力的测算,所用数据越接近于当下越好。由于数据限制,本文未能获得2012年以后的数据。另外,本文没有选取多个年份形成面板数据,这主要是因为,选取2012年作为基年数据已完全能够满足研究目的和需求,而且考虑到省级三次产业的截面单元已经达到90个,形成面板数据后过多的单元反而不利于有针对性地设计实施路径、提供政策建议。

本文借鉴雷西洋等(2014)<sup>[27]</sup>的思路,从人、财、物三个角度选取投入产出指标,同时遵循两点原则。(1)统一性原则,即所取指标在各产业生产过程中的地位是一致的。比如,化肥可以作为一种农业投入,若将它作为第二产业和第三产业的投入却不合适,将化肥作为三次产业的投入指标即违反了统一性原则。将能源作为三次产业的投入指标是可以的,因为能源投入对于各产业的生产活动都是必不可少的。(2)对应原则,即投入指标和产出指标存在直接对应的“投入—产出”关系。比如,投入指标包括能源而未包括化肥、农药、农膜、水泥等投入,在测算三次产业的二氧化碳排放时,只包含三次产业能源消耗所排放的二氧化碳,而第一产业中化肥、农药、农膜投入以及第二产业中水泥投入所产生的直接和间接二氧化碳排放并不计算在内。

雷西洋等(2014)<sup>[27]</sup>、汪晓芳(2011)<sup>[28]</sup>选取就业人数和全社会固定资产投资作为三次产业的投入指标,同时选取生产总值作为产出指标。结合实际生产过程和本文的研究目的,本文在雷西洋等<sup>[27]</sup>、汪晓芳<sup>[28]</sup>的基础上增加了能源投入(E)和二氧化碳排放非合意产出(C)。就业人数(L)、全社会固定资产投资(K)和产业总产值(Y)数据来自于《中国统计年鉴 2013》。由于官方没有统一公布各省市的三次产业能源消费数据,而且各地统计年鉴在统计口径和方式上存在较大差异,为确保统一性,我们从《中国能源统计年鉴 2013》中的地区能源平衡表中统一提取各地区三次产业的能源消费量(包括终端消费量和损失量),并统一折算为标准量。其中,生活部门的能源消费量

以就业人员数为权重分摊给三次产业。将生活消费的那一部分能源纳入到能源投入中,其逻辑在于,生活能源消费作为劳动力投入再生产活动的保障和基础,对于整个社会生产来说都是必不可少的。

各地区三次产业二氧化碳排放既包括本地区各产业化石能源消费所产生的直接二氧化碳排放,还包括电力消费量中火力发电所产生的间接二氧化碳排放。化石能源二氧化碳排放利用 IPCC 推荐的方法进行估算:

$$CO_2 = \sum_{i=1}^I E_i \times NCV_i \times CC_i \times COF_i \times \left( \frac{44}{12} \right) \quad (10)$$

式中,CO<sub>2</sub>为二氧化碳排放量,E<sub>i</sub>为第i种能源的消费量(包括洗精煤、其他洗煤、型煤等16种化石能源消费量),NCV<sub>i</sub>为第i种能源的净发热值,CC<sub>i</sub>为碳含量,COF<sub>i</sub>为氧化因子。能源发热值数据来自于《中国能源统计年鉴 2013》附录4,碳含量数据来自于IPCC(2007),氧化因子来自于国家气候变化协调小组第三工作组。电力消费所产生的间接二氧化碳排放(来自于火力发电)根据国家发改委公布的电量排放因子0.954tCO<sub>2</sub>/MWh计算。根据本文的测算,2012年中国(西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区未包括在内)二氧化碳排放总量为92.5亿吨,人均排放量为6.88吨。作为参照,Quéré等(2013)<sup>[29,30]</sup>的数据显示,2011年和2012年中国人均二氧化碳排放量分别为6.6和7.0吨,其与本文测算的结果存在差异主要是因为报告中的排放数据包含了水泥的二氧化碳排放。2012年东、中、西部地区三次产业各指标的数据如表2所示。

表2 2012年东、中、西部地区三次产业各指标情况

| 指标              | 单位    | 东部I   | 中部I   | 西部I   | 东部II   | 中部II   | 西部II   | 东部III  | 中部III | 西部III |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| L               | 万人    | 8267  | 10305 | 9947  | 12760  | 6687   | 3859   | 12533  | 8938  | 6116  |
| E               | 万吨标准煤 | 6303  | 6470  | 6707  | 113913 | 61958  | 60488  | 33310  | 16671 | 17228 |
| K               | 亿元    | 3718  | 4101  | 3153  | 71008  | 50720  | 35387  | 99033  | 51001 | 49798 |
| Y               | 亿元    | 20495 | 17546 | 14252 | 154679 | 73865  | 56861  | 145564 | 50498 | 42090 |
| CO <sub>2</sub> | 万吨    | 18423 | 17689 | 18903 | 329175 | 182676 | 182406 | 90271  | 41626 | 43690 |

注:I、II、III分别表示第一、第二和第三产业。

### 五、实证分析

根据公式(1),本文利用省级三次产业数据测算省级三次产业的二氧化碳排放效率、减排潜力,并根据公式(2)至(9)将其在结构、技术和管理三个维度进行分解。为了得到全国、区域和省级的二氧化碳排放效率及其分解,本文沿袭Hu和Wang(2006)<sup>[31]</sup>、Wang等(2014)<sup>[32]</sup>的思路,基于省级三次产业数据结果,采用加权平均值法求取全国、区域和省级的二氧化碳排放效率及其分解。

#### (一)二氧化碳排放效率分析

为了便于分析,本文以区域划分为依据,从全国、区域和省级三个层面对二氧化碳排放效率及其解构进行分析。

1.全国层面。整体来看,中国二氧化碳排放绩效损失超过0.6,结构无效率、技术无效率和管理无效率是二氧化碳排放低效的共同成因。在其他条件不变的前提下,通过产业结构调整、区域技术平衡、市场化改革和环境管制可实现的二氧化碳减排潜力约

为当前排放总量的 60%。分产业来看,第一、第二和第三产业二氧化碳排放效率分别为 0.554、0.300、0.615,产业间的二氧化碳排放效率差异明显。其中,

技术效率和管理效率低下是各产业共同存在的问题,结构无效率是第二产业二氧化碳排放绩效水平远低于第一和第三产业的重要原因(见图 3 和表 3)。

表 3 2012 年东、中、西部地区各产业二氧化碳排放效率及其解构

| 地区 | 第一产业  |       |       |       | 第二产业  |       |       |       | 第三产业  |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | CEE   | SE    | TE    | ME    | CEE   | SE    | TE    | ME    | CEE   | SE    | TE    | ME    |
| 东部 | 0.670 | 0.961 | 0.943 | 0.739 | 0.319 | 0.538 | 0.909 | 0.653 | 0.794 | 1.000 | 1.000 | 0.794 |
| 中部 | 0.559 | 0.956 | 0.732 | 0.799 | 0.208 | 0.413 | 0.519 | 0.973 | 0.475 | 1.000 | 0.549 | 0.866 |
| 西部 | 0.435 | 0.951 | 0.581 | 0.787 | 0.356 | 0.700 | 0.732 | 0.694 | 0.377 | 1.000 | 0.419 | 0.901 |
| 全国 | 0.554 | 0.957 | 0.747 | 0.775 | 0.300 | 0.547 | 0.732 | 0.748 | 0.615 | 1.000 | 0.734 | 0.837 |

第二产业的结构无效率表明,当前我国三次产业间存在显著的产业结构异质性,且第二产业在二氧化碳排放绩效表现上具有“先天性”劣势。事实上,第二产业既是能源密集型产业,同时也是能源消费和二氧化碳排放的主体,具有“高能耗和高排放”的典型特征。2012 年,第一、第二和第三产业单位总产值二氧化碳排放分别为 1.05、2.43、0.74 吨/万元,这也从一个侧面印证了中国三次产业间存在显著的产业结构异质性这一事实。此外,三次产业共同存在的技术无效率表明,生产技术表现出区域不平衡特征。三次产业共同存在的管理无效率说明,中国在市场要素资源配置和环境监管方面存在很大问题。

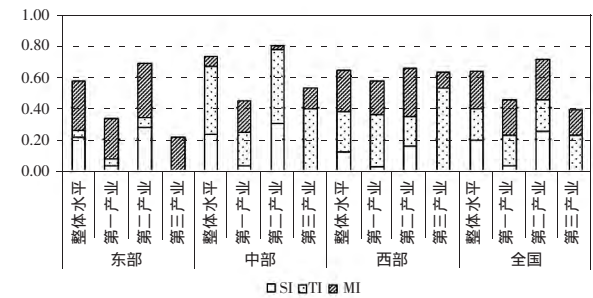


图 3 2012 年东、中、西部地区各产业二氧化碳排放绩效损失解构

2.区域层面。分地区来看,二氧化碳排放效率东部为最高,西部次之,中部最低。得益于较佳的技术表现( $TE>0.9$ ),东部地区整体二氧化碳排放效率水平远高于中西部地区。中部地区具有较好的管理表现( $ME>0.9$ ),但其整体二氧化碳排放效率水平仍低于东、西部地区,这应归咎于其较低的结构效率( $SE<0.6$ )和技术效率( $TE<0.6$ )水平(见图 3 和表 3)。改革开放以来,得益于得天独厚的地理位置,东部地区通过国际贸易和投资,积极引进国外先进的生产技术和设备,其技术水平在三大地区中处于最前沿。中西部地区由于经济、历史、地理等原因,技术设备并没有得到很好的改善,该地区的生产技术一直处于较低水平。

具体到各产业,第一产业的二氧化碳排放效率东部为最高(0.670),中部次之(0.559),西部最低(0.435),各区域技术效率之间的差异,即生产技术异质性是导致第一产业二氧化碳排放效率表现出空间差异化特征的重要原因。三大地区第二产业的二氧化碳排放效率均处于极低水平( $CEE<0.4$ ),其无效率的原因不尽相同。东部地区虽有良好的技术表现( $TE>0.9$ ),但其结构无效率和管理无效率阻碍了第二产业在二氧化碳排放效率上取得良好表现。中部地区在管理上表现不俗( $ME>0.9$ ),但其低下的结构效率( $SE<0.6$ )和技术效率( $TE<0.6$ )最终拉低了该地区第二产业的二氧化碳排放效率水平。第三产业的二氧化碳排放效率东部为最高,这主要得益于其良好的技术表现( $TE>0.9$ ),而其管理效率仍有待提高。中西部地区则同时存在技术无效率和管理无效率(见图 3 和表 3)。

3.省级层面。分省来看,东部的河北,中部的山西,西部的贵州、云南、甘肃、青海、宁夏,其二氧化碳排放效率处于极低水平,二氧化碳排放绩效损失均超过 0.8,但其无效率的成因不尽相同。河北的生产技术水平表现较佳,但其管理和结构无效率却最终导致该省二氧化碳排放绩效处于极低水平。2012 年河北的第二产业比重为 52.7%,且是以加工、冶炼等“高消耗和高排放”为典型特征的重工业为主。2012 年河北的粗钢产量为 1.8 亿吨,接近全国粗钢产量的 1/4。不难理解,河北在产业结构上处于劣势,结构效率低下。其实,对于河北来说,其最严重的不是结构问题,而是管理问题,市场机制不健全和环境监管缺位是该省二氧化碳排放绩效损失的最重要来源,结合该省当前严峻的环境问题,这一点很容易理解。中部的山西,西部的贵州、云南、甘肃、青海、宁夏同时存在结构无效率、技术无效率和管理无效率,但山西的技术无效率问题更为突出,而西部省份的二氧化碳排放绩效损失则主要来源于管理无效率(见图 4)。

表 4 2012 年省级各产业二氧化碳排放效率及其解构

| 省份  | 第一产业  |       |       |       | 第二产业  |       |       |       | 第三产业  |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | CEE   | SE    | TE    | ME    | CEE   | SE    | TE    | ME    | CEE   | SE    | TE    | ME    |
| 北京  | 0.145 | 0.625 | 0.944 | 0.245 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 天津  | 0.186 | 0.638 | 0.924 | 0.316 | 0.527 | 0.707 | 0.745 | 1.000 | 0.997 | 1.000 | 1.000 | 0.997 |
| 河北  | 0.471 | 0.924 | 0.904 | 0.564 | 0.089 | 0.323 | 1.000 | 0.277 | 0.519 | 1.000 | 1.000 | 0.519 |
| 辽宁  | 0.715 | 0.849 | 0.980 | 0.859 | 0.379 | 0.722 | 0.525 | 1.000 | 0.481 | 1.000 | 1.000 | 0.481 |
| 上海  | 0.322 | 1.000 | 0.986 | 0.327 | 0.706 | 0.990 | 1.000 | 0.713 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 江苏  | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.229 | 0.362 | 1.000 | 0.634 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 浙江  | 0.706 | 0.974 | 0.986 | 0.735 | 0.352 | 0.516 | 1.000 | 0.681 | 0.805 | 1.000 | 1.000 | 0.805 |
| 福建  | 0.793 | 0.983 | 0.956 | 0.844 | 0.286 | 0.446 | 1.000 | 0.640 | 0.642 | 1.000 | 1.000 | 0.642 |
| 山东  | 0.764 | 0.991 | 0.869 | 0.887 | 0.188 | 0.364 | 1.000 | 0.517 | 0.522 | 1.000 | 1.000 | 0.522 |
| 广东  | 0.579 | 1.000 | 0.951 | 0.608 | 0.671 | 0.671 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 海南  | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.194 | 0.441 | 1.000 | 0.439 | 0.385 | 1.000 | 1.000 | 0.385 |
| 山西  | 0.139 | 0.764 | 1.000 | 0.182 | 0.091 | 0.340 | 0.267 | 1.000 | 0.349 | 1.000 | 0.485 | 0.719 |
| 吉林  | 0.870 | 0.887 | 0.982 | 1.000 | 0.580 | 0.857 | 0.677 | 1.000 | 0.485 | 1.000 | 0.485 | 1.000 |
| 黑龙江 | 0.455 | 0.804 | 0.566 | 1.000 | 0.285 | 0.523 | 0.545 | 1.000 | 0.380 | 1.000 | 0.380 | 1.000 |
| 安徽  | 0.890 | 1.000 | 0.890 | 1.000 | 0.213 | 0.323 | 0.658 | 1.000 | 0.538 | 1.000 | 0.644 | 0.836 |
| 江西  | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.207 | 0.323 | 0.641 | 1.000 | 0.644 | 1.000 | 0.644 | 1.000 |
| 河南  | 0.535 | 1.000 | 0.979 | 0.546 | 0.170 | 0.323 | 0.605 | 0.870 | 0.550 | 1.000 | 0.627 | 0.878 |
| 湖北  | 0.609 | 1.000 | 0.609 | 1.000 | 0.165 | 0.384 | 0.430 | 1.000 | 0.388 | 1.000 | 0.570 | 0.681 |
| 湖南  | 0.551 | 1.000 | 0.551 | 1.000 | 0.193 | 0.347 | 0.557 | 1.000 | 0.598 | 1.000 | 0.598 | 1.000 |
| 内蒙古 | 0.228 | 0.781 | 0.483 | 0.604 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.243 | 1.000 | 0.243 | 1.000 |
| 广西  | 0.863 | 1.000 | 0.863 | 1.000 | 0.154 | 0.323 | 0.597 | 0.799 | 0.488 | 1.000 | 0.490 | 0.996 |
| 重庆  | 0.298 | 0.873 | 0.708 | 0.482 | 0.249 | 0.454 | 0.549 | 1.000 | 0.500 | 1.000 | 0.500 | 1.000 |
| 四川  | 0.742 | 1.000 | 0.742 | 1.000 | 0.190 | 0.407 | 0.562 | 0.831 | 0.464 | 1.000 | 0.500 | 0.928 |
| 贵州  | 0.249 | 1.000 | 0.249 | 1.000 | 0.075 | 0.344 | 0.597 | 0.367 | 0.255 | 1.000 | 0.477 | 0.534 |
| 云南  | 0.557 | 1.000 | 0.557 | 1.000 | 0.102 | 0.353 | 0.597 | 0.487 | 0.406 | 1.000 | 0.498 | 0.815 |
| 陕西  | 0.360 | 0.900 | 0.628 | 0.636 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.398 | 1.000 | 0.398 | 1.000 |
| 甘肃  | 0.273 | 1.000 | 0.816 | 0.335 | 0.085 | 0.323 | 0.597 | 0.439 | 0.450 | 1.000 | 0.450 | 1.000 |
| 青海  | 0.389 | 0.856 | 0.744 | 0.610 | 0.083 | 0.407 | 0.597 | 0.341 | 0.282 | 1.000 | 0.500 | 0.564 |
| 宁夏  | 0.343 | 0.902 | 0.807 | 0.471 | 0.130 | 0.726 | 0.682 | 0.263 | 0.481 | 1.000 | 0.481 | 1.000 |
| 新疆  | 0.434 | 0.928 | 0.468 | 1.000 | 0.259 | 0.835 | 0.781 | 0.397 | 0.389 | 1.000 | 0.446 | 0.874 |

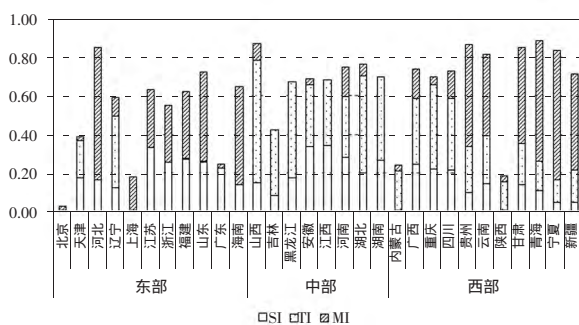


图 4 2012 年省级二氧化碳排放绩效损失解构

具体到各产业,江苏、海南、江西的第一产业二氧化碳排放效率均为 1,成为该产业内的标杆,而北京、天津、山西的第一产业二氧化碳排放效率则处于

极低水平,管理效率低下( $ME < 0.4$ )是二氧化碳排放低效的主要原因。在第二产业,同属“京津冀”的北京与河北形成鲜明的对比,其二氧化碳排放效率值分别为 1 和 0.08,北京成为第二产业标杆,而河北则成为最差的代表。具体来看,结构效率( $SE < 0.4$ )和管理效率( $ME < 0.3$ )低下是河北二氧化碳排放效率低下的原因。东部的北京、上海、江苏和广东第三产业二氧化碳排放效率均为 1,成为产业内的标杆。各省份的第三产业结构效率均为 1,表明第三产业是所有省份的优势产业。东部省份构成了技术前沿( $TE = 1$ ),而中西部省份与之存在较大差距( $TE < 0.7$ ),生产技术的区域不平衡特征明显。东部的河北、辽宁、福建、山东、海南以及西部的贵州、青海均在不同程度

上存在管理效率低下的问题(见表4)。

(二)二氧化碳减排潜力及实施路径分析

1.减排潜力。整体来看,全国二氧化碳减排总潜力达57.84亿吨,约为当前排放总量的60%。其中,结构潜力、技术潜力和管理潜力分别达到17.35、18.88、21.60亿吨,表明未来通过产业结构调整、区域技术平衡和以市场化改革与环境管制为主导的优化管理可实现的二氧化碳减排潜力巨大,三项措施所能实现的二氧化碳减排潜力占比分别为30.01%、32.65%、37.35%。分地区来看,东、中、西部地区可实现的二氧化碳减排潜力分别达24.88、17.42、15.54亿吨,三大地区的二氧化碳减排潜力约占全国总潜力的43.01%、30.12%、26.86%,东、中、西部均有较大的减排空间(见表5)。

表5 2012年全国范围及东、中、西部三大地区二氧化碳减排潜力及其解构(单位:亿吨)

| 地区   | SP     | TP     | MP     | CRP     | 潜力占比    |
|------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 东部   | 9.07   | 2.04   | 13.77  | 24.88   | 43.01%  |
| 中部   | 5.46   | 10.55  | 1.42   | 17.42   | 30.12%  |
| 西部   | 2.82   | 6.30   | 6.42   | 15.54   | 26.86%  |
| 全国   | 17.35  | 18.88  | 21.60  | 57.84   | 100.00% |
| 潜力占比 | 30.01% | 32.65% | 37.35% | 100.00% | ——      |

具体来说,东部存在巨大的结构潜力和管理潜力,中部地区则拥有不错的结构潜力和技术潜力,西部地区有着一定的技术潜力和管理潜力。在省级层面,河北、江苏、山东、山西、河南、湖北和四川的二氧化碳减排潜力均超过3亿吨,是未来二氧化碳减排的大户,而其减排空间来源不尽相同。东部河北、江苏和山东的减排空间来源于结构潜力和管理潜力,中西部山西、河南、湖北和四川未来的减排空间则来源于结构潜力和技术潜力。此外,辽宁、浙江和湖南的二氧化碳减排潜力也超过2亿吨,辽宁的减排空间主要来源于技术潜力,浙江来源于结构潜力和管理潜力,湖南则来源于技术潜力和结构潜力(见表5和图5)。今后不论是在全国层面、区域层面还是省级层面,各地都应根据自身的二氧化碳减排潜力分布状况有针对性地采取措施,做到有的放矢。

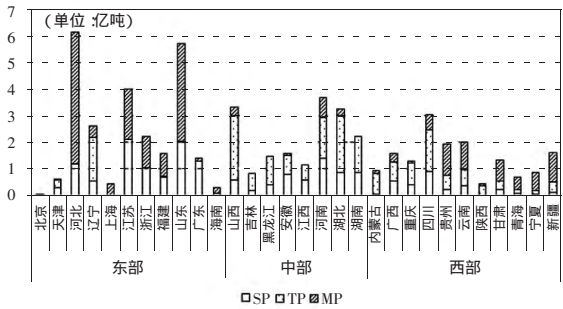


图5 2012年中国省级区域二氧化碳减排潜力

2.实施路径。中国各省份间二氧化碳排放无效率成因和减排潜力分布表现出空间差异化特征,为此,本文结合表4从省级层面为各省份量身制定二氧化碳减排策略,以期指明产业结构调整方向和产业二氧化碳排放效率提升路径,如表6所示。

表6 各省份二氧化碳减排策略识别

| 地区  | 第一产业 |      |      | 第二产业 |      |      | 第三产业 |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 优先发展 | 提升技术 | 优化管理 | 优先发展 | 提升技术 | 优化管理 | 优先发展 | 提升技术 | 优化管理 |
| 北京  |      | △    | △    | ⊙    |      |      | ⊙    |      |      |
| 天津  |      | △    | △    |      | △    |      | ⊙    |      |      |
| 河北  |      | △    | △    |      |      | △    | ⊙    |      | △    |
| 辽宁  |      | △    | △    |      | △    |      | ⊙    |      | △    |
| 上海  | ⊙    | △    | △    |      |      | △    | ⊙    |      |      |
| 江苏  | ⊙    |      |      |      |      | △    | ⊙    |      |      |
| 浙江  |      | △    | △    |      |      | △    | ⊙    |      | △    |
| 福建  |      | △    | △    |      |      | △    | ⊙    |      | △    |
| 山东  |      | △    | △    |      |      | △    | ⊙    |      | △    |
| 广东  | ⊙    | △    | △    |      |      |      | ⊙    |      |      |
| 海南  | ⊙    |      |      |      |      | △    | ⊙    |      | △    |
| 山西  |      |      | △    |      | △    |      | ⊙    | △    | △    |
| 吉林  |      | △    |      |      | △    |      | ⊙    | △    |      |
| 黑龙江 |      | △    |      |      | △    |      | ⊙    | △    |      |
| 安徽  | ⊙    | △    |      |      | △    |      | ⊙    | △    | △    |
| 江西  | ⊙    |      |      |      | △    |      | ⊙    | △    |      |
| 河南  | ⊙    | △    | △    |      | △    | △    | ⊙    | △    | △    |
| 湖北  | ⊙    | △    |      |      | △    |      | ⊙    | △    | △    |
| 湖南  | ⊙    | △    |      |      | △    |      | ⊙    | △    |      |
| 内蒙古 |      | △    | △    | ⊙    |      |      | ⊙    | △    |      |
| 广西  | ⊙    | △    |      |      | △    | △    | ⊙    | △    | △    |
| 重庆  |      | △    | △    |      | △    |      | ⊙    | △    |      |
| 四川  | ⊙    | △    |      |      | △    | △    | ⊙    | △    | △    |
| 贵州  | ⊙    | △    |      |      | △    | △    | ⊙    | △    | △    |
| 云南  | ⊙    | △    |      |      | △    | △    | ⊙    | △    | △    |
| 陕西  |      | △    | △    | ⊙    |      |      | ⊙    | △    |      |
| 甘肃  | ⊙    | △    | △    |      | △    | △    | ⊙    | △    |      |
| 青海  |      | △    | △    |      | △    | △    | ⊙    | △    | △    |
| 宁夏  |      | △    | △    |      | △    | △    | ⊙    | △    |      |
| 新疆  |      | △    |      |      | △    | △    | ⊙    | △    | △    |

在产业结构调整方面,对于所有省份来说,第三产业都是可以考虑优先发展的产业,这也与当前中央政府倡导的产业结构调整方向基本一致。上海、江苏、广东、海南、安徽、江西、河南、湖北、湖南、广西、四川、贵州、云南和甘肃具备第一产业发展优势,这些省市可以考虑有选择性地产业结构向第一产业调整。北京、内蒙和陕西具备第二产业发展优势,这

些省市可以考虑继续保留或发展第二产业。

在技术方面,江苏、海南、山西和江西是第一产业技术标杆,其余省份都应以这四个省份为标杆着力提升第一产业技术水平。天津、辽宁、山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南、广西、重庆、四川、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏和新疆应着力提升第二产业技术水平。东部 11 省份均为第三产业技术标杆,中西部地区 19 省份则与东部省份技术差距明显,应以东部省份为标杆着力提升第三产业技术水平。

在管理方面,第一产业管理水平有待提高的包括北京、天津、河北、辽宁、上海、浙江、福建、山东、广东、山西、河南、内蒙、重庆、陕西、甘肃、青海和宁夏,河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、海南、河南、广西、四川、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏和新疆则需进一步提升第二产业管理水平,而天津、河北、辽宁、浙江、福建、山东、海南、山西、安徽、河南、湖北、广西、四川、贵州、云南、青海和新疆应着力提升第三次产业管理能力。

表 6 中,各省份的二氧化碳减排策略指明了产业结构调整方向和产业二氧化碳排放效率提升路径。在具体实施措施上,结合二氧化碳减排的技术路线图(见图 2),各省份可以通过产业结构调整、发展自身优势产业实现结构潜力。为了实现技术潜力,各技术无效率省份可以通过加强与标杆省份的技术合作与交流,缩小技术差距来实现技术潜力。由于管理无效率来自于自身市场要素资源配置无效和环境监管的缺失,相应省份应该进一步推动市场化改革,发挥市场在资源配置中的决定性作用,提升市场要素的资源配置效率。同时,要加大环境监管的力度,对排放行为形成有效约束,进而实现管理潜力。

## 六、研究结论与政策建议

### (一)研究结论

本文在梳理二氧化碳排放绩效影响因素的基础上,通过构造三层级共同前沿非参数模型,将二氧化碳排放效率解构为结构效率、技术效率和管理效率。基于中国省级三次产业数据,本文从“结构—技术—管理”三重视角对中国二氧化碳排放效率、减排潜力及实施路径进行了实证分析。研究发现:中国二氧化碳排放效率总体上处于较低水平,结构无效率、技术无效率和管理无效率是二氧化碳排放低效的共同成因,各省份通过产业结构调整、区域技术平衡、市场化改革和环境管制可实现的二氧化碳减排潜力约为当前排放总量的 60%;第一、第二和第三产业二氧化碳排放效率分别为 0.554、0.300、0.615,显著的结构异质性是产业间二氧化碳排放效率差异明显的重

要原因,且第二产业在二氧化碳排放绩效表现上具有“先天性”劣势;二氧化碳排放无效率成因和减排潜力分布表现出空间差异化特征,二氧化碳排放效率东部为最高,西部次之,中部最低,东部地区得益于较佳的技术表现,其整体二氧化碳排放效率水平远高于中西部地区,中部地区则具有较好的管理表现,但其整体二氧化碳排放效率水平仍低于东西部地区,这主要归咎于其较低的结构效率和技术效率水平,相应地,东部具有巨大的结构潜力和管理潜力,中部地区则拥有不错的结构潜力和技术潜力,西部地区有着一定的技术潜力和管理潜力;各省份拥有的产业优势不尽相同,对于所有省份来说,第三产业都是可以考虑优先发展的产业,而上海、江苏、广东、海南、安徽、江西、河南、湖北、湖南、广西、四川、贵州、云南和甘肃具备第一产业发展优势,北京、内蒙和陕西则具备第二产业发展优势。

### (二)政策建议

1.充分考虑各省的产业优劣势,合理产业布局,积极推进产业结构调整。过去 30 年来,快速工业化使得中国的第二产业比重急剧攀升并具有“高能耗和高排放”的典型特征。同一时期,第一产业在萎缩,而第三产业增长缓慢。面临日益严峻的资源和环境约束,未来应把推动第三产业大发展作为产业结构调整的重心,并注重发展的质量。这就要求各地区根据自身的实际情况,营造有利于第三产业发展的政策和体制环境,并提升该产业的技术水平。同时,要转换工业经济增长的动力机制,通过创新引领产业素质的提高<sup>[33]</sup>,严格控制高耗能、高排放和产能过剩工业行业的发展规模,提高行业准入门槛。当前,工业面临“大而不强”的尴尬局面,工业行业中低端(尤其是冶炼和压延加工)的产能过剩问题形势严峻,加速淘汰落后过剩产能刻不容缓<sup>[34,35]</sup>。产业结构调整是一个长期的过程,且对于一个国家或地区来说,产业间的完全替代是不可实现的,应从中央顶层设计出发,充分考虑各省的产业优劣势,合理布局产业,警惕在全国层面出现产业发展无序和“空心化”现象。虽然第三产业对所有省份来说都是可以考虑优先发展的产业,但仍然建议具备第一产业发展优势的河南、湖南和安徽等产粮大省继续大力发展第一产业,为社会经济的进一步发展“储仓备粮”,而具备第二产业优势或者产业劣势不是特别明显的省份有选择地继续保留并发展第二产业,积极推进产业优化升级。

2.加强技术无效率和技术标杆省份间的技术合作与交流,缩小区域间技术差距。充分利用技术的后发优势(advantage of backwardness)是后发国家赶超领先国家,提升自身效率的有效途径<sup>[36]</sup>。长期以来,

中国将重心放在如何从发达国家引进先进技术和设备上,而忽略了内部区域间的技术平衡和交流。中西部省份普遍存在的技术无效率表明,生产技术表现出空间差异化特征,东部省份处在技术前沿,而中西部省份与之技术差距明显。这种区域间显著的生产技术异质性,成为中国二氧化碳排放无效率的一大来源。要进一步提升中西部省份的二氧化碳排放效率,必须加强省际间产业技术的合作和交流,提高中西部地区的技术吸收能力,以缩小区域间技术差距来实现技术潜力。此外,考虑到各地区经济发展的“不平衡”特征,中央应进一步完善生态补偿机制,加大对中西部地区的转移支付力度,积极引导资金、技术等生产要素向中西部地区流动,提高中西部地区的经济实力和技术水平。中西部省份应充分利用能源、人力和自然资源方面的优势,积极引进东部地区先进的技术和设备,制定优惠政策,开辟产业和科技园区,调整生产力布局,改造传统产业。

3. 积极推动市场化改革,发挥市场在资源配置中的决定性作用。要加大环境管制力度,弥补市场机制失灵带来的缺位。由于能源、资源性产品价格受到政府的严格管制,价格偏离价值,不能反映市场供求关系、资源稀缺程度和环境损害成本<sup>[37]</sup>,最终会影响经济活力和要素市场资源配置效率。对于中国这样一个从计划经济向市场经济转轨的国家来说,市场化改革的每一个方面无疑都会推动资源配置效率的进一步提高<sup>[38]</sup>。各级政府应将工作重心转移到创造市场机制正常发挥的条件和环境上来,而不是置身于市场中,成为市场的主体。在市场这只“看不见的手”所能企及的任何地方,政府都应有壮士断腕的决

心,敢于简政放权,不加干预,而对于市场失灵的排放问题,政府可以通过完善环境保护法律法规、加大环境执法力度,做到“有法可依”和“执法必严”,保障环境规制的强有力实施。此外,改革措施和监管机制还应充分考虑地区差异性,采取有针对性的措施,做到有的放矢。东部地区作为改革开放的前沿阵地,市场化已取得阶段性进展,未来应进一步加大环境监管力度,努力营造大气污染防治的强大声势。中西部地区应加快推进市场化改革进程,提高资源配置效率,在放开市场的同时,不可放松环境监管,不能为了追求经济效益而盲目引进、承接污染型产业和项目,避免成为“污染天堂”。

### (三)研究的不足与展望

本文的不足之处有两点:一是在进行区域分组和产业分组时,直接采用了官方的标准,缺乏较为严密的科学推导和论证,而不够严谨的分组可能会带来潜在的测量误差,并对研究结果造成影响;二是在为各省市量身定制碳减排策略时,产业结构调整中的第一、二、三产业涵盖过于宽泛,事实上,就第二产业而言,其各个子行业在碳排放绩效方面亦存在巨大差异。

未来的研究可以考虑从两个方面做进一步的拓展。一方面,要探寻适当的方法,依据一定的标准对区域分组和产业分组给出严密的科学推导和论证,而不是直接采用官方的划分方法。此外,要对各种分组得出的结果进行对比分析,对研究的稳健性、适用性进行探讨。另一方面,要进一步细分三次产业,为各省市量身定制更加精准的碳减排策略,提高研究结论的实践指导价值。

### [参考文献]

- [1] 张华.“绿色悖论”之谜:地方政府竞争视角的解读[J].财经研究,2014,40(12):114-127.
- [2] Friedlingstein P, Andrew R M, Rogelj J, et al. Persistent growth of CO<sub>2</sub> emissions and implications for reaching climate targets[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(10):709-715.
- [3] Mielnik O, Goldemberg O. Communication the evolution of the “carbonization index” in developing countries[J]. Energy Policy, 1999(27):307-308.
- [4] Wang C, Chen J, Zou J. Decomposition of energy-related CO<sub>2</sub> emission in China: 1957-2000 [J]. Energy, 2005, 30 (1):73-83.
- [5] Aldy J. Divergence in state-level per capita carbon dioxide emissions[J]. Land Economics, 2007, 83(3):353-369.
- [6] Aldy J. Per capita carbon dioxide emissions: convergence or divergence?[J]. Environmental and Resource Economics, 2006 (33):533-555.
- [7] Jobert T, Karanfil F, Tykhonenko A. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in the EU: Legend or reality?[J]. Energy Economics, 2010(32):1364-1373.
- [8] Fan Y, Liu L, Wu G, et al. Changes in carbon intensity in China: empirical findings from 1980-2003 [J]. Ecological Economics, 2007(62):683-691.
- [9] Canadell J G, Le Quéré C, Raupach M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(47):18866-18870.

- [10] Zhou P ,Ang B ,Han J.Total factor carbon emission performance a Malmquist index analysis [J].Energy Economics 2010 (32) :194-201.
- [11] 王群伟 ,周德群 ,周 鹏.我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J].中国工业经济 2010(1) :45-54.
- [12] 王群伟 ,周德群 ,周 鹏. 区域二氧化碳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.
- [13] 刘明磊 ,朱 雷 ,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(3) :106-114.
- [14] 王群伟 ,周 鹏 ,周德群.生产技术异质性、二氧化碳排放与绩效损失——基于共同前沿的国际比较[J].科研管理 , 2014 35(10) :41-48.
- [15] Wang Q W ,Zhang H ,Zhang W.A Malmquist CO<sub>2</sub> emission performance index based on a metafrontier approach[J].Mathematical and Computer Modelling 2013 58(5) :1068-1073.
- [16] Zhang N ,Choi Y.Total-factor carbon emission performance of fossil fuel power plants in China :A metafrontier non-radial Malmquist index analysis[J].Energy Economics 2013(40) :549-559.
- [17] Du K ,Huang L ,Yu K.Sources of the potential CO<sub>2</sub> emission reduction in China a nonparametric metafrontier approach[J].Applied Energy 2014(115) :491-501.
- [18] Yao X ,Zhou H ,Zhang A et al.Regional energy efficiency ,carbon emission performance and technology gaps in China a meta-frontier non-radial directional distance function analysis[J].Energy Policy 2015(84) :142-154.
- [19] 林伯强 ,蒋竺均.中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J].管理世界 2009(4) :27-36.
- [20] Zhang M ,Mu H ,Ning Y et al.Decomposition of energy-related CO<sub>2</sub> emission over 1991-2006 in China [J].Ecological Economics 2009 68(7) :2122-2128.
- [21] 徐国泉 ,刘则渊 ,姜照华.中国碳排放的因素分解模型及实证分析 :1995-2004[J].中国人口·资源与环境 2006 16(6) :158-161.
- [22] 宋德勇 ,卢忠宝.中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J].中国人口·资源与环境 2009 19(3) :18-24.
- [23] 张 华.环境规制提升了碳排放绩效吗?——空间溢出视角下的解答[J].经济管理 2014 36(12) :166-175.
- [24] Hayami Y.Sources of agricultural productivity gap among selected countries [J].American Journal of Agricultural Economics 1969 51(3) :564-575.
- [25] O'Donnell C ,Griffiths W.Estimating state contingent production frontiers [J].American Journal of Agricultural Economics , 2006 88(1) :249-266.
- [26] Chiu C , Liou J , Wu P et al. Decomposition of the environmental inefficiency of the meta-frontier with undesirable output [J].Energy Economics 2012 34(5) :1392-1399.
- [27] 雷西洋 ,王金年 ,李勇军 ,等.基于集中式模型的我国各地区及三大产业的DEA效率评价[J].系统工程理论与实践 , 2014 34(12) :3167-3174.
- [28] 汪晓芳.中国三大产业效率评价——基于平行结构 DEA模型的分析[J].当代经济 2011(10) :117-119.
- [29] Quéré C L ,Andres R J ,Boden T et al.The global carbon budget 1959-2011 [J].Earth System Science Data 2013 5(1) :165-185.
- [30] Quéré C L ,Peters G P ,Andres R J et al.Global carbon budget 2013 [J].Earth System Science Data Discuss 2013 6(2) :689-760.
- [31] Hu J L ,Wang S C.Total-factor energy efficiency of regions in China[J].Energy Policy 2006(34) :3206-3217.
- [32] Wang Z ,Feng C ,Zhang B.An empirical analysis of China's energy efficiency from both static and dynamic perspectives[J].Energy 2014(74) :322-330.
- [33] 江飞涛 ,武 鹏 ,李晓萍.中国工业经济增长动力机制转换[J].中国工业经济 2014(5) :5-17.
- [34] 黄群慧.中国的工业大国国情与工业强国战略[J].中国工业经济 2012(3) :5-15.
- [35] 黄群慧.“新常态”、工业化后期与工业增长新动力[J].中国工业经济 2014(10) :5-19.
- [36] Gerschenkron A.Economic backwardness in historical perspective[M].Cambridge :The Belknap Press of Harvard University Press ,1962.
- [37] 徐永德.新常态下转变经济发展方式的制度因素和路径研究[J].求索 2015(5) :108-113.
- [38] 樊 纲 ,王小鲁 ,马光荣.中国市场化进程对经济增长的贡献[J].经济研究 2011(9) :4-16.

[责任编辑：高 巍]