

# 公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径

周迪<sup>1</sup>, 郑楚鹏<sup>2</sup>, 华诗润<sup>2</sup>, 黄宇森<sup>2</sup>

(1. 广东外语外贸大学粤港澳大湾区研究院, 广州 510006; 2. 广东外语外贸大学经贸学院, 广州 510006)

**摘要:** 在碳排放公平原则和效率原则协调的基础上计算区域碳减排潜力并设计碳减排路径, 对于我国更科学地测算区域碳减排潜力以及更合理地制定区域碳减排路径, 从而更好地促进绿色低碳经济发展具有重要意义。选取了1997-2015年29个省级地区数据, 通过Super-SBM模型测算了碳排放效率, 并以人均碳排放量衡量区域碳排放公平; 基于Markov链框架测算了碳排放公平和效率的俱乐部趋同指数, 以分析公平和效率原则在考察我国碳减排潜力中的重要性以及在制定碳减排政策时的侧重点, 进而在碳排放公平与效率协调的视角下重新测算出各省份的碳减排潜力; 在碳排放公平和效率二维矩阵图基础上, 基于二者协调的视角设计了碳减排路径。研究发现: (1) 我国碳排放公平与碳排放效率的俱乐部趋同程度(固化程度)具有显著差异, 碳排放的“长期低效率”比“长期不公平”固化问题更严重。(2) 相比于公平与效率相等原则, 基于协调原则下的各地区碳减排潜力指数存在变化, 这将影响我国碳减排目标地区的划分, 进而影响国家碳权分配以及减排责任的分摊。(3) 基于各省碳减排的公平性与效率性差异, 中国大陆29个省级行政区域可划分为四大类型地区。我国公平效率协调的减排路径是: 重点支持“低效低排”型地区, 提高其碳排放效率, 实施碳排放公平和效率动态协调的碳减排策略。

**关键词:** 碳减排潜力; 碳减排路径; Super-SBM模型; Markov链模型; 俱乐部趋同指数

“十二五”规划以来, 我国的GDP增长了约50%, 但伴随着经济的高速增长, CO<sub>2</sub>排放过多的问题也日益凸显。为了实现可持续发展目标, 维护人民的基本利益, 我国政府宣布了碳排放强度的减排目标, 决定到2030年单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放比2005年下降60%~65%。因此, 在现有约束条件下, 更加精确的碳减排潜力测度与更加和谐的碳减排路径规划有助于制定更加科学、合理的区域减排政策, 且能够为“建立健全绿色低碳循环发展的经济体系”提供智力支持, 从而实现“绿水青山就是金山银山”的美好愿景。

回顾国内外相关文献, 关于碳减排的研究主要集中于三个原则: (1) 碳排放公平原则。通过分析各个区域的碳排放情况, 发现不同区域的碳排放差异, 从而提出碳减排的途径。对此, 不同学者的测算方式有所区别, 主要有三个视角, 分别是人口规模<sup>[1]</sup>、区域经济差距<sup>[2-3]</sup>和消费水平<sup>[4]</sup>。其中, 国内学者常以省份为研究单位, 对我国各个省域进行了研究与分析。邓吉祥等通过统计各省份数据, 并利用LMDI分解原理, 将我国分解为8个区域, 从而更加有效地抽象出省域碳排放的个体特征, 为国家制定碳减排策略作参考<sup>[5]</sup>。郝珍珍等<sup>[6]</sup>通过寻找碳排放增长的驱动因素及各个因素的贡献度进行分析, 提出新的减排途径。(2) 碳排放效率原则。朱勤等从分行业的碳排放效率角度出发, 提出国家应该优化

收稿日期: 2018-06-25; 修订日期: 2018-09-27

基金项目: 全国统计科学研究一般项目(2017LY55); 广东省自然科学基金博士启动项目(2018A030310044); 广东省软科学项目重点项目(2015A070703019); 广东省软科学项目(2016A070705058)

作者简介: 周迪(1988-), 男, 湖北鄂州人, 博士, 讲师, 研究方向为区域经济、区域资源配置。

E-mail: zhoudi19880101@163.com

消费结构,进而影响产业结构以达到碳减排的目的<sup>[6]</sup>。大量学者<sup>[7-9]</sup>注重于碳排放效率与碳减排的关系。采用考虑松弛变量的SBM模型,对我国各个省域的碳排放效率进行计算,提出应该以提高碳排放效率为主的碳减排路径,即效率高的省份碳排放应该增加,效率低的省份配额应该减少<sup>[8]</sup>。也有学者基于三阶段DEA模型和超效率DEA模型对中国碳排放效率的区域差异性展开研究<sup>[10]</sup>。其中Yan等<sup>[11]</sup>,傅京燕等<sup>[12]</sup>基于碳排放效率,对省域碳排放的配额分配进行了进一步的研究,为政策的制定提供建议。(3)碳排放公平与效率双重原则。宋杰鲲等先对各省份的碳排放公平进行研究,并在碳排放公平的基础上,采用NDV-DEA模型,对碳排放效率进行研究,提出新的碳减排方案<sup>[13]</sup>。WEI等在同时考虑公平和效率原则基础上构建了碳减排潜力指数(ACI),以反映各地区的碳减排潜力<sup>[14]</sup>。该指数提出后得到较多学者的借鉴,如吴贤荣等<sup>[15]</sup>基于该指数测算了我国29个省份的农业碳减排潜力大小,认为当局对公平与效率的偏向程度将决定不同省份最终的减排潜力。冯东等基于公平和效率原则相等的减排潜力指数,对京津冀各城市的减排潜力进行了定量测算和类型划分,提出各城市应根据碳减排潜力结果,明确未来减排重点,严格控制CO<sub>2</sub>排放量,实现生态文明建设与经济发展的协调发展<sup>[16]</sup>。

上述研究丰富了碳减排潜力和碳减排路径的研究思路,为本研究奠定了坚实的基础,但仍存在一些不足之处:(1)一些学者仅从公平或效率单一视角进行研究,不能较为全面地考虑两个原则在考察碳减排潜力时发挥的作用;(2)部分学者虽然同时关注两个原则,但是忽视了公平原则和效率原则在考察碳减排潜力上的重要性差异,使碳减排潜力的测量缺乏科学性与严谨性,导致碳减排路径对政策引导的有效性有所降低;(3)目前碳减排潜力研究大多基于静态视角,在构建二维矩阵过程中,简单地将各省份划分为四类,并没有进一步给出有效的碳减排实施路径。基于此,本文首先通过测算碳排放公平与碳排放效率的俱乐部趋同指数,比较碳排放公平与碳排放效率的协调性及二者的重要性大小。进而基于碳排放公平与效率协调的视角测算碳减排潜力并设计碳减排实施路径,为政府制定省际碳权分配和减排责任分摊提供依据,为政府制定碳减排政策提供决策参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究思路

本文从动态视角下的区域差异固化角度考察我国碳排放公平和效率的协调性,分析随着时间的变化区域碳排放公平与效率“高者恒高、低者恒低”程度的差异,若存在显著性差异,表明我国碳排放公平与效率不协调。具体地,若前者更大,表明区域碳排放公平问题更严重,即部分地区存在着严重的“长期不公平”。因此,碳排放公平问题更应该得到政府的重视,同时公平原则有更大的减排潜力挖掘,即其在碳减排潜力计算中的重要性也应该越大;反之则表明区域碳排放效率问题更严重,部分地区存在着严重的“长期低效率”。政府应该更重视碳排放效率,以维持二者的协调,此时效率原则在碳减排潜力计算中的重要性则越大。

在这一思路下,本文在WEI等<sup>[14]</sup>减排潜力指数基础上进行了扩展,基于公平原则和效率原则协调的视角计算碳减排潜力,协调视角下的碳减排潜力指数计算公式为:

$$AAC_i = CCL_e \times E_i + CCL_f \times F_i \quad (1)$$

式中： $AAC_i$ 为*i*地区碳减排潜力指数； $CCL_e$ 和 $CCL_f$ 分别表示碳排放效率和公平在碳减排潜力指数计算中的权重，权重用固化程度来度量，具体为论文构造的俱乐部趋同指数； $E_i$ 和 $F_i$ 分别表示*i*省份的碳排放效率和公平的标准化值。

在此基础上，本文基于碳排放公平与效率的二维矩阵图（图1），设计出一种既能考虑区域碳排放公平和效率的调节主次，又能兼顾二者协调的碳减排实施路径，实现碳减排约束下碳排放公平和效率的动态协调。

路径一：若区域碳排放效率的固化程度比碳排放公平更严重。碳减排路径如下：应重点扶持碳排放效率较低、但公平度也较低（A区域）的地区，通过提高其碳排放效率来实现碳减排，实现A→B的碳减排路径。这种减排路径的意义主要体现在：第一、能够有效缓解碳排放效率的固化问题，促进我国区域碳排放公平和效率的协调；第二、政府对这些地区采取“精准支持”，可以起到良好的示范和激励效应，激励那些碳排放效率同样较低、但碳排放水平较高（D区域）的地区，使其在当前较低的碳排放效率下，调整经济结构，减少高耗能产业，减少碳排放量，进入A区域，最终也得到政府的“重点支持”而进入B区域，实现D→A→B的碳减排路径，从而实现公平和效率的动态协调。

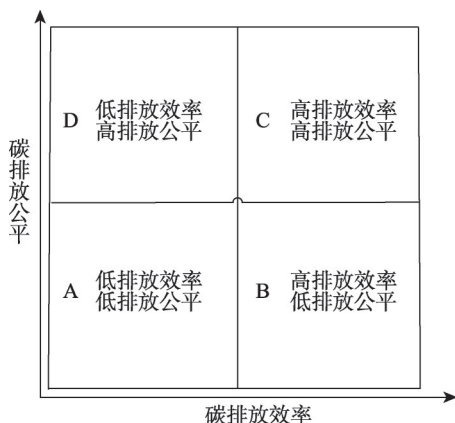


图1 碳减排“公平—效率”矩阵图

Fig. 1 "Fair-efficiency" matrix for carbon emission reduction

路径二：若区域碳排放公平的固化程度比碳排放效率更严重。碳减排路径如下：应重点扶持碳排放公平度较低、但碳排放效率较高（B区域）的地区，在碳减排配额分配方案中应适当“减少”B地区的碳减排配额，同时“增加”那些碳排放水平较高但效率较低的地区（D地区）的减排配额，以实现碳减排目标。这种做法的意义和路径一类似，不再赘述。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 碳排放效率测算：包含非期望产出的 Super-SBM模型

DEA模型被广泛应用于效率的计算，但传统的DEA模型都是径向和角度的，无法将投入产出的松弛性纳入模型的考虑范围。而Tone在2001年提出了非径向非角度的DEA模型<sup>[17]</sup>，即SBM模型。SBM模型将投入、产出与污染放入目标函数中，从而将非期望产出纳入到模型的考虑范围内，更好地考虑了三者之间的关系，从而可以直接测量松弛所带来的与最佳生产前沿相比较的无效率。但在实际应用中，该模型会出现多个效率值为1的决策单元（DMU），为进一步对它们进行比较，Tone<sup>[18]</sup>对SBM模型进行扩展，构造了Super-SBM模型。另外，在实际生产中，除了正常产出外，往往会有非期望产出存在，而且这种产出往往与期望产出互相联系，难以在考虑非期望产出的情况下计算效率。为此，Tone<sup>[19]</sup>在原有基础上，将非期望产出纳入了模型的考虑范围内，更好地考虑了投入、产出与非期望产出三者之间的关系，提出了包含非期望产出的Super-SBM模型，为此，本文采用该模型来测算我国各省份的碳排放效率。

### 1.2.2 碳排放公平与效率的协调性分析与固化程度测算：Markov链模型及俱乐部趋同指数构造

(1) Markov链模型。参考周迪等<sup>[20]</sup>利用马氏阵研究农业现代化水平分布动态时的离散化思路和方法，将碳排放公平（效率）离散化成4类，即低、中低，中高和高水平。并计算碳减排公平（效率）在不同类型之间的转移概率。在传统的分布动态模型中，Markov链方法通常只考察一步时间长度（简称时长）为1 a的情况<sup>[21-22]</sup>，无法知道地区在较长时间积累下的状态转移特征。本文较传统模型有所扩展，即构建了多年时长的转移概率矩阵，以考察随着时间积累，区域碳排放公平（效率）的转移变化情况，挖掘出更多的固化信息。具体地，本文多年时长转移概率矩阵的构造方法如下：

$d$ 年时长的Markov转移概率矩阵的概率值为： $P_{ij}^{t,t+d} = \{X_{t+d} = j | X_t = i\}$ 。其表示在第 $t$ 年，水平处于 $i$ 类型的省份在 $d$ 年后属于为 $j$ 类型的概率，该概率的估计过程如下：

$$P_{ij}^d = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_n-d} n_{ij}^{t,t+d}}{\sum_{t=t_0}^{t_n-d} n_i^t} \quad (2)$$

式中： $t_n$ 为考察的最后一个时期； $n_{ij}^{t,t+d}$ 表示在整个研究期间，由所有在 $t$ 年属于 $i$ 类型而在 $t+d$ 年转移为 $j$ 类型的地区数之和； $n_i^t$ 表示第 $t$ 年碳排放公平（效率）属于 $i$ 类型的地区总数。分别对不同类型的转移概率进行估计，进而得到如式（3）所示的 $d$ 年时长Markov转移概率矩阵：

$$\begin{bmatrix} \frac{n_{11}^d}{n_{1\cdot}^d} & \cdots & \frac{n_{1j}^d}{n_{1\cdot}^d} & \cdots & \frac{n_{1k}^d}{n_{1\cdot}^d} \\ \frac{n_{21}^d}{n_{2\cdot}^d} & \cdots & \frac{n_{2j}^d}{n_{2\cdot}^d} & \cdots & \frac{n_{2k}^d}{n_{2\cdot}^d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{n_{k1}^d}{n_{k\cdot}^d} & \cdots & \frac{n_{kj}^d}{n_{k\cdot}^d} & \cdots & \frac{n_{kk}^d}{n_{k\cdot}^d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}^d & \cdots & p_{1j}^d & \cdots & p_{1k}^d \\ p_{21}^d & \cdots & p_{2j}^d & \cdots & p_{2k}^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{k1}^d & \cdots & p_{k2}^d & \cdots & p_{kk}^d \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $i$ 类水平地区的规模为 $n_{i\cdot}^d$ ，即式（2）中 $\sum_{t=t_0}^{t_n-d} n_i^t$ ； $p_{ii}^d$ 表示 $i$ 类型地区在 $d$ 年后仍为 $i$ 类型的转移概率，值越大表示碳排放公平（效率）的区域差异固化程度越高，也表明存在着俱乐部趋同现象。为了对不同指标的固化程度进行比较，本文对上述计算得到的两类转移概率矩阵进行了卡方统计检验<sup>[23]</sup>。

(2) 考虑规模效应的俱乐部趋同指数。为了准确地测算碳排放公平和效率的固化程度，论文在式（3）的基础上进一步构造了俱乐部趋同指数，该指数既考虑了不同类型地区（俱乐部）的规模，也考虑了各俱乐部内部的趋同程度，得到整体的俱乐部趋同程度。具体地，考察期内考虑规模效应的 $d$ 年时长的俱乐部趋同指数计算公式如下：

$$CCL^d = p_{11}^d \times \frac{n_{1\cdot}^d}{\sum n_{i\cdot}^d} + p_{22}^d \times \frac{n_{2\cdot}^d}{\sum n_{i\cdot}^d} + \cdots + p_{kk}^d \times \frac{n_{k\cdot}^d}{\sum n_{i\cdot}^d} \quad (4)$$

式中： $p_{kk}^d$ 为式（3）中的对角线元素，表示 $k$ 类俱乐部在时长为 $d$ 年的趋同程度； $\frac{n_{k\cdot}^d}{\sum n_{i\cdot}^d}$

表示第 $k$ 类俱乐部的规模占比。

### 1.3 数据来源

基于数据的可获得性和实证分析的需要，本文选取了中国大陆29个省（市、区）作



为研究对象,其中西藏因缺乏能源数据以及海南因缺乏1952年的GDP数据而不包含在内。另因重庆1997年才成为直辖市,所以收集了1997-2015年的历年数据进行分析。根据上文研究方法中的描述,以投入要素、期望产出及非期望产出指标计算碳排放效率,以人均碳排放量衡量碳排放公平,下面分别对数据处理情况及数据来源进行说明。

(1) 各省份资本投入数据。本文以各省份资本存量来衡量资本投入,由于中国官方发布的统计数据中没有相关资本存量的直接数据,因此参考单豪杰<sup>[24]</sup>的研究,得到以1952年为基期的各省份资本存量数据,缺失数据采用永续盘存法进行估算,得到各省份以1952年为基期的1997-2015年资本存量。在永续盘存过程中,为了消除价格因素的影响,各省份固定资本形成总额数据采用固定资产投资价格指数进行调整,调整为以1952年为基期的可比价,相关数据都来源于国泰安金融数据库。

(2) 各省份劳动力投入数据。采用各省份的年末从业人员总数来衡量各地区1997-2015年的劳动力投入量,数据来源于历年《中国统计年鉴》。

(3) 各省份能源投入数据。以各省份能源消费总量(折算成统一的万吨标准煤)作为能源投入数据,数据来源于各年份的《中国能源统计年鉴》。

(4) 各省份GDP数据。以各省份GDP作为碳排放效率的期望产出指标,为了和以1952年价格计算的资本存量数据保持一致,这里也将1997-2015年各省名义GDP调整为以1952年为基期的实际GDP,各省份的GDP及GDP指数来源于国泰安数据库。

(5) 各省份碳排放数据。以各省份碳排放总量作为非期望产出水平,结合我国现状,计算时主要考虑了化石燃料燃烧以及水泥消费两个方面。由于目前国内尚无官方或权威的各省份碳排放数据,采用杜立民<sup>[25]</sup>碳排放总量的测算方式,根据化石燃料燃烧以及水泥的消耗量以及对应的碳排放系数折算得到各省份碳排放总量,具体计算公式为: $C = \sum C_i = \sum e_i \cdot \varepsilon_i$ 。其中 $e_i$ 为各类资源消耗量, $\varepsilon_i$ 为对应的CO<sub>2</sub>排放因子。其中煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、水泥的CO<sub>2</sub>排放系数分别为1.647、2.848、3.045、3.174、3.150、3.064、21.670、0.527(t CO<sub>2</sub>/t或t CO<sub>2</sub>/10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)。能源数据来源于各年的《中国能源统计年鉴》,水泥数据来源于国泰安数据库。

(6) 各省份碳排放公平指标。以各省份人均碳排放量来衡量区域碳排放公平情况,人均碳排放量用各省份碳排放总量除以年末总人口数计算得到。其中各省份年末总人口数据来源于各年份的《中国统计年鉴》。

## 2 结果分析

### 2.1 公平与效率协调视角下的区域碳减排潜力

在公平与效率协调视角下进行区域碳减排潜力测算前,有必要对我国碳排放公平和效率的协调性进行考察,以分析其重要性差异。下面从动态视角比较二者的固化程度。

#### 2.1.1 碳排放公平与效率的协调性分析:动态视角

本文基于Super-SBM模型求解碳排放效率,以人均碳排放量衡量区域碳排放公平,为了全面刻画我国区域碳排放公平与碳排放效率的内部动态性,采用可变时长的Markov链模型考察区域碳排放公平与碳排放效率在不同水平类别之间的转移情况,具体地,时长为1年、3年、5年的转移概率结果如表1所示。

表1中,矩阵主对角线上的数值表示各类碳排放公平水平及碳排放效率水平的地区

表1 我国碳排放公平与排放效率的 Markov 转移概率结果

Table 1 The Markov transfer probability result of carbon emission fairness and efficiency in China

时长 (a)	类型	碳排放公平					碳排放效率				
		<i>n</i>	L	ML	MH	H	<i>n</i>	L	ML	MH	H
1	L	117	<b>0.8803</b>	0.1197	0.0000	0.0000	144	<b>0.9514</b>	0.0486	0.0000	0.0000
	ML	135	0.0889	<b>0.8444</b>	0.0667	0.0000	108	0.1111	<b>0.7778</b>	0.1111	0.0000
	MH	101	0.0000	0.0891	<b>0.8119</b>	0.0990	125	0.0000	0.0960	<b>0.8720</b>	<b>0.0320</b>
	H	169	0.0000	0.0000	0.0710	<b>0.9290</b>	145	0.0000	0.0000	0.0207	0.9793
3	L	104	<b>0.7788</b>	0.2019	0.0192	0.0000	126	<b>0.9286</b>	0.0714	0.0000	0.0000
	ML	120	0.1500	<b>0.7167</b>	0.1167	0.0167	98	0.2347	<b>0.5714</b>	0.1939	0.0000
	MH	92	0.0109	0.1739	<b>0.6413</b>	0.1739	113	0.0000	0.1681	<b>0.7345</b>	0.0973
	H	148	0.0000	0.0068	0.1351	<b>0.8581</b>	127	0.0000	0.0000	0.0630	<b>0.9370</b>
5	L	92	<b>0.6957</b>	0.2826	0.0217	0.0000	108	<b>0.9074</b>	0.0926	0.0000	0.0000
	ML	104	0.1827	<b>0.6538</b>	0.1442	0.0192	88	0.2841	<b>0.4432</b>	0.2614	0.0114
	MH	79	0.0253	0.1772	<b>0.5316</b>	0.2658	101	0.0198	0.2178	<b>0.6139</b>	0.1485
	H	131	0.0076	0.0153	0.1908	<b>0.7863</b>	109	0.0000	0.0000	0.0826	<b>0.9174</b>

注：分别以L、ML、MH、H代表低水平、中低水平、中高水平和高水平4个组别，*n*代表样本数。

在时长内没有发生变化（转移）的概率，这一概率刻画了地区碳排放公平及碳排放效率4个水平的固化程度大小。而主对角线之外的数值表示各地区碳排放公平及效率水平类型在时长内发生“向下转移”或“向上转移”的概率。

从总体上看，在碳排放公平水平及碳排放效率水平总体分布情况中，各类型地区的相对位置较为固定，特别是高水平地区和低水平地区，存在着俱乐部趋同的现象。同时，从横向对比会发现，碳排放效率的低水平和高水平固化程度更高。例如，当年人均碳排放量处于低水平和高水平的地区1 a后仍为低水平和高水平的概率分别为0.8803和0.9290，向上和向下转移的可能性分别为11.97%和7.10%，而当年碳排放效率低水平的地区1 a后向上流动的可能性只有4.86%，碳排放效率高水平的地区向下流动可能性只有2.07%。随着时间的积累，虽然固化程度有所下降，但这种格局没有发生变化，依然是高低水平固化程度最高，同时碳排放效率的固化程度更大，且二者固化程度差异有增大的趋势。例如5 a后，碳排放效率高低水平地区维持现状的概率依然较高，分别为90.74%和91.74%，远大于碳排放公平对应的69.57%和78.63%。可见我国区域碳排放效率存在更严重的“高低水平固化”问题。

为了更好地比较碳排放公平和效率的固化程度，需要对碳排放公平和效率的整体固化程度进行计算，计算时应综合不同水平类型地区的固化信息及其区域规模信息，为此，根据式（4）计算了1~5 a时长下碳排放公平和效率的俱乐部趋同指数，发现不管在什么时长下，碳排放公平的固化程度和碳排放效率的俱乐部趋同指数都有一致的差异，后者都要大于前者<sup>①</sup>。这种差异是否具有统计学意义呢？本文对碳排放公平与碳排放效率的转移概率差异进行显著性检验。由于在显著性检验时还需要将两类指标数据合并计算转移概率矩阵，而数据的先后排列对于转移概率矩阵的计算会产生影响，为了结果的稳

① 为节约篇幅，具体计算结果没有给出，需要的读者可以向作者索取。

健, 计算了两种情形下的检验结果<sup>②</sup>。发现1~5 a时长下的检验结果都拒绝原假设, 认为碳排放公平转移概率矩阵和碳排放效率转移概率矩阵存在着显著性差异。另外, 由检验统计值的大小可知, 这种差异随着时间的积累不断增大, 这和表1得到的结果一致。

以上分析表明, 我国碳排放公平和碳排放效率确实存在着显著的不协调, 后者固化程度显著大于前者。这表明后者存在的“高者恒高、低者恒低”的现象的确比前者明显, 即我国碳排放的“长期低效率”固化问题比“长期不公平”固化问题的确更严重。因此政府更应重视区域碳排放效率的差异问题, 更多地从碳排放效率上入手, 挖掘其存在的更大碳减排潜力。因此基于协调的视角, 在结合公平原则和效率原则计算各地区碳减排潜力时, 应给予碳排放效率指标更大的权重, 而不应该认为二者同等重要。

### 2.1.2 公平与效率协调视角下的碳减排潜力评价

由于俱乐部趋同指数能准确地测算碳排放公平和效率的固化程度, 因此本文采用俱乐部趋同指数来衡量公平原则和效率原则在考察碳减排潜力指数时的重要性, 1~5 a时长碳排放公平和效率的俱乐部趋同指数的均值分别为0.7687和0.81672, 以此计算二者的比重, 分别为0.4849和0.5151, 将其作为权重代入式(1)即可计算出各省份碳减排潜力指数。论文给出了1997年和2015年的碳减排潜力指数结果, 具体结果见表2。

由表3可知, 在碳排放公平与效率协调视角下, 大部分省份碳减排潜力指数都有所提高, 可见, 过去认为权重相等时大多数省份碳减排潜力都被低估了。江西(+0.0125)、四川(+0.0134)、贵州(+0.0123)这三个省份1997年的碳减排潜力指数差值相对较大, 而江西(+0.0133)、河南(+0.0125)、广东(+0.0125)、广西(+0.0127)、四川(+0.0132)、甘肃(+0.0120)这六个省份2015年的碳减排潜力指数差值相对较大, 这说明公平效率协调的权重调整对这些省份来说影响更大。权重的调整会影响政府对各省份的碳权分配和减排责任的分摊。

采用公平与效率协调的视角, 碳减排潜力提高(即差值为正)的省份意味着他们的碳减排潜力主要由碳排放效率所驱动, 反之则由碳排放公平驱动。不管哪个年份, 表中的差值绝大部分都为正值, 这也证明了上文的推断, 即我国碳排放的效率固化问题比公平固化问题更严重。

## 2.2 公平与效率协调视角下的区域碳减排路径

### 2.2.1 区域类型划分

为了进一步探讨更有效的碳减排路径, 本文根据碳排放效率和人均碳排放平均水平构建二维矩阵散点图, 并对中国各省份碳减排情况进行区域划分, 如图2所示的二维矩阵散点图, 其中横坐标表示“碳排放效率”, 纵坐标表示“碳排放公平(人均碳排放量)”, 两条虚线分别表示人均碳排放量、碳排放效率的整体中位数水平。从而将中国大陆29个省级行政区域划分为4个区域: “低效低排”型(以下简称A区域); “高效低排”型(以下简称B区域); “高效高排”型(以下简称C区域); “低效高排”型(以下简称D区域)。

由该二维矩阵散点图可知, 我国仍有较多地区囿于低减排效率、低公平的困局中, 区域发展较不均衡。如何改变现状并提出有效的碳减排路径是亟需解决的问题。

<sup>②</sup> 为节约篇幅, 具体检验结果没有给出, 需要的读者可以向作者索取。

表2 碳排放公平与效率协调视角下中国各省份碳减排潜力指数测算

Table 2 Estimation of carbon emission reduction potential in all provinces of China based on the perspective of coordination of fairness and efficiency

地区	1997年			2015年		
	公平效率 协调原则	公平效率 相等原则	两原则 的差值	公平效率 协调原则	公平效率 相等原则	两原则 的差值
北京	0.6519	0.6497	+0.0022	0.1278	0.1241	+0.0037
天津	0.4793	0.4811	-0.0018	0.4323	0.4261	+0.0062
河北	0.5325	0.5265	+0.0060	0.6053	0.5967	+0.0086
山西	0.9552	0.9565	-0.0013	0.8149	0.8105	+0.0044
内蒙古	0.6463	0.6404	+0.0059	0.9805	0.9811	-0.0006
辽宁	0.2242	0.2312	-0.0070	0.1531	0.1579	-0.0048
吉林	0.5591	0.5519	+0.0072	0.5479	0.5376	+0.0103
黑龙江	0.5794	0.5710	+0.0084	0.5342	0.5237	+0.0105
上海	0.3999	0.4117	-0.0118	0.1339	0.1349	-0.0010
江苏	0.4119	0.4052	+0.0067	0.5299	0.5215	+0.0084
浙江	0.3627	0.3574	+0.0053	0.4833	0.4736	+0.0097
安徽	0.4865	0.4749	+0.0116	0.5247	0.5136	+0.0111
福建	0.0717	0.0706	+0.0011	0.3882	0.3804	+0.0078
江西	0.4496	0.4371	+0.0125	0.5404	0.5271	+0.0133
山东	0.4488	0.4409	+0.0079	0.5962	0.5876	+0.0086
河南	0.4786	0.4669	+0.0117	0.5722	0.5597	+0.0125
湖北	0.4873	0.4775	+0.0098	0.4902	0.4794	+0.0108
湖南	0.4554	0.4438	+0.0116	0.4836	0.4717	+0.0119
广东	0.4416	0.4328	+0.0088	0.4894	0.4769	+0.0125
广西	0.3915	0.3800	+0.0115	0.5035	0.4908	+0.0127
重庆	0.4277	0.4175	+0.0102	0.4232	0.4140	+0.0092
四川	0.5082	0.4948	+0.0134	0.5093	0.4961	+0.0132
贵州	0.6080	0.5957	+0.0123	0.6244	0.6127	+0.0117
云南	0.1226	0.1215	+0.0011	0.1939	0.1907	+0.0032
陕西	0.4955	0.4849	+0.0106	0.6367	0.6271	+0.0096
甘肃	0.4947	0.4836	+0.0111	0.5534	0.5414	+0.0120
青海	0.5296	0.5179	+0.0117	0.6016	0.5899	+0.0117
宁夏	0.5622	0.5561	+0.0061	0.9435	0.9434	+0.0001
新疆	0.5753	0.5665	+0.0088	0.7474	0.7400	+0.0074

2.2.2 碳减排路径

在当前碳排放效率下，碳排放权越多，往往意味着经济发展空间越大，对地区经济发展越有利，即碳权减少势必会限制经济发展<sup>[5]</sup>。那么如何更好地分配碳权成为一个焦点问题，亦可理解为如何找到更有效的碳减排路径的问题。

对任何一个地区而言，如何完成区域碳减排任务，可从两个角度去考量——提高碳排放效率和减少碳排放权（公平），这两个角度亦可视为两类资源，从而碳减排的问题转化为这两类资源的分配问题。

通过分析，本文认为实现区域碳减排的任务重心应放在A区域，即重点照顾A区



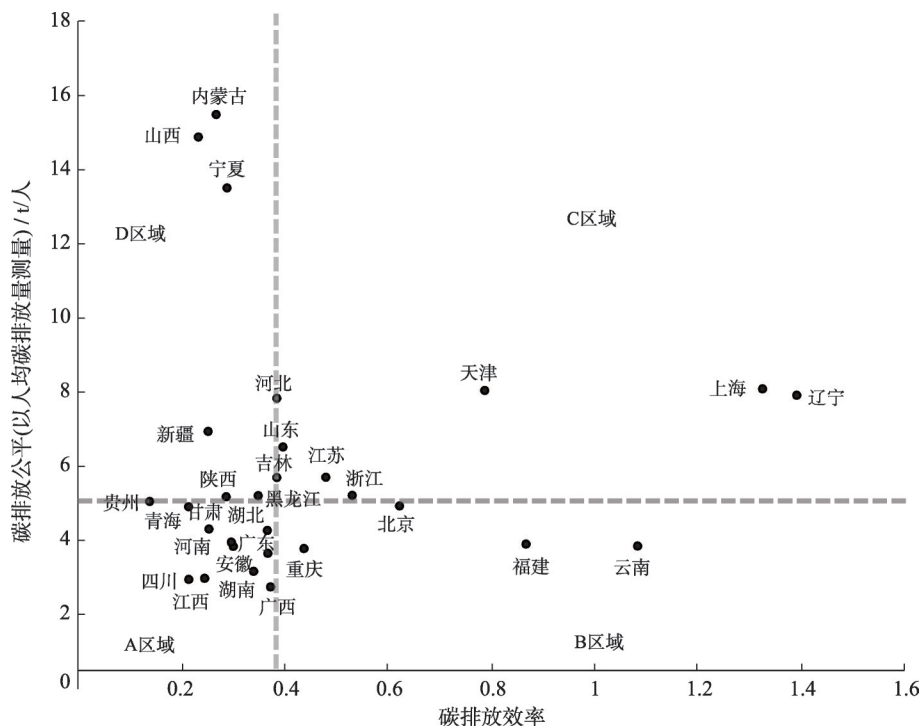


图2 碳减排“公平—效率”矩阵图

Fig. 2 "Fair-efficiency" matrix for carbon emission reduction

域。政府应加大A区域第一类资源（碳排放效率）的分配，如加大环保技术、新能源技术等扶持，达到提高A区域碳排放效率的目的，进而实现碳减排。使得A区域地区进入B区域，即实现A→B的碳减排路径。

做出以上处理基于以下4点考虑：第一，根据前文的研究，对于中国29个省市的整体情况而言，碳排放效率的区域固化现象相较于碳排放公平的更加严重，需要外界的力量加以改善。第二，A区域长期处于低效率欠公平的困境中，将碳减排的任务重心放在A区域，对其重点扶持，可以体现政府对其的补偿。第三，政府的财力物力有限，而A区域的改变难度小于D区域，因此优先扶持A区域所需财力更少，且成效更快。第四，可以形成激励机制，即不主动对D区域做出调整，而是通过A区域的转变来激励D区域在当前的碳排放效率条件下，调整结构，减少高耗能产业，放弃一部分的碳权，降低碳排放总量；当其进入A区域后，也将得到政府在生产技术、环保技术等方面的扶持，实现碳排放效率的提高，最终达到人均碳排放量低碳排放效率高的目的，即实现D→A→B的碳减排路径。

综上所述，中央政府应当优先扶持A区域，将碳减排的重心放在提高A区域省份（如四川、湖南、江西、安徽、河南等）的碳排放效率上，这样既能从侧重于碳排放效率角度进行碳减排，缓解当前区域碳排放效率和公平不协调的问题，又能实现效率与公平的动态协调。此外，对于地方政府而言，由于各区域排放的显著差异决定了减排路径的复杂性，各地方政府可以根据自身情况采取灵活的碳减排路径。如在图2中，“低效高排”的D类区域中既有新疆、陕西这些因生产水平落后导致的“低效中排”省份，也有

内蒙古、山西这些因资源粗放利用导致的“低效高排”省份。对于“低效中排”省份,除了D→A→B这条“激励路径”外,还可考虑D→C→B路径,可能更具可行性。

### 3 结论与讨论

本文采用包含非期望产出的 Super-SBM 模型计算中国大陆 29 个省份 1997-2015 年碳排放效率,并以人均碳排放量衡量区域碳排放公平,通过 Markov 模型测算了碳排放公平和效率的俱乐部趋同指数,以分析公平和效率原则在我国碳减排潜力中的重要性以及在碳减排中的侧重点,进而基于公平效率协调的视角,测算出各省份的减排潜力并设计碳减排路径,为政府制定碳减排举措提供一定的科学依据。具体研究结论如下:

(1) 虽然我国碳排放公平和效率在不同水平类型地区间的流动性都不高,都存在着一定的“高者恒高、低者恒低”固化现象,但在不同时长下,碳排放效率的固化程度更高。可见从动态上看,我国区域碳排放的“长期低效率”问题比“长期不公平”问题更严重。我国碳排放公平和碳排放效率不协调,公平原则和效率原则在碳潜力以及减排路径中体现的重要性并不相同。

(2) 在进行碳减排潜力指数的计算时,应当基于公平与效率协调视角,给予碳排放效率指标更大的权重。结果表明:相比于公平与效率相等原则,基于协调原则下的各地区碳减排潜力指数存在变化,绝大多数省份的碳减排潜力都被低估了,这将在一定程度上影响我国碳减排目标地区的划分,进而影响国家的碳权分配以及减排责任的分摊。

(3) 基于各省碳排放公平与效率的不同特征,可以将中国大陆 29 个省级行政区域划分为 4 大类:“高效高排”型地区、“低效低排”型地区、“高效低排”型地区、“低效高排”型地区。并进一步提出碳减排路径:重点扶持处于“低效低排”区域的省份,且应从提高这些地区的碳排放效率上进行扶持,进而实现碳减排。这一方面能有效解决区域碳排放效率固化程度高的问题,另一方面可以激励处于“低效高排”区域的省份采取措施降低碳排放量,进入“低效低排”区域,从而也得到国家在碳排放效率上的扶持,实现碳排放公平和效率的动态协调。

根据研究结论,本文的最主要启示是:一方面,国家应从碳排放效率上重点扶持“低效低排”的 A 区域,如从能源利用技术、新的生产线技术等方面进行扶持。另一方面,还应该根据各地区各自的碳排放特征差异来引导地方政府实施因地制宜的减排方案,实现社会经济发展与各地区碳减排的双赢。例如对于碳排放水平较高、效率较低的 D 地区而言,应通过实现产业转型来促进该地经济的发展和碳减排,引导地方将该地区经济中心更多地放在低能耗的新型产业上,在保证人均碳排放量降低的同时获得经济效益的增长,完成“D”区域到“A”区域过渡,进而再在国家扶持下,重点放在提高该地区的能源利用效率上,实现渐进式的绿色经济增长。

### 参考文献(References):

- [1] JANSSEN M, ROTMANS J. Allocation of fossil CO<sub>2</sub> emission rights quantifying cultural perspectives. *Ecological Economics*, 1995, 13(1): 65-79.
- [2] STERN N. Key elements of a global deal on climate change. London School of Economics and Political Science, London, UK, 2008.
- [3] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 189-200.  
[DENG J X, LIU X, WANG Z. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference chang

- [9] 李小红, 宋马林. “十二五”时期中国碳排放额度分配评估: 基于效率视角的比较分析. 中国工业经济, 2015, (9): 99-113. [LI X S, SONG M L. Regional allocation of CO<sub>2</sub> emissions allowance during the "Twelfth Five-Year Plan" in China: From the perspective of efficiency comparative analysis. China Industrial Economics, 2015, (9): 99-113.]
- [10] 刘亦文, 胡宗义. 中国碳排放效率区域差异性研究: 基于三阶段DEA模型和超效率DEA模型的分析. 山西财经大学学报, 2015, 37(2): 23-34. [LIU Y W, HU Z Y. Research on regional difference about carbon emission efficiency in China: Based on three stage DEA. Journal of Shanxi University of Finance and Economics, 2015, 37(2): 23-34.]
- [11] YAN D, LEI Y L, LI L, et al. Carbon emission efficiency and spatial clustering analyses in China's thermal power industry: Evidence from the provincial level. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 518-527.
- [12] 傅京燕, 原宗琳, 曾翊. 中国区域生态效率的测度及其影响因素分析. 产经评论, 2016, 7(6): 85-97. [FU J Y, YUAN Z L, ZENG P. Research on regional ecological efficiency in China: Measurement and determinants. Industrial Economic Review, 2016, 7(6): 85-97.]
- [13] 宋杰鲲, 张凯新, 曹子建. 省域碳排放配额分配—融合公平和效率的研究. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 7-13. [SONG J K, ZHANG K X, CAO Z J. Provincial allocation of carbon emission quotas—under the fusion of fairness and efficiency. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 7-13.]
- [14] WEI C, NI J L, DU L M. Regional allocation of carbon dioxide abatement in China. China Economic Review, 2012, 23(3): 552-565.
- [15] 吴贤荣, 张俊彪, 田云, 等. 基于公平与效率双重视角的中国农业碳减排潜力分析. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1172-1182. [WU X R, ZHANG J B, TIAN Y, et al. Analysis on China's agricultural carbon abatement capacity from the perspective of both equity and efficiency. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1172-1182.]
- [16] 冯冬, 李健. 京津冀区域城市二氧化碳排放效率及减排潜力研究. 资源科学, 2017, 39(5): 978-986. [FENG D, LI J. Research of the carbon dioxide emission efficiency and reduction potential of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Resources Science, 2017, 39(5): 978-986.]
- [17] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [18] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32-41.
- [19] TONE K. Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks based Measure (SBM) Approach. GRIPS Research Report Seires, 2003-0005.
- [20] 周迪, 程慧平. 中国农业现代化发展水平时空格局及趋同演变. 华南农业大学学报: 社会科学版, 2015, 14(1): 25-35. [ZHOU D, CHENG H P. Evolvement of convergence and spatial patterns of agricultural modernization in China. Journal of South China Agricultural University: Social Science Edition, 2015, 14(1): 25-35.]
- [21] PAN X F, LIU Q, PENG X X. Spatial club convergence of regional energy efficiency in China. Ecological Indicators, 2015, 51: 25-30.
- [22] 杨明海, 张红霞, 孙亚男. 七大城市群创新能力的区域差距及其分布动态演进. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(3): 21-39. [YANG M H, ZHANG H X, SUN Y N. Regional disparity and distributional dynamic evolution of the innovation ability in seven Chinese megalopolises. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2017, 34(3): 21-39.]
- [23] GALLO J L. Space-time analysis of GDP disparities among European regions: A Markov chain approach. International Regional Science Review, 2001, 27(2): 138-163.
- [24] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952-2006年. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17-31. [SHAN H J. Reestimating the capital stock of China: 1952-2006. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2008, 25(10): 17-31.]
- [25] 杜立民. 我国二氧化碳排放的影响因素: 基于省级面板数据的研究. 南方经济, 2010, (11): 20-33. [DU L M. Impact factors of China's carbon dioxide emissions: Provincial panel data analysis. South China Journal of Economics, 2010, (11): 20-33.]

## The potentialities and paths of China's carbon emission reduction based on the coordination of fairness and efficiency

ZHOU Di<sup>1</sup>, ZHENG Chu-peng<sup>2</sup>, HUA Shi-run<sup>2</sup>, HUANG Yu-sen<sup>2</sup>

(1. Institute of Studies for the Great Bay Area, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510006, China; 2. School of Economics and Trade, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Studying the Chinese provincial carbon emission reduction potential and the path of emission reduction based on the coordinated perspective of fairness and efficiency is most significant to measuring the regional potential of carbon emission reduction and to formulating the regional carbon emission reduction path for China, so as to better promote the development of green low carbon economy. First, we measure the carbon reduction efficiency by the Super-SBM model, and measure the equity of regional carbon emissions by per capita carbon emissions. Then we calculate the carbon club convergence index of efficiency and fairness based on Markov model frame so as to analyze the importance of carbon reduction potential in China and the emphasis in carbon emissions. Then we recalculate the carbon emission potential of each province based on the coordinated principle of fairness and efficiency. Finally, the carbon emission reduction path is designed on the basis of the two dimensional matrix diagram of carbon emission fairness and efficiency based on the coordinated principle. The results show that: (1) The carbon club convergence degree of China's regional carbon emission efficiency is higher, and the curing problem of "long-term low efficiency" of carbon emissions is more serious than the "long-term unfair". (2) China's carbon emission potential is underestimated, which will affect the country's allocation of carbon rights and the sharing of emission reduction responsibility. (3) Based on the coordinated perspective of fairness and efficiency in carbon emissions, the 29 provincial-level administrative districts in the mainland of China fall into four categories. Policymakers should focus on supporting the regions of "low-efficiency & low-emission" type and improve the efficiency of their carbon emissions, so as to achieve carbon emission reduction under the coordinated perspective of fairness and efficiency.

**Keywords:** carbon reduction potential; carbon reduction paths; Super-SBM; Markov chain model; club convergence index