

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.05.008

效率和公平视角下我国30个省(市) 碳减排潜力指数及减排政策分析

李菲菲, 钱魏冬, 许正松

(亳州学院 经济与管理系, 安徽 亳州 236800)

摘要: 构建由碳排放效率指数和公平指数两个变量组成的碳减排潜力指数, 分析2000—2016年我国30个省(市)(不含港、澳、台及西藏地区)的碳减排潜力指数并分析减排政策。将各省(市)的碳排放效率指数和公平指数分别与它们的平均值相比较, 得到高效率高公平(5个省(市))、高效率低公平(8个省(市))、低效率高公平(8个省(市))、低效率低公平(9个省(市))4个区域。碳减排潜力指数居前三的省(市)为北京、内蒙古和宁夏, 海南、广西和四川的碳减排潜力指数最低。内蒙古、河北和安徽的碳排放效率指数最低, 表明这3个地区的碳减排难度最大; 湖南、四川和福建的碳排放效率指数最高。碳排放公平指数最高的地区是内蒙古、上海和天津; 碳排放公平指数最低的地区是广西、四川和江西。

关键词: 碳减排潜力; 碳排放公平指数; 碳排放效率指数; 碳排放影子价格

中图分类号: F062.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)05-0047-09

引文格式: 李菲菲, 钱魏冬, 许正松. 效率和公平视角下我国30个省(市)碳减排潜力指数及减排政策分析[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(5): 47-55.

Analysis of Carbon Emission Reduction Potential Index and Emission Reduction Policy at Provincial and Municipal Levels in China from the Perspective of Efficiency and Fairness

LI Feifei, QIAN Weidong, XU Zhengsong

(Department of Economics and Management, Bozhou College, Bozhou Anhui 236800, China)

Abstract: A proposal has been made to construct a carbon emission reduction potential index, composed of carbon emission efficiency index and equity index, followed by an analysis of the carbon emission reduction potential index of 30 provinces and cities in China (excluding Hong Kong, Macao, Taiwan and Tibet) from 2000 to 2016, as well as an evaluation of emission reduction policies. Based on the comparison between the carbon emission efficiency index and equity index of each province with their average value, a categorization of four regions can be obtained: of high efficiency and high equity (5 provinces or cities), of high efficiency and low equity (8 provinces or cities), of low efficiency and high equity (8 provinces or cities), and of low efficiency and high equity (9 provinces or cities). Beijing, Inner Mongolia and Ningxia Hui Autonomous Region are ranked among the top three provinces in carbon

收稿日期: 2019-11-19

基金项目: 安徽省高校自然科学基金资助重点项目(KJ2018A0817), 安徽省高校人文社科基金资助重点项目(SK2019A1136), 安徽省哲学社会科学规划基金资助重点项目(AHSKZ2018D06)

作者简介: 李菲菲(1986-), 女, 安徽亳州人, 亳州学院教师, 主要研究方向为计量金融, 环境污染,

E-mail: lifeifei860205@126.com

emission reduction potential index, while Hainan, Guangxi and Sichuan are characterized with the lowest carbon emission reduction potential index. Inner Mongolia, Hebei and Anhui have the lowest carbon emission efficiency index, an indication that the three regions have greatest difficulty in reducing carbon emissions. Hunan, Sichuan and Fujian have the highest carbon emission efficiency index. The regions with the highest carbon emission equity index are Inner Mongolia, Shanghai and Tianjin, while those with the lowest carbon emission equity index are Guangxi, Sichuan and Jiangxi.

Keywords: carbon emission reduction potential; carbon equity index; carbon efficiency index; shadow price of carbon emission

0 引言

全球气候变暖所带来的问题日益凸显,而二氧化碳气体排放过多是气候变化的主要原因之一。为应对气候变化,2013年5月,发达国家签署了减少二氧化碳排放的协定《京都议定书》。我国是发展中国家,虽然未包含在强制减排的国家之内,但有研究表明,我国是全球碳排放量最多的十大国家之一^[1]。为了承担起大国应有的减排责任,我国承诺到2030年,碳排放达到峰值,碳排放强度比2005年下降60%~65%。近年来我国经济发展迅速,工业能源结构仍以煤炭为主,部分地区高经济增长是以高碳排放推动的^[2]。为实现总量减排目标,我国积极节能减排,落实省域减排任务。对于各省域的减排目标的制定,若仅考虑公平分配,可能会导致效率低下。若只重视效率分配,则会一定程度上阻碍欠发达地区的经济发展。我国各省(市)的资源禀赋不同,减排的成本和减排支付能力存在差异。因此,研究如何公平有效率地测定和分析各地区的减排潜力,对于推动我国向绿色发展转型,控制并减少碳排放具有重要意义。本文的研究以期能够为当前各省(市)减排责任的分摊和减排任务的制定提供理论参考。

1 文献综述

近年来,对绿色经济发展和生态文明建设的需要使得碳排放问题得到了学者们的广泛关注。R. Fare等^[3]运用影子价格的方法及原理来研究经济生产中的环境污染治理成本。M. Ghorbani等^[4]用方向性距离函数及污染物影子价格来分析不同地区的减排成本之间存在的差异。R. Herrala等^[5]采用随机前沿分析(stochastic frontier analysis, SFA)方法测算了1997—2007年170个国家的二氧化碳排放效率并分析了地区差异。国内学者对减少碳排放途径的研究大致分3个方面:第一类,学者们采用参数或非参数方向性距离函数、B-S定价模型、GARCH-分

形布朗运动模型等测算我国省级工业分行业或某类企业的碳排放影子价格,它表示减少一单位碳排放所需承担的边际成本。陈诗一^[6]采用环境方向性距离函数估算了我国1980—2008年的二氧化碳影子价格,结果显示重工业行业的二氧化碳影子价格低于轻工业行业。周华蓉等^[7]发现我国省级工业二氧化碳影子价格逐年增加,东中西部地区碳排放影子价格存在异质性,碳排放影子价格受工业资本存量的影响而存在门限效应。王倩等^[8]通过测算我国全要素碳排放效率发现,大部分地区存在经济增速小于减排成本增速的困境,解决的方式是使碳生产率增速大于碳影子价格增速。蒋伟杰等^[9]构建我国36个工业行业二氧化碳影子价格模型,得到稳健估计的工业行业二氧化碳影子价格平均为5480元/t,而且不同行业间二氧化碳影子价格差异较大。张宁等^[10]采用不同方法估算了2005—2010年我国558家火电企业的二氧化碳影子价格,表明火电企业可以在碳交易中获得可观收益。第二类,部分学者采用US-SBM模型和三阶段DEA模型及共同前沿方法评估我国各省市二氧化碳排放效率,也有一些学者将碳排放效率与碳排放影子价格结合,进而确定省域碳减排潜力。张兵兵等^[11]分析了我国37个行业的技术进步指数对二氧化碳排放强度的影响,结论为技术进步能够降低二氧化碳排放强度,“污染天堂”假说在行业层面并不成立。郭四代等^[12]得出西部地区农业碳排放效率呈现上升态势,部分省份农业碳排放投入产出效率较好,提高西部碳排放效率可以从提升经济发展水平及增加劳动力投入入手。马大来^[13]发现我国农业碳排放效率存在显著的空间异质性,农村产业结构和人力资本会降低农业碳排放效率。李小胜等^[14]运用改进的共同前沿方法,测算了我国“十二五”时期的碳排放效率,发现绝大多数地区存在非效率,全局效率、跨期效率和同期效率在不发达和西部地区较低的情况。徐建中等^[15]研究了绿色创新效率与能源消费碳排放之间的关系,发

现我国制造业绿色创新效率仍有提升空间, 天然气碳排放和煤炭、原油碳排放对绿色创新效率分别是负向和正向影响。第三类, 学者们将减排成本、“公平”导向、减排规模、碳强度等与碳排放效率相结合, 构建更为全面的碳减排潜力指数或配额分配方式。郭文等^[16]采用基于零和收益的碳减排SBM效率分配模型对30个省份碳排放量的效率进行分配后发现, 碳排放效率已达到效率前沿。这表明政府基于“公平”导向的分配方案会损失效率。刘翔等^[17]采用非期望产出SBM-DEA模型评估我国省域2000—2012年低碳经济发展效率及碳减排潜力后得出, 高效率地区为东部省份, 而减排规模和减排潜力较大的是河北、山西、内蒙古等地。宋杰鲲等^[18]得到我国省域分配方案效率最优条件下的2020年碳排放配额初始分配值, 初步实现了碳排放的效率与公平。于倩雯等^[19]构建碳排放权总量分配模型, 优化分配了2020年我国省际间的碳排放量, 证实了模型的有效性。王文举等^[20]构建了基于公平和效率两方面的我国省级初始碳配额分配方案, 并比较了不同配额分配方案造成的地区减排成本的差异。王茨等^[21]制定了一个资源分配DEA模型, 管理者通过改变9个参数值可以形成各种兼顾效率和公平的分配方案。周迪等^[22]基于Markov链框架运用Super-SBM模型测算了1997—2015年29个省域的碳减排潜力, 并在公平和效率协同视角下分析碳减排路径。

这些文献在一定程度上丰富了碳减排潜力的研究, 为后续研究者提供了思路, 但在减排潜力指数的构造上仍相对简单, 当前文献分析碳减排潜力以效率为主, 与公平结合较少。效率和公平同时纳入考虑范围的研究更少, 且视角往往集中于农业或工业。本文拟在省域全局层面上, 构造由效率和公平两个维度组成的碳减排潜力指数, 研究2000—2016年我国30个省级地区(不考虑港、澳、台及西藏地区)的碳减排潜力并分析减排路径。

2 理论模型

2.1 基于超越对数生产函数的碳排放影子价格估算

1973年, Clavton Christensen等提出超越对数生产函数, 它最大的特点是易估计和包容性。其模型可以被表达为简单线性形式, 所以可以用单方程线性模型来估计, 而且它也可以近似地替代任意形式的生产函数。Y. Altunbas等^[23]证明超越对数生产函数能够很好地处理异质类数据, 且能得到良好的效果。另外, 它还可以研究解释变量对被解释变量的交互影响。超

越对数生产函数的构建形式如下所示^[24]:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \alpha_0 + \alpha_1 \ln K_{it} + \alpha_2 \ln L_{it} + \alpha_3 \ln C_{it} + \\ & \alpha_4 \ln K_{it}^2 + \alpha_5 \ln L_{it}^2 + \alpha_6 \ln C_{it}^2 + \alpha_7 \ln K_{it} \ln L_{it} + \\ & \alpha_8 \ln K_{it} \ln C_{it} + \alpha_9 \ln L_{it} \ln C_{it} + \alpha_{10} \ln E_{it} + \\ & \alpha_{11} \ln E_{it}^2 + \alpha_{12} \ln E_{it} \ln K_{it} + \alpha_{13} \ln E_{it} \ln L_{it} + \\ & \alpha_{14} \ln E_{it} \ln C_{it}。 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Y_{it} 为产出量;

K 为资本存量;

L 为劳动力存量;

C 为二氧化碳排放量;

E 为能源消耗量;

t 为年份;

i 为省份;

α 为待估参数。

由模型估计结果, 可以得到各省份二氧化碳影子价格 P_{it} 为

$$P_{it} = \left[(\alpha_3 + 2\alpha_6 \ln C_{it} + \alpha_8 \ln K_{it} + \alpha_9 \ln L_{it} + \alpha_{14} \ln E_{it}) * Y_{it} \right] / C_{it}。 \quad (2)$$

2.2 碳减排潜力指数

课题组基于效率与公平角度构建碳减排潜力指数。由于碳排放强度表示一单位生产总值所产生的碳排放量, 因此碳排放强度越高表明碳排放效率越低。碳排放影子价格是指减少一单位碳排放所需要付出的减排成本。我国各省域资源环境不同, 所面临的碳减排成本必然存在差异。选取碳排放强度和碳排放影子价格两个指标作为效率指数的构成, 省(市)碳排放总量的高低并不能直接作为减排政策的依据, 还要综合考虑区域人口数, 因此选取人均碳排放量作为碳减排公平指数。人均生产总值反映地区经济平均发展状况, 也代表对减排的人均支付能力, 所以选用人均碳排放量和人均生产总值构建公平指数。碳减排潜力指数用 I_{cerp} 表示, 碳排放效率指数用 I_{ef} 表示, 碳排放公平指数用 I_{eq} 表示。碳排放强度用 I_c 表示, 碳排放影子价格用 P 表示, 人均碳排放量用 E 表示, 人均生产总值用 G 表示, 则

$$I_{\text{cerp}} = \theta \times I_{\text{ef}} + (1-\theta) \times I_{\text{eq}}, \quad (3)$$

$$I_{\text{ef}} = \alpha \times I_c + (1-\alpha) \times P, \quad (4)$$

$$I_{\text{eq}} = \beta \times E + (1-\beta) \times G, \quad (5)$$

式中 θ 、 α 、 β 均为大于0小于1的权数。

考虑碳排放强度、碳排放影子价格、人均碳排放量和人均生产总值4个指标的单位有不同属性, 在进行分析比较前对4个指标数值均作标准化处理, 即

$$x_i^* = \frac{x_i - \min x}{\max x - \min x}。 \quad (6)$$

式中 i 为不同地区。

标准化处理之后,各指标值均在 $[0, 1]$ 范围内。对碳排放强度和碳排放影子价格赋予相同权重时令 $\alpha=0.5$, 得到碳排放效率指数。对人均碳排放量和人均生产总值赋予相同权重时令 $\beta=0.5$, 得到碳排放公平指数。对于碳减排潜力指数, θ 取值不同得到的减排潜力指数会有效率和公平不同侧重点的差异。当 $\theta=0.5$ 时, 碳排放潜力指数中的效率和公平具有相同的权重, 此时测算出的碳减排潜力指数在效率和公平两方面同等重要。当 $1>\theta>0.5$ 时, 测算出的碳减排潜力指数更侧重于偏好效率。当 $0<\theta<0.5$ 时, 测算出的碳减排潜力指数更偏好公平。

3 实证分析

3.1 指标及数据选取

课题组选取 2000—2016 年全国 30 个省(市)(不含港、澳、台及西藏)的数据指标作研究, 数据均来自国家统计局网站或各省(市)各年地方统计年鉴。

1) 人均碳排放量。该数值为 30 个省(市)各年二氧化碳排放总量除以各省(市)当年人口数。其中各省(市)当年人口数来自国家统计局网站。各省(市)二氧化碳排放总量依据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2006 年提供的方法, 根据各种能源燃料的碳含量和二氧化碳排放因子进行粗略计算。计算方法如式(7)所示:

$$D_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^{14} D_{\text{CO}_2, i} = \sum_{i=1}^{14} E_i * V_{\text{nc}} * F_{\text{ce}} \quad (7)$$

式中: D_{CO_2} 为待估算的二氧化碳排放量;

E_i 为各能源的燃烧消费量;

V_{nc} 为各能源平均低位发热量;

F_{ce} 为各能源的二氧化碳排放因子。

30 个省(市) 2000—2016 年的能源消费量 E_i 来源于《中国能源统计年鉴》。 V_{nc} 和 F_{ce} 分别来源于《中国能源统计年鉴 2017》和 IPCC (2006)。具体数值如表 1 所示。

2) 人均生产总值。该数值为 30 个省(市)的地区生产总值以 2000 年为不变价格计算得到实际生产总值, 人均生产总值为 30 个省(市)各年的实际地区生产总值除以各年的地区人口总数。

3) 碳排放强度。该数值为 30 个省(市)各年的二氧化碳排放总量除以各年的实际地区生产总值。

4) 碳排放影子价格。采用超越对数生产函数模型中式(2)估计得到 30 个省(市)各年的二氧化碳影子价格。式(2)中各省(市)资本存量 K 采用单

豪杰的永续盘存法^[25]估算得到。 C 为各省(市)二氧化碳排放量, 由式(7)估算得到。 L 为各省(市)就业人口数, Y 为各省(市)的地区生产总值, E 为各省(市)能源消耗量。 L 、 Y 、 E 数据均来自国家统计局网站。

表 1 14 种能源的平均低位发热量和二氧化碳排放因子
Table 1 Average low calorific value and carbon dioxide emission factors of 14 energy sources

能源名称	$V_{\text{nc}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$F_{\text{ce}}/(\text{kg}\cdot\text{TJ}^{-1})$
煤炭	20 908	95 977
焦炭	28 435	105 996
焦炉煤气	17 981	44 367
高炉煤气	3 855	259 600
转炉煤气	8 585	181 867
其他煤气	18 273.6	44 367
原油	41 816	73 333
汽油	43 070	70 033
煤油	43 070	71 500
柴油	41 816	77 367
燃料油	50 179	63 067
液化石油气	50 179	63 067
天然气	38 931	56 100
液化天然气	44 200	64 167

3.2 实证结果

3.2.1 碳排放影子价格

各省(市) 2000—2016 年平均碳排放影子价格的计算结果如表 2 中所示。碳排放影子价格为减少一单位二氧化碳排放所需付出的减排成本, 该数值代表二氧化碳减排的难易程度。由表 2 可知, 碳排放影子价格最高的省(市)是北京, 为 0.462 亿元/万 t, 碳排放影子价格较高的省(市)是安徽、江苏、河北、内蒙古和山东, 分别为 0.156, 0.132, 0.120, 0.119, 0.111 亿元/万 t。北京的碳排放影子价格高出其它省(市)较多, 表明北京的经济发展水平较高, 减少一单位二氧化碳所带来的国内生产总值的减少量较多, 即减排成本最大, 在 30 个省(市)中减排最为困难。安徽是我国的家电大省, 工业经济快速发展的同时二氧化碳减排成本也在加大。江苏在推动制造业发展的同时, 开展创新驱动的产业转型升级, 其综合竞争力居全国第一, 但减排成本相比其它省(市)高出不多。河北、山东作为传统燃料煤用量大省, 减排成本相对较高。河北、山东的工业能源结构较为单一, 高耗能、高排放的特征使得这些省份的减排成本较高。内蒙古作为经济发展的追赶者, 相对粗放的工业发展模式造成碳排放成本偏高。碳排放影子价格较低的有四川、湖南、广西和宁夏, 分别为 0.051, 0.052, 0.060, 0.063 亿元/万 t。从地理位置上来看, 四川、广西和宁夏位于我国西部, 气候环境较差, 经济发展水平不高,

因此减少一单位碳排放所需付出的经济代价较少, 即 碳减排成本不高。

表2 2000—2016年30个省(市)碳排放效率指数和碳排放公平指数的估算结果

Table 2 Estimation results of carbon emission efficiency index and carbon emission equity index of provinces and cities in China from 2000 to 2016

省(市)	碳排放强度 / ($\text{万 t} \cdot \text{亿元}^{-1}$)	碳排放影子价格 / ($\text{亿元} \cdot \text{万 t}^{-1}$)	碳排放效率指数	人均碳排放量 / ($\text{万 t} \cdot \text{万人}^{-1}$)	人均生产总值 / ($\text{亿元} \cdot \text{万人}^{-1}$)	碳排放公平指数
北京	1.119	0.462	0.500	5.476	6.433	0.580
天津	2.077	0.084	0.513	9.758	6.040	0.691
河北	4.050	0.120	0.255	8.669	2.388	0.310
山西	6.420	0.091	0.271	11.075	2.098	0.366
内蒙古	5.564	0.119	0.215	17.146	3.721	0.729
辽宁	3.238	0.103	0.336	9.349	3.486	0.437
吉林	3.175	0.101	0.345	6.793	2.705	0.275
黑龙江	2.653	0.092	0.413	5.441	2.328	0.192
上海	1.512	0.085	0.624	8.516	6.603	0.701
江苏	1.723	0.132	0.451	6.579	4.535	0.439
浙江	1.519	0.068	0.708	5.674	4.377	0.393
安徽	2.881	0.156	0.266	4.124	1.811	0.098
福建	1.455	0.068	0.723	4.460	3.514	0.270
江西	1.982	0.100	0.471	3.031	1.864	0.065
山东	2.248	0.111	0.404	6.858	3.466	0.348
河南	2.529	0.091	0.427	4.335	2.064	0.129
湖北	2.529	0.077	0.487	4.669	2.464	0.178
湖南	1.902	0.052	0.748	3.308	2.131	0.100
广东	1.236	0.089	0.707	4.031	3.840	0.286
广西	1.959	0.060	0.669	2.914	1.758	0.051
海南	1.423	0.086	0.636	2.711	2.118	0.078
重庆	2.160	0.065	0.602	4.080	2.523	0.163
四川	1.978	0.051	0.747	2.912	1.863	0.061
贵州	5.764	0.086	0.304	5.212	1.290	0.087
云南	2.734	0.090	0.412	4.274	1.473	0.071
陕西	2.450	0.077	0.495	4.719	2.354	0.170
甘肃	3.748	0.070	0.440	4.440	1.416	0.072
青海	3.389	0.083	0.393	5.579	2.085	0.174
宁夏	7.890	0.063	0.394	14.505	2.238	0.498
新疆	4.033	0.065	0.460	8.550	2.204	0.288
平均值	2.911	0.100	0.481	6.306	2.906	0.277

3.2.2 碳排放效率指数和碳排放公平指数的估算

从表2可知, 碳排放强度位居前三名的省(市)是宁夏、山西和内蒙古, 分别为7.890, 6.420, 5.764万t/亿元。原因可能是宁夏、内蒙古属于我国的西部省份, 近几年工业水平呈现粗放式的快速发展, 碳排放总量增多且地区生产总值较少。由于碳排放强度是省(市)的二氧化碳排放量与地区生产总值的比值, 过低的地区生产总值抬高了宁夏和内蒙古的碳排放强度。山西是我国最大的煤炭产地, 年产煤量占全国总量的25%以上, 经济发展的能源消耗以煤炭为主, 导致其碳排放强度位居全国第二名。碳排放强度位列后三名的省份是北京、广东和海南, 分别为1.119, 1.236, 1.423万t/亿元。这3个省市均位于我国的东部, 相同投入要素下, 经济产出水平较高, 较高的地区生产总值拉低了四省市的碳排放强度。

人均碳排放量较高的省份是内蒙古、宁夏和山西, 分别为17.146, 14.505, 11.075万t/万人。人均碳排放量较低的省份是海南、四川和广西, 分别为2.711, 2.912, 2.914万t/万人。内蒙古、宁夏和山西的碳排放总量自2010年增长迅速, 推高了人均碳排放量。近几年这3个省份的经济快速发展, 但能源燃料的使用结构单一, 大量燃煤的使用导致碳排放增长较多。广西和四川的碳排放总量在2015—2016年呈下降态势, 海南省2016年的碳排放总量较之前年份减少, 因此这3个省(市)的人均碳排放量在全国各省中处于低位。

人均生产总值反映的是地区经济发达程度, 表现在碳排放公平指数上, 代表了地区对碳排放污染治理的支付能力。人均生产总值位列全国前三位的是上海、北京和天津, 其数值分别为6.603, 6.433, 6.040

亿元/万人。这3个省市均位于东部地区,生产力水平较高,经济较为发达,对碳排放污染治理的支付能力也较强。人均生产总值居于全国后三位的是贵州、甘肃和云南,分别为1.290, 1.416, 1.473亿元/万人。这3个省市均位于我国的西部地区,经济发展相对落后,对碳排放污染治理的支付能力也较弱。

由于碳排放强度、碳排放影子价格与碳排放效率指数均呈负相关关系,即碳排放强度和碳排放影子价格越高,碳排放效率越低。所以对碳排放强度和碳排放影子价格均取倒数,得到的数值用式(6)进行标准化处理,然后代入式(4)中,并取权数 α 为0.5,估算出表2中的碳排放效率指数。将人均碳排放量和人均生产总值用式(6)经过标准化处理,然后代入式(5)中,并取权数 β 为0.5,估算出表2中的碳排放公平指数。如表2所示,碳排放强度和碳排放影子价格被赋予相同权重时,湖南、四川和福建的碳排放效率指数较高。即在相同投入要素水平下,减少一单位碳排放所需要牺牲的经济代价较小,碳减排成本较低。湖南和福建的碳排放效率低得益于其较低的碳排放强度,说明这两个地区更注重创新发展方式,推行绿色协调发展,因此减排成本较低。四川的碳排放影子价格较低,也促使其碳排放效率指数排在前列。内蒙古、河北和安徽的碳排放效率较低,碳减排难度较大。这3个省市的碳排放影子价格均较高,说明这3个地区在减排方面需严格控制碳排放总量,转变经济发展方式,调整能源消费结构。将人均碳排放量和人均生产总值这两个指数赋予相同权重得到碳排放公平指数,碳排放公平指数较高的地区是内蒙古、上海和天津。上海和天津的人均生产总值较高,表明对碳排放有较高的支付能力。内蒙古碳排放公平指数较高的原因是人均碳排放量较大。碳排放公平指数较低的地区是广西、四川和江西。广西和四川位于我国的西部地区,工业生产能力较低,碳排放总量不高,人均碳排放量明显偏低使得其碳排放公平指数低于平均值。

3.2.3 我国碳减排效率与公平区域分类

将30个省(市)的碳排放效率指数和碳排放公平指数分别与它们的平均值相比较,平均值为表2中的最后一行。碳排放效率指数高则碳排放效率高,碳排放效率指数低则碳排放效率低。碳排放效率指数的平均值为0.481,碳排放公平指数的平均值为0.277。若某一省(市)的碳排放效率指数高于效率指数的平均值,则称这一省(市)为碳排放“高效率”的。反之,则称为“低效率”的。若某一省(市)的碳排放公平指数高于公平指数的平均值,则称这一省(市)

为碳排放“高公平”的。反之,则称为“低公平”的。将30个省(市)分成“高效率高公平”、“高效率低公平”、“低效率高公平”和“低效率低公平”4个区域。分别有5, 8, 8, 9个省(市)位于这些区域内,如图1所示。



图1 我国30个省(市)碳排放效率值与公平值的区域分类图

Fig. 1 Distribution map of regions of carbon emission efficiency value and fair value of provinces and cities in China

图1的右上角为“高效率高公平”区域。位于此区域的地区有:浙江、广东、上海、天津和北京。这些省市较高的碳排放效率指数和较高的碳排放公平指数形成的原因均不相同。天津、浙江和上海的碳排放公平指数高是人均生产总值拉高的,这3个省市均位于东部沿海地区,工业发达,经济发展良好,减排支付能力较强。广东的碳排放效率高的原因可归结为碳排放强度较低,表明广东的碳排放总量较少,碳减排难度较低。北京的碳排放强度较低且人均生产总值较大,从而碳排放效率指数和碳排放公平指数均较高。说明北京的工业发展程度高,经济较为发达,对碳减排的支付能力较强。北京的碳排放影子价格比较高,表明碳排放成本较大,意味着减少一单位二氧化碳排放所需放弃的生产总值较多,具有较强的碳减排潜力,可考虑适当转达移工业,积极履行更多的减排义务。

左上角为“高效率低公平”区域。湖南、四川、福建、广西、海南、重庆、陕西和湖北位于此区域内。四川、广西和湖南碳排放效率指数高的原因是碳排放影子价格偏低,表明这3省碳减排所需的成本少,碳减排的潜力小。在各省市的减排目标的确定中,只能承担较少的减排任务。海南的人均碳排放量低于全国平均水平,原因是该省的碳排放总量低,因此在全国的碳减排中可分配较少的任务。

右下角“低效率高公平”区域的省份有新疆、江苏、山东、辽宁、宁夏、山西、河北和内蒙古。宁夏、内蒙古、山西和辽宁的碳排放强度和人均碳排放量均较高,原因是这4个省的碳排放总量比其它省市高

出很多,在生产总值和人口总数均未显著变化的情况下,碳排放总量的因素致使这4省市具有较高的碳减排潜力。在制定全国省(市)碳减排目标时,这4省应承担更多的减排任务。新疆较高的人均碳排放量归因于其较少的人口总数。

左下角“低效率低公平”的区域有江西、云南、河南、黑龙江、甘肃、吉林、贵州、青海和安徽。贵州和甘肃的碳排放特征分别是碳排放强度高和人均生产总值低,但这两个省的碳排放效率指数低的基本原因是经济发展相对落后,生产总值偏低。安徽的碳排放影子价格高,表明碳减排的经济成本较高,碳减排的难度较大。青海和吉林的碳排放效率指数和公平指数都比平均水平略低。

3.2.4 碳排放潜力指数的估算结果

对式(3)中的权重 θ 分别取1/2, 2/3, 1/3,得到效率与公平相同权重、侧重效率和侧重公平时的碳减排潜力指数,如表3所示。

表3 效率与公平取不同权重时的碳减排潜力指数

Table 3 Carbon emission reduction potential index with different weights of efficiency and fairness

省(市)	效率与公平相同权重 $\theta=1/2$	侧重效率 $\theta=2/3$	侧重公平 $\theta=1/3$
北京	0.540	0.527	0.553
天津	0.401	0.304	0.497
河北	0.305	0.304	0.307
山西	0.403	0.416	0.391
内蒙古	0.570	0.516	0.623
辽宁	0.328	0.292	0.364
吉林	0.243	0.233	0.254
黑龙江	0.178	0.173	0.183
上海	0.386	0.281	0.491
江苏	0.291	0.242	0.341
浙江	0.221	0.164	0.279
安徽	0.178	0.204	0.151
福建	0.158	0.121	0.195
江西	0.094	0.104	0.085
山东	0.252	0.220	0.284
河南	0.141	0.145	0.137
湖北	0.157	0.150	0.164
湖南	0.080	0.073	0.086
广东	0.170	0.131	0.209
广西	0.062	0.065	0.058
海南	0.073	0.071	0.074
重庆	0.128	0.117	0.140
四川	0.062	0.063	0.062
贵州	0.236	0.286	0.186
云南	0.119	0.135	0.103
陕西	0.150	0.143	0.156
甘肃	0.144	0.169	0.120
青海	0.190	0.196	0.185
宁夏	0.506	0.509	0.503
新疆	0.260	0.251	0.270

由表3可知,在效率与公平相同权重时,碳减排

潜力指数位于全国前十的地区分别是:内蒙古、北京、宁夏、山西、天津、上海、辽宁、河北、江苏、新疆。若侧重考虑效率,碳减排潜力指数排名前十的地区分别是:北京、内蒙古、宁夏、山西、天津、河北、辽宁、贵州、上海、新疆。若着眼于公平,碳减排潜力指数排名前十的地区分别为:内蒙古、北京、宁夏、天津、上海、山西、辽宁、江苏、河北、山东。不管是侧重于考虑效率还是侧重于考虑公平,北京、内蒙古和宁夏的碳减排潜力均居于全国前三,而海南、广西和四川是30个省市中碳减排潜力指数较低的3个省市。若侧重于效率,北京的碳减排潜力指数会从第二位跃于第一位,表明北京的碳减排潜力指数很大程度上靠碳排放效率指数拉动。在侧重考虑效率的情形下,北京、河北、黑龙江、安徽、河南、湖北、贵州、云南、甘肃这9个省市的碳减排潜力指数将从2, 8, 17, 16, 23, 20, 13, 25, 22上升到1, 6, 16, 14, 20, 19, 8, 22, 17。说明如果决策者是效率偏好型,则这9个省市将承担更多的减排责任。将公平赋予更大的权重时,天津、上海、江苏、浙江、福建、山东、湖北、湖南、广东、重庆、四川、陕西的碳减排潜力指数的排名比效率与公平相同权重时上升,从5, 6, 9, 14, 19, 11, 20, 27, 18, 24, 30, 21上升到4, 5, 8, 11, 15, 10, 19, 26, 14, 22, 29, 20。如果决策者更看重公平和减排支付能力,减排责任将更多地分配给这12个省市。可见,对效率和公平的不同偏好,将影响决策者制定各省(市)的碳减排任务目标。

4 结论和政策建议

4.1 结论

1) 碳排放影子价格较高的省(市)分别是北京、安徽、江苏、河北、内蒙古和山东。这些省(市)减少一单位碳排放所需付出的经济代价较高,碳减排成本较大,碳减排较为困难。宁夏、山西和内蒙古近几年工业迅速发展,碳排放总量增多导致碳排放强度和人均碳排放量均较高。上海、北京、天津的较高的人均生产总值反映了对碳排放污染治理的较强的支付能力。

2) 内蒙古、河北和安徽的碳排放效率指数较低,表明这3个地区的碳减排难度较大。湖南、四川和福建的碳排放效率指数最高,碳减排成本较低。湖南和福建的碳排放效率低得益于其较低的碳排放强度,四川的碳排放影子价格较低,也促使其碳排放效率指数排在前列。碳排放公平指数较高的地区是内蒙古、上海和天津。碳排放公平指数较低的地区是广西、四川和江西,广西和四川的工业生产能力和碳减排

总量不高。

3) 将 30 个省市按效率和公平的高低分成 4 个区域: 高效率高公平(5 个省(市))、高效率低公平(8 个省(市))、低效率高公平(8 个省(市))、低效率低公平(9 个省(市))。无论是侧重效率还是侧重公平, 碳减排潜力指数居全国前三的省(市)为北京、内蒙古和宁夏, 海南、广西和四川的碳减排潜力指数位列后 3 名。在侧重考虑效率的情形下, 9 个省(市)的碳减排潜力指数上升, 对公平赋予更多权重时, 12 个省(市)的碳减排潜力指数上升。

4.2 政策建议

1) 北京的工业化程度高, 碳排放影子价格高, 碳减排的经济成本大。应积极建立雄安的副首都功能, 转移制造业。对于碳排放的污染治理有较高支付能力的上海和天津, 可以承担更多的减排义务。浙江和广东的碳排放强度低, 碳减排难度小, 应继续注重创新发展方式, 推行绿色协调发展。

2) 四川、广西应在继续保持较低的碳排放成本和碳排放总量的同时, 大力发展经济, 以降低碳排放强度, 提高人均生产总值。内蒙古、河北和安徽的碳排放效率指数较低, 减少一单位碳排放所需要牺牲的经济代价较大。若要降低碳减排难度, 需严格控制碳排放总量, 转变经济发展方式, 调整能源消费结构。海南的碳排放总量和人均碳排放量均较少, 可继续将环保旅游产业作为经济的支柱产业。

3) 山西、内蒙古、宁夏和辽宁应积极推动经济的发展, 严格控制碳排放总量。江苏可以重点开展创新驱动的制造业等产业转型升级。河北和山东应改变高耗能高排放的工业能源结构, 发展清洁新型能源燃料。内蒙古需要改变过分依赖能源工业的发展模式, 促进产业结构合理优化, 降低碳排放成本。新疆可侧重发展信息产业, 促进丝绸之路经济带建设, 构建具有区域特色的产业新体系, 以降低人均碳排放量。

4) 安徽应改变能源结构, 经济发展中减少对燃料煤的使用, 降低碳排放影子价格。贵州、甘肃和云南, 均位于我国的西部地区, 应积极提振经济发展, 提高对碳排放污染治理的支付能力。

环保当局在制定碳减排政策时, 应注意效率和公平的不同倾向会影响各省(市)碳减排目标的确立, 决定各省(市)减排责任的分配。

参考文献:

[1] 中国碳交易网. 全球各国碳排放量排行榜, 中国第一 [EB/OL]. [2019-10-28]. www.tanjiaoyi.com/article-23347-1.html.

China Carbon Trading Network. China Ranks First in the Global Carbon Emission Rankings[EB/OL]. [2019-10-28]. www.tanjiaoyi.com/article-23347-1.html.

[2] 马海超, 雷明, 殷子涵. 我国经济发展与碳排放增长的空间特征: 基于 GDP 重心、第二产业重心和碳排放重心的动态轨迹分析 [J]. 技术经济与管理研究, 2017(9): 112-118.

MA Haichao, LEI Ming, YIN Zihan. Spatial Characteristics of China's Economic Development and Carbon Emission Growth: Based on the Dynamic Shift of GDP Center, Secondary Industry Center and Carbon Emission Center[J]. Technoeconomics & Management Research, 2017(9): 112-118.

[3] FARE R, GROSSKOPF S, LOVELL C A K, et al. Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: a Distance Function Approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1993, 75(2): 374-380.

[4] GHORBANI M, MOTALLEBI M. The Study on Shadow Price of Greenhouse Gases Emission in Iran: Case of Dairy Farms[J]. Research Journal of Environmental Sciences, 2009, 3(4): 466-475.

[5] HERRALA R, GOEL R K. Global CO₂ Efficiency: Country-Wise Estimates Using a Stochastic Cost Frontier[J]. Energy Policy, 2012, 45: 762-770.

[6] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法 [J]. 世界经济, 2010, 33(8): 93-111.

CHEN Shiyi. Shadow Price of Industrial Carbon Dioxide: Parametric and Non Parametric Methods[J]. The Journal of World Economy, 2010, 33(8): 93-111.

[7] 周华蓉, 贺胜兵, 邢书军. 地区工业结构与二氧化碳影子价格异质性 [J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2018, 21(2): 69-77.

ZHOU Huarong, HE Shengbing, XING Shujun. Regional Industrial Structure and Heterogeneity of Carbon Dioxide Shadow Prices[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2018, 21(2): 69-77.

[8] 王倩, 高翠云. 中国省际碳影子价格与碳生产率非线性关联研究 [J]. 资源科学, 2018, 40(10): 2118-2131.

WANG Qian, GAO Cuiyun. Research on the Nonlinear Correlation Between Provincial Carbon Shadow Price and Carbon Productivity[J]. Resources Science, 2018, 40(10): 2118-2131.

[9] 蒋伟杰, 张少华. 中国工业二氧化碳影子价格的稳健估计与减排政策 [J]. 管理世界, 2018(7): 32-49.

JIANG Weijie, ZHANG Shaohua. Robust Estimation of Shadow Price of Industrial Carbon Dioxide in China and Emission Reduction Policies[J]. Management World, 2018(7): 32-49.

[10] 张宁, 刘青君. 碳交易减少了中国火电厂的减排成本吗?: 基于 2005—2010 年面板数据的实证分析 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(1): 7-16.

ZHANG Ning, LIU Qingjun. Does Carbon Trading Reduce the Carbon Emissions Abatement Cost for Chinese Thermal Companies?: Empirical Analysis Based on Panel Data from 2005 to 2010[J]. Journal of Beijing

- Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 21(1): 7-16.
- [11] 张兵兵, 朱晶, 全晓云. 技术进步与二氧化碳排放强度: 理论与实证分析[J]. 科研管理, 2017, 38(12): 41-48.
ZHANG Bingbing, ZHU Jing, QUAN Xiaoyun. A Theoretical and Empirical Analysis of Technical Progress and CO₂ Emission Intensity[J]. Science Research Management, 2017, 38(12): 41-48.
- [12] 郭四代, 钱昱冰, 赵锐. 西部地区农业碳排放效率及收敛性分析: 基于SBM-Undesirable模型[J]. 农村经济, 2018(11): 80-87.
GUO Sidai, QIAN Yubing, ZHAO Rui. Analysis on the Efficiency and Convergence of Agricultural Carbon Emission in Western China: Based on SBM Undesirable Model[J]. Rural Economy, 2018(11): 80-87.
- [13] 马大来. 中国农业能源碳排放效率的空间异质性及其影响因素: 基于空间面板数据模型的实证研究[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(12): 1693-1700, 1765.
MA Dalai. Spatial Heterogeneity and Influencing Factors of Agricultural Energy Carbon Emission Efficiency in China: an Empirical Research of Spatial Panel Data Model[J]. Resource Development & Market, 2018, 34(12): 1693-1700, 1765.
- [14] 李小胜, 胡正陶, 张娜, 等. “十二五”时期中国碳排放全要素生产率及其影响因素研究[J]. 南开经济研究, 2018(5): 76-94.
LI Xiaosheng, HU Zhengtao, ZHANG Na, et al. Total Factor Productivity Index of Carbon Emissions and Its Various Influencing Factors During the 12th Five Year[J]. Nankai Economic Studies, 2018(5): 76-94.
- [15] 徐建中, 王曼曼, 贯君. 动态内生视角下能源消费碳排放与绿色创新效率的机理研究: 基于中国装备制造业的实证分析[J]. 管理评论, 2019, 31(9): 81-93.
XU Jianzhong, WANG Manman, GUAN Jun. Research on Mechanism of Carbon Emission from Energy Consumption and Green Innovation Efficiency in Dynamic Endogenous Perspective Based on Chinese Equipment Manufacturing Industries[J]. Management Review, 2019, 31(9): 81-93.
- [16] 郭文, 刘小峰, 吴孝灵. 中国“十三五”时期省际碳减排目标的效率分配[J]. 中国人口资源与环境, 2017, 27(5): 72-83.
GUO Wen, LIU Xiaofeng, WU Xiaoling. Efficiency Allocation of Provincial Carbon Reduction Target in China's Thirteenth Five Year Plan Period[J]. China Population Resources and Environment, 2017, 27(5): 72-83.
- [17] 刘翔, 陈晓红. 我国低碳经济发展效率的动态变化及碳减排潜力分析[J]. 系统工程, 2017, 35(5): 92-100.
LIU Xiang, CHEN Xiaohong. The Efficiency of Low Carbon Economic and Potential Emission Reduction in China[J]. Systems Engineering, 2017, 35(5): 92-100.
- [18] 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[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 7-13.
SONG Jiekun, ZHANG Kaixin, CAO Zijian. Provincial Allocation of Carbon Emission Quotas - Under the Fusion of Fairness and Efficiency[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 7-13.
- [19] 于倩雯, 吴凤平. 公平与效率耦合视角下省际碳排放权分配的双层规划模型[J]. 软科学, 2018, 32(4): 72-76.
YU Qianwen, WU Fengping. Bi-Level Programming Model of Provincial Carbon Emissions Allocation from the Coupling Perspective of Fairness and Efficiency[J]. Soft Science, 2018, 32(4): 72-76.
- [20] 王文举, 陈真玲. 中国省级区域初始碳配额分配方案研究: 基于责任与目标、公平与效率的视角[J]. 管理世界, 2019(3): 81-98.
WANG Wenju, CHEN Zhenling. Study on the Allocation Plan of Initial Carbon Allowances in China's Province-Level Regions: Based on the Perspective of Responsibility and Goals, Fairness and Efficiency[J]. Management World, 2019(3): 81-98.
- [21] 王莹, 王应明. 基于未来效率的兼顾公平与效率的资源分配DEA模型研究: 以各省碳排放额分配为例[J]. 中国管理科学, 2019, 27(5): 161-173.
WANG Ying, WANG Yingming. Study on Resource Allocation DEA Model Based on the Future Efficiency with Consideration of Efficiency & Equity: An Application in Distribution of Carbon Emission Rights in Each Chinese Province[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(5): 161-173.
- [22] 周迪, 郑楚鹏, 华诗润, 等. 公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 80-91.
ZHOU Di, ZHENG Chupeng, HUA Shirun, et al. The Potentialities and Paths of China's Carbon Emission Reduction Based on the Coordination of Fairness and Efficiency[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 80-91.
- [23] ALTUNBAS Y, CHAKRAVARTY S P. Frontier Cost Functions and Bank Efficiency[J]. Economics Letters, 2001, 72(2): 233-240.
- [24] 张成, 史丹, 李鹏飞. 中国实施省际碳排放权交易的潜在成效[J]. 财贸经济, 2017, 38(2): 93-108.
ZHANG Cheng, SHI Dan, LI Pengfei. Potential Effect Simulation of Carbon Trading in China[J]. Finance & Trade Economics, 2017, 38(2): 93-108.
- [25] 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]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2008, 25(10): 17-31.

(责任编辑: 申剑)