

人均碳排放和效益协调视角下的中国分省 碳减排潜力数据集

周迪¹, 华诗润^{2*}

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济贸易学院, 广州 510006

摘要: 在人均碳排放和效率协调基础上, 计算区域碳减排潜力, 对于更好地促进绿色低碳经济发展具有积极意义。《人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集》是基于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和“国泰安金融数据库”中 1997–2015 年中国 29 个省级地区（海南、西藏、香港、澳门、台湾因数据不全, 没有统计）的数据开发得到。研发的流程包括: 首先, 按照各省的投资隐含平减指数将历年的固定资产形成额统一折算成 1952 年不变价的数值; 然后, 根据所设定的折旧率和基期资本存量, 运用永续盘存法对历年资本存量进行估算, 得到资本存量数据; 将 1997–2015 年各省名义 GDP 除以 1952 年为基期的 GDP 平减指数得到以 1952 年为基期的实际 GDP; 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碳排放总量, 再除以年末总人口数计算得到人均碳排放量; 利用每单位国民生产总值的增长所带来的二氧化碳排放量表征碳排放强度; 通过 Super-SBM 模型测算碳排放效率; 基于 Markov 链框架测算人均碳排放和效率的俱乐部趋同指数, 以分析人均碳排放和效率原则在考察中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, 进而在人均碳排放与效率协调的视角下重新测算出各省份的碳减排潜力, 得到人均碳排放与效率协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集。该数据集包括: (1) 1997–2015 年中国 29 省资本存量; (2) 1997–2015 年中国 29 省以 1952 年为基期的实际 GDP; (3) 1997–2015 年中国 29 省人均碳排放量; (4) 1997–2015 年中国 29 省碳排放强度; (5) 1997–2015 年中国 29 省碳排放效率 (Super-SBM 模型); (6) 1997–2015 年中国 29 省能源消费数据; (7) 中国人均碳排放与效率的 Markov 转移概率结果; (8) 不同时长下人均碳排放和效率的俱乐部趋同指数模型; (9) 人均碳排放与效率的区域固化程度差异性检验; (10) 人均碳排放与效率协调视角下中国分省碳减排潜力指数测算。数据集存储为.xlsx 格式, 由 1 个文件组成, 数据量为 134 KB。基于该数据集的分析研究成果发表在《自然资源学报》2019 年第 34 卷第 1 期。

关键词: 碳减排潜力; 人均碳排放; 碳排放效率; 中国; 自然资源学报

DOI: 10.3974/geodp.2019.04.07

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2019-12-07; 出版日期: 2019-12-24

基金项目: 广东省自然科学基金 (2018A030310044)

*通讯作者: 华诗润 AAF-8627-2019, 广东外语外贸大学经济贸易学院, hsharon09@163.com

数据引用方式: [1] 周迪, 华诗润. 人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集[J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(4): 356–363. DOI: 10.3974/geodp.2019.04.07.

[2] 周迪, 华诗润. 人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.05.15.V1.

1 前言

“十二五”规划以来，我国 GDP 增长了约 50%，但随着经济的高速增长，CO₂ 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，中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 CO₂ 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，本文目的是为“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。目前，关于碳减排的研究主要集中于三个原则：碳排放公平原则^[1–3]、碳排放效率原则^[4–8]、碳排放公平与效率双重原则^[9–11]。一些学者仅从单一视角^[1–8]进行研究，没有全面考虑两个原则发挥的作用；部分学者虽然同时关注两个原则^[9–11]，但忽略了在考察碳减排潜力上的重要性差异。因此，本文基于 1997–2015 年中国 29 个省级地区的数据，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，进而构建碳减排潜力数据集。该数据集能为政府制定省际碳权分配和减排责任分摊提供依据。

2 数据集元数据简介

《人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集》^[12]的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集》元数据简表

条目	描述
数据集名称	人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集
数据集短名	C_EmissionReduction_ProvChina
作者信息	周迪 AAG-1775-2019, 广东外语外贸大学粤港澳大湾区研究院, zhoudi19880101@163.com 华诗润 AAF-8627-2019, 广东外语外贸大学经济贸易学院, hsharon09@163.com
地理区域	中国 29 个省级地区（不包括海南、西藏、香港、澳门和台湾）
数据年代	1997–2015
数据格式	.xlsx
数据量	134 KB
数据集组成	1997–2015 年中国 29 省资本存量数据、以 1952 年为基期的实际 GDP、人均碳排放量数据、碳排放强度数据、碳排放效率（Super-SBM 模型）、能源消费数据；中国人均碳排放与效率的 Markov 转移概率结果；不同时长下人均碳排放和效率的俱乐部趋同指数模型；人均碳排放与效率的区域固化程度差异检验；人均碳排放与效率协调视角下中国各省份碳减排潜力指数测算
基金项目	广东省自然科学基金（2018A030310044）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所

续表

条目	描述
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报》（中英文）发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[13]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS

3 数据研发方法

3.1 数据来源与处理

本数据集是基于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和“国泰安金融数据库”中 1997–2015 年中国 29 个省级地区（海南、西藏、香港、澳门、台湾因数据不全，没有统计）的数据开发得到。研发步骤具体如下：参考单豪杰^[14]的研究，按照各省的投资隐含平减指数将历年的固定资本形成额统一折算成 1952 年不变价的数值，然后根据所设定的折旧率和基期资本存量，运用永续盘存法对历年资本存量进行估算，得到资本存量数据；将 1997–2015 年各省名义 GDP 除以 1952 年为基期的 GDP 平减指数得到以 1952 年为基期的实际 GDP；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，再除以年末总人口数计算得到人均碳排放量数据；运用每单位国民生产总值的增长所带来的二氧化碳排放量表征碳排放强度。通过 Super-SBM 模型测算了碳排放效率；基于 Markov 链框架测算了人均碳排放和效率的俱乐部趋同指数，以分析人均碳排放和效率原则在考察中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，进而在人均碳排放与效率协调的视角下重新测算出各省份的碳减排潜力，得到人均碳排放与效率协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集。

3.2 算法原理

本文在 Wei *et al.*^[11] 减排潜力指数的基础上进行了扩展，基于人均碳排放和效率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：

$$AAC_i = CCL_e \times E_i + CCL_f \times F_i \tag{1}$$

式中， AAC_i 为 i 地区碳减排潜力指数（无量纲）； 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（无量纲），权重用固化程度度量，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（无量纲）。

3.3 研究路线

3.3.1 碳排放效率测算：包含非期望产出的 Super-SBM 模型

参考 Tone^[15]的研究，本文以各省份 1952 年为基期的 1997–2015 年资本存量衡量的资本投入数据、各省份年末从业人员总数衡量的各地区劳动力投入数据、各省份能源消费总量衡量的能源投入数据作为投入要素指标，以各省份 1952 年为基期的 GDP 数据作

为期望产出指标,以各省份碳排放总量作为非期望产出水平,通过 Super-SBM 模型测算了碳排放效率。

3.3.2 碳排放公平与效率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^[16]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,并计算公平(效率)在不同类型之间的转移概率。在传统分布动态模型中,Markov 链方法通常只考察一步时间长度(简称时长)为1a的情况^[17]。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: $P_{ij}^{t,t+d} = \{X_{t+d}=j \mid X_t=i\}$,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。对不同类型的转移概率进行估计,得到式(3)所示的 d 年时长 Markov 转移概率矩阵:

$$\begin{bmatrix} \frac{n_{11}^d}{n_1^d} & L & \frac{n_{1j}^d}{n_1^d} & L & \frac{n_{1k}^d}{n_1^d} \\ \frac{n_{21}^d}{n_2^d} & L & \frac{n_{2j}^d}{n_2^d} & L & \frac{n_{2k}^d}{n_2^d} \\ L & L & L & L & L \\ \frac{n_{k1}^d}{n_k^d} & L & \frac{n_{kj}^d}{n_k^d} & L & \frac{n_{kk}^d}{n_k^d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}^d & L & p_{1j}^d & L & p_{1k}^d \\ p_{21}^d & L & p_{2j}^d & L & p_{2k}^d \\ L & L & L & L & L \\ p_{k1}^d & L & p_{k2}^d & L & p_{kk}^d \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, i 类水平地区的规模为 n_i^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,本文将进行卡方统计检验^[18]。

(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,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)的规模和各俱乐部内部的趋同程度,得到整体的俱乐部趋同程度。计算公式如下:

$$CCL^d = p_{11}^d \times \frac{n_1^d}{\sum n_i^d} + p_{22}^d \times \frac{n_2^d}{\sum n_i^d} + L + p_{kk}^d \times \frac{n_k^d}{\sum n_i^d} \quad (4)$$

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; $n_k^d / \sum n_i^d$ 表示第 k 类俱乐部的规模占比。

4 数据结果

4.1 数据集组成

《人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集》包括：（1）1997–2015 年中国 29 省资本存量；（2）1997–2015 年中国 29 省以 1952 年为基期的实际 GDP；（3）1997–2015 年中国 29 省人均碳排放量；（4）1997–2015 年中国 29 省碳排放强度；（5）1997–2015 年中国 29 省碳排放效率（Super-SBM 模型）；（6）1997–2015 年中国 29 省的能源消费；（7）中国人均碳排放与效率的 Markov 转移概率结果；（8）不同时长下人均碳排放和效率的俱乐部趋同指数模型；（9）人均碳排放与效率的区域固化程度差异检验；（10）人均碳排放与效率协调视角下中国各省份碳减排潜力指数测算。

4.2 数据结果

4.2.1 碳排放公平和效率的协调性分析：动态视角

本文采用可变时长的 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，时长为 1、3、5 年的转移概率结果如表 2 所示。

表 2 我国碳排放公平与排放效率的 Markov 转移概率结果

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	0.880,3	0.119,7	0.000,0	0.000,0	144	0.951,4	0.048,6	0.000,0	0.000,0
	ML	135	0.088,9	0.844,4	0.066,7	0.000,0	108	0.111,1	0.777,8	0.111,1	0.000,0
	MH	101	0.000,0	0.089,1	0.811,9	0.099,0	125	0.000,0	0.096,0	0.872,0	0.032,0
	H	169	0.000,0	0.000,0	0.071,0	0.929,0	145	0.000,0	0.000,0	0.020,7	0.979,3
3	L	104	0.778,8	0.201,9	0.019,2	0.000,0	126	0.928,6	0.071,4	0.000,0	0.000,0
	ML	120	0.150,0	0.716,7	0.116,7	0.016,7	98	0.234,7	0.571,4	0.193,9	0.000,0
	MH	92	0.010,9	0.173,9	0.641,3	0.173,9	113	0.000,0	0.168,1	0.734,5	0.097,3
	H	148	0.000,0	0.006,8	0.135,1	0.858,1	127	0.000,0	0.000,0	0.063,0	0.937,0
5	L	92	0.695,7	0.282,6	0.021,7	0.000,0	108	0.907,4	0.092,6	0.000,0	0.000,0
	ML	104	0.182,7	0.653,8	0.144,2	0.019,2	88	0.284,1	0.443,2	0.261,4	0.011,4
	MH	79	0.025,3	0.177,2	0.531,6	0.265,8	101	0.019,8	0.217,8	0.613,9	0.148,5
	H	131	0.007,6	0.015,3	0.190,8	0.786,3	109	0.000,0	0.000,0	0.082,6	0.917,4

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

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（表 2）。从横向对比发现，碳排放效率的低水平和高水平固化程度更高。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，综合不同水平类型地区的固化信息

及其区域规模信息，根据式(4)计算 1–5 a 时长下的俱乐部趋同指数，时长为 1、3、5 年的结果见表 3。从表 3 可以看出，不管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。为了结果的稳健，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，计算了两种情形下的检验结果，时长为 1、3、5 年的结果见表 4。

表 3 不同时长下区域碳减排公平和效率的俱乐部趋同指数模型

时间段	时长	碳减排公平	碳减排效率
1997–2015	K=1	0.873,6	0.904,2
	K=3	0.760,8	0.808,2
	K=5	0.682,3	0.736,5

表 4 碳排放公平与效率的区域固化程度差异检验

时长 (a)	类型	Q	df	c^2	P
1	公平-效率	39.566,7	12	21.026,1	8.50E–05
	效率-公平	37.631,8	11	19.675,1	9.00E–05
3	公平-效率	81.231,0	12	21.026,1	2.40E–12
	效率-公平	74.203,6	12	21.026,1	5.20E–11
5	公平-效率	108.449,1	12	21.026,1	0.00E+00
	效率-公平	96.747,6	12	21.026,1	2.40E–15

如表 4 所示，不同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 2 得到的结果一致。

4.2.2 公平与效率协调视角下的碳减排潜力评价

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 0.768,7 和 0.816,7，以此计算二者的比重，分别为 0.484,9 和 0.515,1，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，具体结果见表 5。

由表 5 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，过去假定权重相等时大多数省份碳减排潜力都被低估了。江西、四川、贵州 1997 年的差值相对较大，而江西、河南、广东、广西、四川和甘肃 2015 年的差值相对较大，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。采用公平与效率协调的视角，碳减排潜力提高（即差值为正）的省份意味着它们的碳减排潜力主要由碳排放效率驱动。表中差值绝大部分都为正值，这也证明了我国碳排放的效率固化问题比公平固化问题更严重。

表 5 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

地区	1997			2015		
	公平效率	公平效率	两原则	公平效率	公平效率	两原则
	协调原则	相等原则	的差值	协调原则	相等原则	的差值
北京	0.651,9	0.649,7	+0.002,2	0.127,8	0.124,1	+0.003,7
天津	0.479,3	0.481,1	-0.001,8	0.432,3	0.426,1	+0.006,2
河北	0.532,5	0.526,5	+0.006,0	0.605,3	0.596,7	+0.008,6
山西	0.955,2	0.956,5	-0.001,3	0.814,9	0.810,5	+0.004,4
内蒙古	0.646,3	0.640,4	+0.005,9	0.980,5	0.981,1	-0.000,6
辽宁	0.224,2	0.231,2	-0.007,0	0.153,1	0.157,9	-0.004,8
吉林	0.559,1	0.551,9	+0.007,2	0.547,9	0.537,6	+0.010,3
黑龙江	0.579,4	0.571,0	+0.008,4	0.534,2	0.523,7	+0.010,5
上海	0.399,9	0.411,7	-0.011,8	0.133,9	0.134,9	-0.001,0
江苏	0.411,9	0.405,2	+0.006,7	0.529,9	0.521,5	+0.008,4
浙江	0.362,7	0.357,4	+0.005,3	0.483,3	0.473,6	+0.009,7
安徽	0.486,5	0.474,9	+0.011,6	0.524,7	0.513,6	+0.011,1
福建	0.071,7	0.070,6	+0.001,1	0.388,2	0.380,4	+0.007,8
江西	0.449,6	0.437,1	+0.012,5	0.540,4	0.527,1	+0.013,3
山东	0.448,8	0.440,9	+0.007,9	0.596,2	0.587,6	+0.008,6
河南	0.478,6	0.466,9	+0.011,7	0.572,2	0.559,7	+0.012,5
湖北	0.487,3	0.477,5	+0.009,8	0.490,2	0.479,4	+0.010,8
湖南	0.455,4	0.443,8	+0.011,6	0.483,6	0.471,7	+0.011,9
广东	0.441,6	0.432,8	+0.008,8	0.489,4	0.476,9	+0.012,5
广西	0.391,5	0.380,0	+0.011,5	0.503,5	0.490,8	+0.012,7
重庆	0.427,7	0.417,5	+0.010,2	0.423,2	0.414,0	+0.009,2
四川	0.508,2	0.494,8	+0.013,4	0.509,3	0.496,1	+0.013,2
贵州	0.608,0	0.595,7	+0.012,3	0.624,4	0.612,7	+0.011,7
云南	0.122,6	0.121,5	+0.001,1	0.193,9	0.190,7	+0.003,2
陕西	0.495,5	0.484,9	+0.010,6	0.636,7	0.627,1	+0.009,6
甘肃	0.494,7	0.483,6	+0.011,1	0.553,4	0.541,4	+0.012,0
青海	0.529,6	0.517,9	+0.011,7	0.601,6	0.589,9	+0.011,7
宁夏	0.562,2	0.556,1	+0.006,1	0.943,5	0.943,4	+0.000,1
新疆	0.575,3	0.566,5	+0.008,8	0.747,4	0.740,0	+0.007,4

5 结论

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，以人均碳排放量衡量区域碳排放公平，通过 Markov 模型测算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，为政府制定碳减排举措提供一定的科学依据。研究结论如下：（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。

作者分工: 周迪设计了算法并对数据集的开发做了总体设计; 华诗润采集数据并撰写了数据论文。

参考文献

- [1] Janssen, M., Rotmans, J. Allocation of fossil CO₂, emission rights quantifying cultural perspectives [J]. *Ecological Economics*, 1995, 13(1): 65–79.
- [2] 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[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 189–200.
- [3] Munksgaard, J., Pedersen, K. A. CO₂, accounts for open economies: producer or consumer responsibility? [J]. *Energy Policy*, 2007, 29(4): 327–334.
- [4] Zhou, P. Ang, B. W. Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(8): 2911–2916.
- [5] 曹珂, 屈小娥. 中国区域碳排放绩效评估及减碳潜力研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(8): 24–32.
- [6] 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[J]. *山西财经大学学报*, 2015, 37(2): 23–34.
- [7] 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 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 518–527.
- [8] 傅京燕, 原宗琳, 曾翩. 中国区域生态效率的测度及其影响因素分析[J]. *产经评论*, 2016, 7(6): 85–97.
- [9] 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.
- [10] 吴贤荣, 张俊飏, 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[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(7): 1172–1182.
- [11] Wei, C., Ni, J. L., Du, L. M. Regional allocation of carbon dioxide abatement in China [J]. *China Economic Review*, 2012, 23(3): 552–565.
- [12] 周迪, 华诗润. 人均碳排放和效益协调视角下的中国分省碳减排潜力数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.05.15.V1.
- [13] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [14] 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.
- [15] Tone, K. Dealing with undesirable outputs in DEA: a slacks based measure (SBM) approach [C]. North American Productivity Workshop 2004, Toronto, June 23–25, 2004: 44–45.
- [16] 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[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2015, 14(1): 25–35.
- [17] Pan, X. F., Liu, Q., Peng, X. X. Spatial club convergence of regional energy efficiency in China [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51(4): 25–30.
- [18] Gallo, J. L. Space-time analysis of GDP disparities among European regions: a Markov chain approach [J]. *International Regional Science Review*, 2001, 27(2): 138–163.