

# 基于 ZSG-DEA 模型的上海六大行业碳排放权分配效率研究<sup>1</sup>

钟 蓉，张庭婷，谢晓敏，黄 震

（上海交通大学 机械与动力工程学院，上海 200240）

**【摘 要】**：以 ZSG-DEA 模型为手段，设置了六种不同情景，对 2020 年上海市六大行业的碳减排目标进行分解和优化。结果显示，建筑业，交通运输、仓储和邮政业以及批发、零售业和住宿、餐饮业拥有比剩余三个行业更大的减排潜力，分别达到了-70.69%、-77.62%和-65.97%，在初始分配时应当承受更大的减排压力。

**【关键词】**：分配效率；碳配额；ZSG-DEA 模型

**【中图分类号】**：F205；F062.2

**【文献标识码】**：A

**【文章编号】**：1671-4407（2018）02-037-05

## 1、引 言

《京都议定书》催生出了国际碳交易市场，碳交易市场的兴起使得碳排放权的分配受到关注。在总量既定的情况下，公平的分配碳排放权是避免冲突、激励各国减排的首要因素。目前碳排放权主要有两种初始分配方式：免费分配方式和拍卖方式。免费分配方式又包括祖父制和标杆法两种，它们都是依据过往的碳排放情况来分配将来的排放权，而拍卖方式则要求企业通过拍卖竞价来获得排放权，分配效率相对更高。目前我国采用的是免费分配方法，而欧盟和美国已经开始部分采用拍卖方式来分配。对于初始碳排放权的免费分配，每个地区和行业间由于经济发展的阶段不同，仅从历史公平的角度依据过去的碳排放水平来分配未来的碳排放额的方法有失偏颇。拍卖方式虽然能促进公平，但企业因此要面临更高的财力成本支出，所以目前实施的阻力较大。在这种情况下，寻求更合理的分配方式具有重要的意义。我国现在建成的七个试点碳市场中，上海碳市场已建立 3 年的时间，成交量常年排在首位，因此其经验和数据更具参考性。本文将以上海碳市场为背景，分析碳配额在行业间的分配问题。

## 2、文献综述

学者们对总体碳权如何在地区和行业间的分配问题做了大量研究<sup>[1-9]</sup>。其中由于 EUETS 发展较早，因此很多文献围绕欧盟国之间碳权的分配展开了研究。比如林坦和宁俊飞<sup>[1]</sup>使用零和 DEA（zero sum gains data envelopment analysis, ZSG-DEA）模型对 2009 年的欧盟国家碳排放权的分配结果进行了评价，得出了其分配效率较低的结论；Chiu 等<sup>[2]</sup>使用超松弛基础测量的零和 DEA 模型对比欧盟各国的碳权分配，得出了为了获得更大效率应该减少分配给相对不发达国家碳权额度的结论；Viguier 等<sup>[3]</sup>给出了评价欧盟国碳权分配效率的两级可计算平衡模型。随着我国对碳排放重视度的提高，国内的碳权分配也慢慢受到了关注。学者们对于我国的碳权分配主要解决的还是将总目标在区域间分配的问题，比如曾诗鸿和徐妍<sup>[4]</sup>研究了中国省级碳减排分配的效率；郑立群<sup>[5]</sup>从共摊成本分配的公平与效率的角度出发，对碳减排在省份之间的分摊进行了经济学分析；苗壮<sup>[6]</sup>基于环境生产技

<sup>1</sup>**【第一作者简介】**：钟 蓉（1993-），女，湖南常德人，硕士生，研究方向为碳市场与碳交易。E-mail: 13167197871@163.com

**【通讯作者简介】**：谢晓敏（1977-），女，陕西华县人，博士，副教授，研究方向为能源政策。E-mail: xiexiaomin@sjtu.edu.cn

术的视角对我国区域碳排放进行了分配研究等。

然而对于碳排放权在行业间分配的研究却较少,国内有潘伟等<sup>[7]</sup>利用 ZSG-DEA 模型对中国六大行业间碳权分配进行了研究;成贝贝<sup>[8]</sup>以广东省为研究对象,对可计算一般均衡模型(CGE)进行了优化,根据广东地区的碳减排政策特点,设置了 13 个低碳政策情景,利用广东两区域 GD-CGE 模型,研究到 2020 年区域不同碳减排政策对环境、能源、经济的影响;刘小敏和付加锋<sup>[9]</sup>对 2020 年中国碳排放强度目标基于 CGE 模型进行了分析,得到了 44 个行业在不同碳减排目标下的变化情况。对于碳排放在行业间的分配,其意义不亚于碳权在区域间的分配。行业间的分配有助于各行各业的企业对自己的减排责任有更清楚的认识,同时通过对比行业间碳权分配的效率,国家和各地政府还可以合理引导产业结构调整。模型的选取主要由目前所拥有的数据类型决定。由于无法获得构建上海地区 GD-CGE 模型所需的完整数据,因此选用了 ZSG-DEA 模型。本文主要通过 ZSG-DEA 模型的迭代分析法进行上海地区不同行业的碳排放效率研究。

### 3、模型介绍

数据包络分析法(DEA)是采用线性规划技术对多投入多产出决策单元(DMU)的相对效率进行评价的非参数经济计量方法。初始由 Charnes 等<sup>[10]</sup>提出,他们创立了规模报酬不变的 CCR 模型。之后 Banker 等<sup>[11]</sup>发展了可变规模报酬的 BCC 模型。原始的 DEA 模型假设 DMU 之间是相互独立的,而现实情况通常是 DMU 的总和有所限制,因此 Lins 等<sup>[12]</sup>提出了 ZSG-DEA 模型,该模型假设投入或产出值的总和是固定的,在此基础上,提出了两种策略来调节不同 DMU 以达到各项均 DEA 有效:平均分配策略和比例分配策略。具体是指非 DEA 有效的 DMU 单元会按照比例分配多余收入,再通过比例缩减或是迭代法来调整 DMU 单元达到有效边界,最终实现 DEA 有效<sup>[1]</sup>。对于一些碳排放等非意欲产出,刘勇等<sup>[13]</sup>总结了 DEA 模型在处理非意欲产出时使用的主要方法,其中包括非意欲产出作为投入法、倒数转换法、双曲线法、转换向量法、方向距离函数法、SBM 模型法六种。

本文因此选取了投入作为导向的 ZSG-DEA 模型来研究不同预期下各行业的碳减排效率。以 GDP 和能源消耗量为产出,碳排放量为“以非期望产出”,这里作为投入。ZSG-DEA 模型的具体计算公式为:

$$\begin{cases} \min \beta_0 \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i x_{iu} [1 + \frac{x_{i0}(1-\beta_0)}{\sum_{i=1}^n x_{i0}}] \leq \beta_0 x_{0u}, u=1, 2, \dots, U \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i y_{iv} \geq y_{0v}, v=1, 2, \dots, V \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1, i=1, 2, \dots, n \\ \lambda_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x$  为碳排放额度;  $y$  为 GDP 和能耗;  $n$  表示 DMU 的个数,也即六大行业;  $U$  表示投入要素个数;  $V$  表示产出要素个数。 $DMU_0$  的相对效率为  $\beta_0$ , 代表了所有 DMU 中相对效率最高的单元的效率;  $\lambda_i$  为第  $i$  个 DMU 单元的组合比例,也即六大行业的碳排放占比。

本文通过多次迭代,实现对碳配额投入的合理分配。最终所有的 DMU 单元的相对技术效率均达到 1, 实现 DEA 有效。

### 4、数据来源及情景分析

#### 4.1 数据来源

##### 4.1.1 国内生产总值

对于 2020 年 GDP 的预测, 本文参考了 2005—2015 年《中国统计年鉴》及《上海市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》(下文简称《规划纲要》) 等给出的 2015—2020 年上海的 GDP 年均增长率为 6.5% 的估计。在已知 2015 年 GDP 总值的基础上, 本文先求出 2020 年 GDP 总值约为 34421 亿元。其次对于单个行业 2020 年的 GDP 的预测, 本文先对各行业 GDP 占比做出了估计。本文的估计建立在《规划纲要》和《“中国制造 2025”上海行动纲要》的基础之上。根据《规划纲要》的细化指标, 上海“十三五”期间的服务业增加值占全市生产总值比重达到 70% 左右, 战略性新兴产业增加值占全市生产总值的比例达到 20% 左右。《“中国制造 2025”上海行动纲要》提到, 上海定下的战略目标为: 到 2020 年, 落实“中国制造 2025”取得重大进展, 制造业增加值占 GDP 比重保持 25% 左右的目标。据此对 2020 年六大行业的 GDP 占比做出合理预测, 预计工业的占比将为 25% 左右, 而交通运输、仓储和邮政业, 批发、零售业和住宿、餐饮业以及其他行业所代表的服务业预计总占比将达 70% 左右。最后依据以上对 2020 年 GDP 总值和各行业占比的估计完成对各行业生产总值的预测, 如表 1 所示。

表 1 2020 年各行业 GDP 预测占比及绝对值

行业	占比	绝对值/亿元
1. 农、林、牧、渔、水利业	0.32%	110.15
2. 工业	25.00%	8605.33
3. 建筑业	3.54%	1220.22
4. 交通运输、仓储和邮政业	4.30%	1480.12
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	20.35%	7003.37
6. 其他	46.49%	16002.12

#### 4.1.2 能源消耗量

依据 2006—2016 年《上海统计年鉴》中得到的终端能源消耗量及对应年份的《中国统计年鉴》中得到的 GDP 可以求得能源强度。主要年份的能源强度变化如表 2 所示, 从表 2 中可以看出, 除了农、林、牧、渔、水利业, 剩余五大行业的能源强度都出现明显的下降趋势, 且“十二五”期间能源强度的变化量明显小于“十一五”期间。对于 2020 年的数据, 上海市“十三五”规划给出了总能源消耗量控制在 1.25 亿吨标准煤的约束性指标, 对应规划中提到的 6.5% 的年均 GDP 增长, 上海 2020 年总的能源强度应当在 0.36 万吨标准煤/亿元左右。本文首先依据前十年能源强度的变化做出“十三五”期间能源强度的变化将小于“十二五”期间的性质判断, 然后初始以各行业均在 2015 年的基础上下降 10% 为标准, 对六大行业 2020 年的能源强度做出预估, 最后通过表 1 中给出的 GDP 的估计值来计算各行业的能源消耗量, 求得的结果见表 2。

表 2 各年份能源强度及 2020 年能源消耗量预测值

行业	能源强度/(万吨标煤/亿元)				能源消耗量/万吨标煤
	2005 年	2010 年	2015 年	2020E	2020E
终端消费量	0.85	0.63	0.46	0.34	11825.95
1. 农、林、牧、渔、水利业	0.68	0.56	0.64	0.57	63.18
2. 工业	1.18	0.91	0.84	0.76	6515.65
3. 建筑业	0.48	0.32	0.25	0.23	279.55
4. 交通运输、仓储和邮政业	2.46	2.47	1.89	1.7	2516.71
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	0.27	0.17	0.12	0.11	787.12
6. 其他	0.17	0.17	0.12	0.1	1663.73

注: 2006—2008 年能源消耗量缺失, 因此只列出主要年份数据; 2020E 表示 2020 年的预测值。

4.1.3 碳配额初始分配

目前各省份的分配额度由各省份依据五年规划以及历史排放量确定，分配方法以基准线法为主。《规划纲要》提到，上海市 2020 年二氧化碳排放总量控制在 2.5 亿吨以内，本文将以此数据为基准进行行业间的分配。2016 年上海市碳排放交易体系配额总量为 1.55 亿吨，该配额仅包括纳入配额管理单位的 368 家企业，这些企业集中分布在交通、建筑和工业三大行业中。随着未来市场容量的增加，纳入管理的公司也将越来越多元化，将六大行业的企业都纳入管理符合市场公平的原则，因此本文将考虑的是碳排放配额在六大行业间的分配。

对于碳排放额度的初始分配，本文参考了上海 2016 年发布的三大分配制度——行业基准线法、历史强度法和历史排放法，并对其中一些部分进行了简化。其一，工业部门中，供电、供热和汽车玻璃行业采用了行业基准线法，其他工业行业多采用了历史强度法，行业基准线法和历史强度法都是由单位业务量乘以强度单位决定，因此为了统一和简化，工业部门均采用了历史强度法；其二，方法中核算需要用到企业业务量的详细数据，而本文的研究范围将不涉及具体公司的层面，因此方法中需要利用的公司历史强度基数和历史排放基数分别变为以 2013 年到 2015 年的单位 GDP 碳排放和碳排放总量的数据为参考；其三，2016 年上海分配方案中由于商场、宾馆、商务办公、机场等建筑边界复杂，对其采取了历史排放法。这里为了简化，统一采用了历史强度法。在作以上简化后得出了 2020 年六大行业按照历史强度排放法以及历史排放法分别分得的初始分配额见表 3。

表 3 六大行业碳配额初始分配

行业	2013 年	2014 年	2015 年	平均强度/（万吨/亿元）	初始配额/万吨
1. 农、林、牧、渔、水利业	0.23	0.23	0.22	0.23	154.5
2. 工业	0.18	0.18	0.16	0.17	9220.47
3. 建筑业	0.07	0.06	0.06	0.07	499.55
4. 交通运输、仓储和邮政业	1.24	1.18	1.11	1.17	10750.86
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	0.04	0.04	0.03	0.04	1539.82
6. 其他	0.03	0.03	0.03	0.03	2834.81

4.2 情景设置

因为 2020 年投入产出的数据都具有很大的不确定性，所以本文将采用情景分析的方法来讨论各种情境下各行业的碳排放分配问题。依据 LMDI 分解模型的方法，影响上海碳排放的多方面的因素，如经济规模、产业结构、能源强度及产业排放系数等。依据朱聆和张真<sup>[14]</sup>、汪宏韬<sup>[15]</sup>等人的研究结果，经济规模和能源强度是影响碳排放的主要因素，其次是产业结构和能源结构。本文以不同的经济规模和能源强度为标准设置了可能的 2020 年的情景，如表 4 所示，经济规模（使用 GDP 来表示）设定了 6.00%、6.50%和 7.00%三种增加速度，能源强度设定了-5.00%和-10.00%两种下降幅度，因此对应了六种情景。情景一到情景三和情景四到情景六保持能源强度不变，GDP 增速依次增加。情景一和情景四、情景二和情景五、情景二和情景六保持 GDP 增速不变，能源下降幅度依次增加。

表 4 情景设置

行业	GDP			能源强度	
	变动幅度				
	6.00%	6.50%	7.00%	-5.00%	-10.00%

1. 农、林、牧、渔、水利、水利业	107.59	110.15	112.76	66.69	63.18
2. 工业	8405.21	8605.33	8809.23	6877.63	6515.65
3. 建筑业	1191.84	1220.22	1249.13	295.08	279.55
4. 交通运输、仓储和邮政业	1445.7	1480.12	1515.19	2656.53	2516.71
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	6840.51	7003.37	7169.32	830.85	787.12
6. 其他	15630	16002.12	16381.3	1756.16	1663.73

## 5、实证结果分析

本文利用 MaxDEA 软件对 2005 年、2010 年、2015 年进行了效率求解，对 2020 年的六种情景进行了效率求解及再分配。从表 5 可以得出，2005-2010 年，建筑业，交通运输、仓储和邮政业以及批发、零售业和住宿、餐饮业的碳排放配额利用效率明显低于其他行业。2015 年建筑业和批发、零售业和住宿、餐饮业有所提升，达到了平均水平，然而交通运输、仓储和邮政业的碳排放效率依然低下。为了改善行业间碳排放效率不平衡的局面，2020 年的配额分配方案应该减少上述效率不到 1 的行业分配额度，用相对更严苛的标准去重点督促该类行业的减排。

表 5 2005 年、2010 年及 2015 年的碳排放效率

行业	2005 年	2010 年	2015 年
1. 农、林、牧、渔、水利业	1.00	1.00	1.00
2. 工业	1.00	1.00	1.00
3. 建筑业	0.97	0.71	1.00
4. 交通运输、仓储和邮政业	0.54	0.37	0.36
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	0.94	0.70	1.00
6. 其他	1.00	1.00	1.00

对于 2020 年碳配额利用效率的分析，本文以情景一为例。从表 6 可知，建筑业，交通运输、仓储和邮政业，批发、零售业和住宿、餐饮业在内的三大行业 2020 年的碳配额通过历史公平的原则进行初始分配后其利用效率仍然较低。在通过两次迭代后，各行业的 DEA 效率达到了均衡。通过调整后的额度与原来相比，对部分行业的要求有所提升。以建筑业为例，建筑业原本是高碳排放、高能耗的行业，以工业作为可比对象较为合理。同样属性的两个行业，建筑业的初始排放效率低于工业，因此证明以上假设的初始分配方案存在提升的空间。通过多次迭代的方法，可以将多分配给建筑业的配额重新分配给利用效率较高的其他行业，使碳配额得到最大程度的利用。以上调整可以改善过去年份出现的部分行业的利用效率明显低于平均利用效率的现象，对于整体碳排放水平的提高具有重要意义。

表 6 情景一的调整过程

项目	GDP/亿元	能源消耗量/万吨标准煤	初始配额/万吨 CO <sub>2</sub>	DEA 效率值	第一次迭代后/万吨 CO <sub>2</sub>	DEA 效率值	第二次迭代后/万吨 CO <sub>2</sub>	DEA 效率值
1. 农、林、牧、渔、水利业	107.59	66.69	154.5	1.00	233.31	1.00	235.15	1.00
2. 工业	8405.21	6877.63	9220.47	1.00	13923.89	1.00	14033.43	1.00

3. 建筑业	1191.84	295.08	499.55	0.97	738.85	0.89	659.78	1.00
4. 交通运输、仓储和邮政业	1445.7	2656.53	10750.86	0.34	3691.99	1.00	3721.04	1.00
5. 批发、零售业和住宿、餐饮业	6840.51	830.85	1539.82	0.88	2131.1	0.95	2036.07	1.00
6. 其他	15630	1756.16	2834.81	1.00	4280.86	1.00	4314.54	1.00
合计	33620.84	12482.94	25000	—	25000	—	25000	—
平均效率值	—	—	—	0.86	—	0.97	—	1.00

在对初始碳配额重新分配后，各行业的利用效率均达到了 1。在此基础之上，本文又对比了各行业在 2005 年的基准下的下降幅度。通过图 1 可以看出，尽管各行业的碳排放效率均达到了 1，但是每个行业的减排潜力是不同的，相较 2005 基准年，农、林、牧、渔、水利业，工业以及其他行业超额完成了“2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放量比 2005 年下降 40%~45% 的控制目标”，而建筑业，交通运输、仓储和邮政业以及批发、零售业和住宿、餐饮业还存在较大的提升空间。因此，建筑业，交通运输、仓储和邮政业以及批发、零售业和住宿、餐饮业的减排潜力明显大于其他三个行业。这与其初始碳排放效率利用有关，经过模型的调整，初始效率较低的三大行业仍然具有较高的减排潜力。



图 1 2020 年配额再分配后各行业的单位 GDP 碳排放的下降幅度与 2005 年单位 GDP 碳排放的 60%的比较

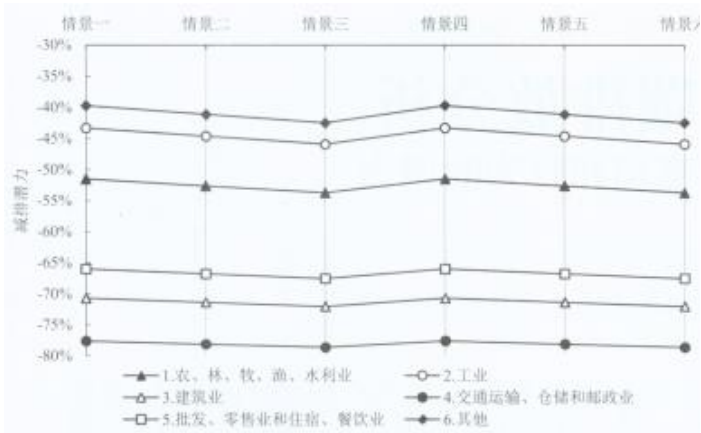


图 2 GDP 增速和能源强度下降速度对于结果的影响

在分析了情景一的结论后，本文又对比分析了情景一到情景六的变化。从上文可知，情景一到情景三和情景四到情景六的变量为 GDP 增速，情景一和情景四、情景一和情景五以及情景二和情景六的变量为能源强度。从图 2 可以看出，GDP 增速和能源强度的下降速度对于六大行业减排潜力的影响不同。情景一到情景三以及情景四到情景五的下降主要是来自于 GDP 增速的提升。对于减排潜力相对较小的行业，GDP 增速从 6%到 7%增加的过程对于其减排潜力的影响较为明显，而对于减排潜力较大的三个行业，GDP 增速的增加对于结果的影响较小。对比情景一和情景三、情景二和情景五、情景三和情景六的差距，可发现能源强度下降速度对于不同行业的影响较为微弱。

## 6、局限与启示

本文采用 ZSG-DEA 迭代的方法对 2020 年的碳排放总额进行了行业间的分配，在将不同行业做了对比和调整，本文得出了建筑业，交通运输、仓储和邮政业以及批发、零售业和住宿、餐饮业减排潜力较大的结论。通过政策调控这三类行业的碳分配额度可以促使碳排放份额在六大行业间实现较为公平的分配。对于建筑业以及交通运输、仓储和邮政业，目前采取的分配方法为历史强度法，以过去三年历史强度的平均为标准去规划下一年的配额。由于其减排潜力较大，因此在其原始分配方法的基础上可以设置一个小于 1 的减排系数来减少该行业的配额。对于批发、零售业和住宿、餐饮业，目前主要依据《上海市 2016 年碳排放配额分配方案》中提到的“对商场、宾馆、商务办公、机场等建筑”的标准采取历史排放法。历史排放法是基于过去三年的排放量绝对值的平均来规划下一年的配额。因此对于该行业，仍然可以设置一个小于 1 的减排系数来减少该行业的配额。减排系数由行业的减排潜力的大小来确定，从图 1 的结论中，本文已经知道减排潜力由小到大依次为批发、零售业和住宿、餐饮业，建筑业以及交通运输、仓储和邮政业，因此减排系数从大到小也应为该顺序。

总的说来，目前的碳排放分配方案还停留在单纯的从历史公平和地区公平的角度来分配行业间的碳排放份额，未考虑不同行业间分配公平的问题。从本文的观点来看，2017 年全国性的碳市场启动后，建议将行业公平纳入碳排放份额分配核算体系，以达到促进我国碳排放基础分配体系更加公平合理的目的。

值得指出的，是本文在情景假设过程中存在两点局限性。其一是基于 2016 年上海市的碳分配方案简化的基础上对 2020 年的碳配额进行了分配，六大行业统一采用了历史强度法。这一假设可能对初始碳排放配额会有一定影响，但论文重点是通过 ZSG-DEA 模型迭代调整后的结果与基准年的对比，因此其影响会被削弱，关键结果仍具参考价值。其二是未考虑行业内在属性，将六大行业作为等同的 DMU 单元来考虑。虽然行业间内在属性的差别是客观存在的，但具有类似碳排放属性的工业，建筑业以及交通运输、仓储和邮政业的对比，还有批发、零售业和住宿、餐饮业及同属第三产业的其他行业的对比仍具有切实合理的意义。

### [参考文献]:

[1]林 坦，宁俊飞. 基于零和 DEA 模型的欧盟国家碳排放权分配效率研究[J]. 数量经济技术经济研究，2011（3）：36-50.

[2]Chiu Y H，Lin J C，Hsu C C，et al .Carbon emission allowances of efficiency analysis：Application of super SBMZSG-DEA model[J].Polish Journal of Environmental Studies，2013，22（3）：653-666.

[3]Viguier L，Vielle M，Haurie A，et al .A two-level computable equilibrium model to assess the strategic allocation of emission allowances within the European union[J].Computers & Operations Research，2006，33（2）：369-385.

[4]曾诗鸿，徐 妍. 基于零和 DEA 模型的中国省级碳减排分配效率研究[J]. 管理现代化，2014（5）：63-65.

---

[5]郑立群. 中国各省区碳减排责任分摊—基于零和收益 DEA 模型的研究[J]. 资源科学, 2012 (11): 2087-2096.

[6]苗 壮. 我国区域碳排放分配研究——基于环境生产技术的 ZSG 效率分配视角[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

[7]潘 伟, 吴 婷, 王凤侠. 中国行业碳排放分配效率研究[J]. 统计与决策, 2015 (18): 142-144.

[8]成贝贝. 区域碳总量行业分配及减排政策模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

[9]刘小敏, 付加锋. 基于 CGE 模型的 2020 年中国碳排放强度目标分析[J]. 资源科学, 2011 (4): 634-639.

[10]Charnes A , Cooper W W , Rhodes E .Measuring the efficiency of decision making units[J].European Journal of Operational Research, 1978, 2 (6): 429-444.

[11]Banker R D , Charnes A , Cooper W W .Some models for the estimation of technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J].Management Science, 1984, 30 (9): 1078-1092.

[12]Lins M P E , Gomes E G , de Mello J C C B S , et al .Olympic ranking based on a zero sum gains DEA model[J].European Journal of Operational Research, 2003, 148 (2): 312-322.

[13]刘 勇, 李志祥, 李 静. 环境效率评价方法的比较研究[J]. 数学的实践与认识, 2010 (1): 84-92.

[14]朱 聆, 张 真. 上海市碳排放强度的影响因素解析[J]. 环境科学研究, 2011 (1): 20-26.

[15]汪宏韬. 基于 LMDI 的上海市能源消费碳排放实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010 (S2): 143-146.