

引用格式:姚晔,夏炎,范英,等. 基于环境生产技术效率的中国2030年区域减排目标路径研究[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2335-2343. [Yao Y, Xia Y, Fan Y, et al. The pathway of Chinese regional carbon emission in 2030: a research based on ZSG environmental production technology efficiency[J]. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2335-2343.] DOI: 10.18402/resci.2017.12.12

# 基于环境生产技术效率的中国2030年区域减排目标路径研究

姚 晔<sup>1,2</sup>, 夏 炎<sup>1,2</sup>, 范 英<sup>3</sup>, 蒋茂荣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘 要:** 目前, 中国为进一步强化应对气候变化的行动安排, 提出了到2030年, 单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放比2005年下降60%~65%的减排目标。由于不同地区的技术水平、经济发展阶段不同, 造成各行业的能源使用效率、节能潜力也存在差异, 等量的碳减排所对应的技术效率也大相径庭。因此, 国家分配给各地区、各行业的差异化减排目标将直接影响各地区的产业结构以及相关的能源环境政策。在此背景下, 本文把网络DEA模型与投入产出技术相结合, 创新地构建了ZSG-网络DEA模型, 刻画了在2030年碳减排目标既定的约束下, 实现各地区与各行业环境生产技术效率最大化的减排路径。结果表明, 基于环境生产技术效率的视角, 不同地区、不同行业实现2030年的减排目标的路径差异非常明显。其中, 中部地区、北部沿海以及西北地区的碳排放量呈现出自2010年有较大幅度增长, 2020年后保持稳定增长的趋势; 而东部沿海地区在2005—2030年间的碳排放增长趋势较为缓慢, 但其碳排放占全国总排放比例降幅最大, 为8%。在行业减排贡献上, 采矿业、非金属矿物制品业等高耗能行业面临的减排形势更为严峻, 其碳强度下降水平应远超过INDC的65%的目标。总体而言, INDC目标对于中国各地区碳强度下降有积极作用。

**关键词:** 减排路径; 投入产出技术; 网络DEA; 环境生产技术效率; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.12.12

## 1 引言

2015年6月30号, 中国向联合国提交了应对气候变化的自主贡献文件《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》(Intended Nationally Determined Contributions, INDC)<sup>[1]</sup>。根据文件, 到2030年, 中国要完成单位国内生产总值的CO<sub>2</sub>排放(即碳强度), 比2005年下降60%~65%的目标。这意味着, 为顺利实现INDC目标, 中国在合理分配碳减排目标方面, 须做更多的努力。

碳生产率, 即单位CO<sub>2</sub>的国内生产总值水平, 也是用于测度碳排放的约束性指标之一, 它能够反映CO<sub>2</sub>排放与经济发展的关系。虽然碳强度和碳生产

率在数值上呈倒数关系, 但其变化的趋势明显不同。如图1所示, 碳强度的加速下降并不能代表碳生产率有显著地提高。此外, 二者看待碳排放的视角也不同, 碳强度把CO<sub>2</sub>视为一种污染, 强调的是碳排放造成的环境影响; 碳生产率则把CO<sub>2</sub>视为一种生产要素, 强调的是碳排放空间的有限性。因此, 不同的碳减排指标约束下, 不同地区、不同行业的减排难度和减排路径也不尽相同, 从而影响2030年INDC全国碳减排目标的实现。

由于各地区的节能基础、经济发展水平不同, 各部门的能源使用效率、节能潜力也存在很大差别。即使以相同的降幅完成碳排放目标, 所对应的

收稿日期: 2017-09-07, 修订日期: 2017-10-05

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划项目(2016YFA0602804); 国家自然科学基金项目(71573248)。

作者简介: 姚晔, 女, 河北定兴县人, 硕士生, 主要研究方向为能源经济、能源环境政策, 气候变化与节能减排。E-mail: yaoye215@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 夏炎, E-mail: xiayan@casipm.ac.cn

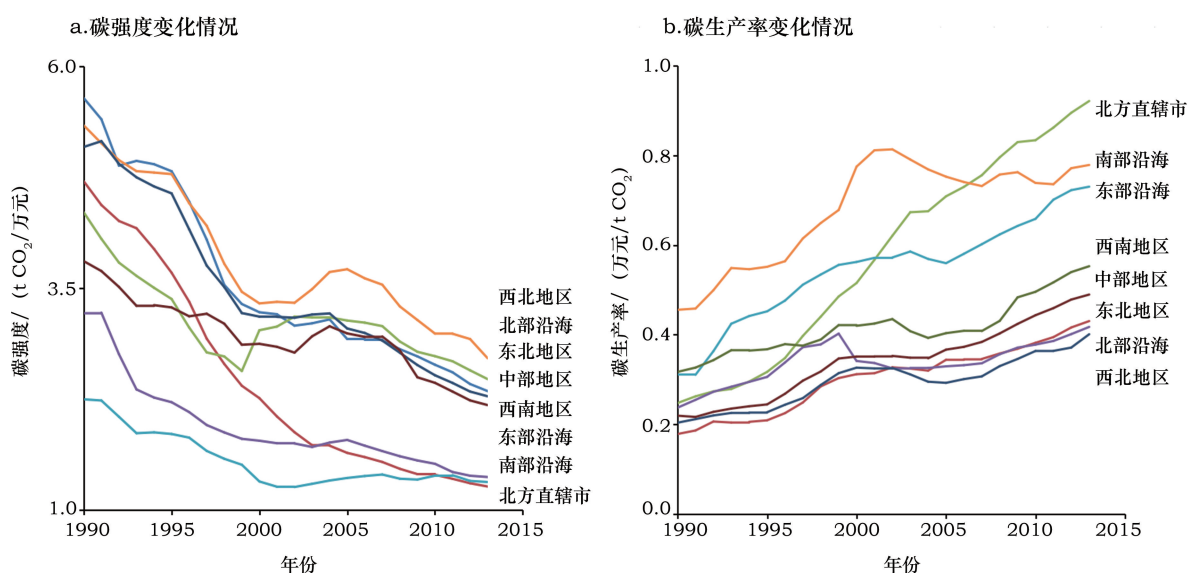


图1 1990—2013年中国八地区碳强度与碳生产率变化情况

Figure 1 Changes of carbon intensity and carbon productivity in China's eight regions from 1990 to 2013

环境生产技术效率也大相径庭。国家对各地区、各部门减排目标分配的差异化,会直接在区域产业结构调整、能源生产与消费的策略制定等方面产生不同的影响。因此,明确各地区、各部门应当实现的碳排放约束目标,对于国家及地区层面发展规划的制定,具有一定的借鉴意义。综上所述,如何在保证INDC减排目标实现的前提下,对中国整体碳减排目标在地区和部门维度进行效率分配,就具有极强的研究意义。

目前,随着碳排放相关研究的逐步深入,碳减排目标及其实现问题逐渐成为国内外学者的研究焦点。研究主要在减排潜力、碳减排的协同效应以及碳排放峰值的实现与影响三方面展开。Hickman 等对英国交通部门的减排潜力进行了总体的评价,并指出若按照现有的能耗效率,达到2030年60%的减排目标还较为困难,需要加强规划指导<sup>[2]</sup>。Özer 等利用LEAP模型对土耳其电力部门的减排潜力进行分析,发现在激进的温室气体减排政策下,与2006年相比,2030年电力部门的碳强度较2006年可以下降18.4%,并顺利实现17.5%的减排率目标<sup>[3]</sup>。Iii 等从能效改进的角度研究了印度水泥和钢铁部门的减排潜力,并得到了到2030年两部门的累计碳减排量与电力、燃料节约效果<sup>[4]</sup>。冯东等利用SBM模型对京津冀13个城市2005—2014年的碳排放效率进行测算,并从公平性和效率性两方

面评价了各城市的减排潜力<sup>[5]</sup>。

Su 等研究了福岛核事故与2030年碳减排目标实现间的协同关系,并指出在零核电情境下,日本很难达到30%的碳减排目标<sup>[6]</sup>。泰国学者Chunark等针对碳税与碳减排之间的协调效应进行了研究,得出了不同减排目标下的碳税设定方案<sup>[7]</sup>。另外, Luukkanen 等<sup>[8]</sup>、Li 等<sup>[9]</sup>分别从全国层面和区域层面对经济结构调整与减排政策之间的协同关系进行了研究,指出产业结构调整有利于促进节能减排政策的实施,但仅依靠传统能源价格的调整虽能有效减排却会抑制经济增长。崔强等在交通运输部门层面,研究了中国各种交通运输方式的协同低碳化问题,表明目前中国交通运输方面的低碳协同度很低,交通运输部门若想在节能减排上取得更多的低碳成效,需要在政策、技术等内在驱动力层面上给予更大的支持<sup>[10]</sup>。

在碳排放峰值的实现与影响研究方面:Wang 等<sup>[11]</sup>、程路等<sup>[12]</sup>对碳峰值实现的内在要求及其在电力发展层面的影响进行了分析。结果表明:尽快实现碳排放达峰并降低峰值,关键在于能源消费总量的控制以及清洁电力的发展。Yuan 等<sup>[13]</sup>、柴麒麟等<sup>[14]</sup>、毕超<sup>[15]</sup>及Elzen 等<sup>[16]</sup>从经济增长、能源消费等方面对中国碳排放峰值目标实现路径进行了研究。一致得出中国在2030年达到碳排放峰值是可能的,但需要在目前已有的政策下,加强温室气体减排的努力

2017年12月

与行动。朱宇恩等从省级视角,基于 IPAT 模型和情景分析法对中国山西省碳排放峰值进行了预测,得出通过上调年节能率或可再生能源年替代率,可确保山西省 2030 年达到碳排放峰值<sup>[17]</sup>。

综上所述可以看出,目前对碳减排目标及其实现问题的现有研究多集中于宏观国家层面,或是国家中的单一部门层面,缺乏对国家内部不同地区及各部门系统性和整体性的分析。苗壮等对上述问题进行了改进,利用 ZSG-DEA 模型,对中国各省区十二五期间的碳强度约束指标进行了效率分配。从地区层面,对碳减排目标的实现做了一个较为完善的分析<sup>[18]</sup>。但苗壮等在分析省级碳排放时,是把各省单独作为研究对象,没有考虑到国民经济不同地区各部门之间的区别和联系。故此,在苗壮等研究的基础上,本文把区域间投入产出表中的区域间溢出和反馈效应引入网络 DEA 模型,补充考虑了各地区各部门之间的内在联系。利用 ZSG-网络 DEA 模型与投入产出技术结合的方法,研究了在 2030 年 INDC 目标既定的约束条件下,各地区与各行业实现环境生产技术效率最大化的减排路径选择问题。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

本文提出一种总量控制条件下,可用于矩阵型复杂网络系统技术效率评价的网络 DEA (Data Envelopment Analysis, 数据包络分析) 建模思路。同时,在碳排放总量保持不变的约束下,某地区某部门的 CO<sub>2</sub> 排放量升高对应着其他省区的排放量降低,这体现出了总额不变的“零和收益”(Zero-Sum-Gains) 思想。基于上述思想,本文构建了以碳生产率为评价指标的 ZSG-网络 DEA 模型。

某地区某一部门碳排放的技术效率影响是多方面的,不仅体现在其他地区同一部门与其的联系上,而且还体现在同一地区不同部门对该部门的影响上。各地区与各部门间的相互联系,形成复杂的交换网络。因此,在研究减排目标分配问题时,可以采用网络 DEA 与区域间投入产出表结合的方法,把投入产出表中的中间矩阵引入模型,更好地反映出各地区与各部门间的联系。值得注意的是,一般的网络 DEA 模型投入、产出变量不会受到其他条件的约束,但本文是以不同地区的部门 CO<sub>2</sub> 排放量作

为研究对象,其会受到 INDC 碳强度下降 60%~65% 的约束目标的影响,因而采用上述总量控制下的 ZSG-网络 DEA 方法。

在 ZSG-网络 DEA 方法中,基本网络 DEA 下技术效率无效的决策单元 (Decision Making Unit, DMU) 会被分配新的投入或产出变量,最终使得系统中所有 DMU 的技术效率都为 1,即在发生改变的变量总额保持不变的前提下,全部决策单元都位于新的生产前沿面上。本文利用碳生产率的思想构建 ZSG-网络 DEA 模型,与其他学者研究的思路不同,该思路是把 CO<sub>2</sub> 排放量视为一种生产要素,并作为投入变量引入模型;而非视为一种污染,将其作为非期望产出变量。

模型把  $N$  个部门作为 DMU,就业人数、资本存量,区域间投入产出表中的中间投入和碳排放量作为四种投入变量(用  $L$ ,  $K$ ,  $Z^k$  和 CO<sub>2</sub> 表示),部门增加值和区域间投入产出表中的中间产出为产出变量(用  $GDP$  和  $Z^j$  表示)。因此,第  $i$  部门的就业人数、资本存量与碳排放量分别为  $L_i$ ,  $K_i$  和 CO<sub>2*i*</sub>,  $GDP_i$  为该部门的增加值。除此之外,按区域间投入产出表的定义,第  $i$  部门投入到  $k$  部门的中间投入为  $Z_{ik}$ ,  $i$  部门对  $k$  部门的中间产出为  $Z_{ki}$ 。综上,所有投入、产出向量构成了生产技术集  $T$ ,可表示为:

$$T = \{(L, K, CO_2, Z^k, GDP, Z^j): \\ L, K, CO_2, Z^k \rightarrow GDP, Z^j\}$$

结合上述生产技术集,可得到基本的网络 DEA 模型,用数学语言来描述即:

$$\begin{aligned} s.t. \quad & \min_{\theta, \lambda} \theta_i \text{ for } i = 1, \dots, N \\ & \sum_{j=1}^N z_{jk} \lambda_{ij} \leq z_{ik} \quad k = 1, \dots, N \rightarrow j\text{-th sector input constr.} \\ & \sum_{j=1}^N z_{kj} \lambda_{ij} \geq z_{ki} \quad k = 1, \dots, N \rightarrow j\text{-th sector output constr.} \\ & \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N z_{kj} \lambda_{ij} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N z_{jk} \lambda_{ij} \rightarrow \text{symmetry constr} \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} L_j \leq L_i, \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} K_j \leq K_i \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} CO_{2j} \leq \theta_i CO_{2i} \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} GDP_j \geq GDP_i \\ & \lambda_{ij} \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$



式中  $i$  为决策单元, 这里指各地区的不同部门;  $\theta_i$  为决策变量, 它是决策者所控制的因素, 指的是系统所评价的碳排放技术效率; 目标函数  $\theta_i$  最小化的涵义为追求该部门的碳排放扩张系数的最小化, 即为相应技术效率倒数的最小化。规划模型的目的是通过已知的投入变量就业人数、碳排放量等, 与产出变量中间产出、部门增加值, 来选择不同的规划系数  $\lambda_{ij}$ , 并最终确定这些决策变量的最优值。可以看到, 与传统 DEA 模型不同, 引入投入产出技术的模型加入了中间投入和中间产出约束, 以及必须满足“总中间投入与总中间产出相等”的等式约束。

在公式(1)的基础上, 根据 Gomes 等<sup>[19]</sup>的研究成果, 可以得出 ZSG-网络 DEA 模型, 即可以利用 ZSG 环境生产效率对中国 INDC 目标进行分配。模型为:

$$\begin{aligned} & \text{s.t.} \quad \min_{\theta_i, \lambda} \theta_i, \text{ for } i = 1, \dots, N \\ & \left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=1}^N z_{jk} \lambda_{ij} \leq z_{ik} \quad k = 1, \dots, N \rightarrow j\text{-th sector input constr.} \\ & \sum_{j=1}^N z_{kj} \lambda_{ij} \geq z_{ki} \quad k = 1, \dots, N \rightarrow j\text{-th sector output constr.} \\ & \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N z_{kj} \lambda_{ij} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N z_{jk} \lambda_{ij} \rightarrow \text{symmetry constr} \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} L_j \leq L_i, \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} K_j \leq K_i \\ & \sum_{j=1}^G \lambda_{ij} CO_{2j} \left[ 1 + \frac{CO_{2i}(1-\theta_i)}{\sum_{j \neq i} CO_{2j}} \right] \leq \theta_i CO_{2i} \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} GDP_j \geq GDP_i \\ & \lambda_{ij} \geq 0 \end{aligned} \right. \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $\sum CO_{2i}$  为年度全国  $CO_2$  排放量, 即实现 INDC 减排目标的约束条件。这里按照比例分配原则, 即第  $i$  个部门增加  $CO_{2i}(1-\theta_i)$  份额的投入, 对应其他  $N-1$  个部门会按照其所占的全国  $CO_2$  排放量的比例等份额的减少, 即满足如下减少量公式:

$$\frac{CO_{2i}}{\sum_{j \neq i} CO_{2j}} CO_{2i}(1-\theta_i) \quad (3)$$

根据 Lins 等<sup>[20]</sup>的证明, 可以通过  $\theta_{ri}$  和  $\theta_i$  存在的线性关系, 求解非线性规划的公式(2), 即:

$$\theta_{ri} = \theta_i \left[ 1 + \frac{\sum_{j \in W} CO_{2j}(1-q_{pj}\theta_{ri})}{\sum_{j \notin W} CO_{2j}} \right] \quad (4)$$

其中, 公式(1)得到的技术效率不为 1 的部门组成的合作集为  $q_{pj} = \theta_p / \theta_j$ , 表示为第  $p$  部门与第  $j$  部门的技术效率比。通过公式(4)的计算即可得到各部门新的环境技术效率  $\theta_{ri}$ 。本文采用重复迭代法来求解不同情景下中国碳排放区域层面和部门层面的长期变化趋势, 即先利用公式(1)求出  $CO_2$  排放的扩张系数  $\theta_i$ , 再利用公式(4)的计算求得  $\theta_{ri}$ 。从整体效率最大化的角度, 对各地区、各部门在 2030 年 INDC 目标的约束下, 进行区域减排目标的效率分配。

## 2.2 数据来源

本文基于国家统计局最新公布的各省 2012 年投入产出表<sup>[21]</sup>, 编制了八大区间投入产出表, 由此得到反映不同区域、各部门间相互联系的区域间中间矩阵数据。八地区的划分具体为东北地区(辽宁、吉林、黑龙江), 北方直辖市(北京、天津), 北部沿海(河北、山东), 东部沿海(上海、江苏、浙江), 南部沿海(广东、福建、海南), 中部地区(山西、河南、湖北、湖南、安徽、江西), 西南地区(重庆、四川、贵州、云南、广西、青海)以及西北地区(陕西、内蒙古、宁夏、甘肃、新疆)。就业人数是根据《中国统计年鉴》<sup>[22]</sup>中获得的各行业就业人数数据, 再按照各地区统计年鉴公布的各行业详细的就业人数进行各地区分摊。资本存量则是按照《中国统计年鉴》<sup>[22]</sup>可获得的固定资产折旧项及分部门的折旧率, 计算得出每一年的资本存量, 并以 2012 年作为基年进行调整。在碳排放量预测方面, 本文首先利用 IPCC<sup>[23]</sup>提供的碳排放核算方式对  $CO_2$  排放量进行测算。再以 2012 年八地区各部门的  $CO_2$  排放量作为预测基准, 估计后续年份的碳排放情况。值得说明的是, 本文假设中国在 2020 年可以实现比 2005 年下降 45% 的碳强度目标。考虑到数据可得性, 本文将研究基准年份定为 2012 年。对于中间投入和产出数据, 使用主系数非线性方法, 通过每五年估计一次直接消耗系数矩阵的方式, 预测 2015—2030 年间国民经济部门间关系变动。其他变量从 2015—2030 年的数据, 是根据可得数据及如表 1 所示增长率分阶段估算得到。

在“十三五”规划目标中, 中国提出了“经济保持中高速增长”的目标。此外, 借鉴李善同<sup>[24]</sup>的研究思路, 本文考虑低速、中速、高速三种经济发展方

2017年12月

式,预测了中国2016—2030年间的经济增长率。同时,结合2030年设定的INDC目标,为模型设定了六种情景(如表1所示)。由于文章篇幅所限,结果分析均利用基本情形的情景2数据进行计算。

### 3 结果及分析

#### 3.1 各地区、各行业减排目标分配

本文采用MATLAB 2015b对碳生产率的ZSG-网络DEA模型进行规划求解。若扩张系数大于1,则该部门理论上允许增加碳排放额度,而该数值小于1的部门则需要减排。结果发现,环境生产技术效率分配视角下,各地区及各行业的减排目标细分不尽相同,主要表现在各地区碳排放占比和各行业减排贡献两方面。

如图2所示,2005—2030年期间,全国总碳排放量呈现上升趋势,其中2015—2022年间的上升趋势显著。如图3所示,在各地碳排放占比方面,与2005年相比,2020年和2030年各地区的碳排放占比情况发生了较大变化。为实现并完成2030年碳强度下降65%的减排目标,中国对北部沿海、东部沿海、中部地区的减排要求会更为严格,其地区排放量占全国的比重降幅达4%~8%。但对于西南、西北地区来说,其碳排放全国占比幅度有所增加,且西南地区的增加幅度超过了10%,西北地区增幅达4%。这也可以看出中国支持西部大开发,第二产业向西部转移将给该地区碳排放造成较大的影响。北方直辖市、南部沿海以及东北地区只有1%~2%的小幅增加。

其次,在每个地区内部,不同碳排放目标对不

同行业的减排促进作用也不同。如:除建筑业和交通运输及仓储业外,北方直辖市各行业的ZSG排放强度降幅更大。同时,应该注意到,各部门达到强度减排65%目标的贡献要求也有所不同。若实现2030年65%的碳强度减排目标,对中部地区和东部沿海的轻工业、北部沿海的金属矿物制品业等高能耗部门要求较高,即:要求这些部门的强度减排目标超出全国的65%水平,其超出该比例的4个地区碳排放贡献见表2。

#### 3.2 各地区低碳发展路径

各地区由于自身的资源禀赋、能源消费结构和产业结构的差异,导致其实现2030年碳排放目标的发展路径必然存在较大差异。本文以实现2030年65%的碳强度目标为例,展示了自2005—2030年全国八地区碳排放量的发展路径,如图4所示。可以看到,为实现2030年的减排目标,各地区在碳排放

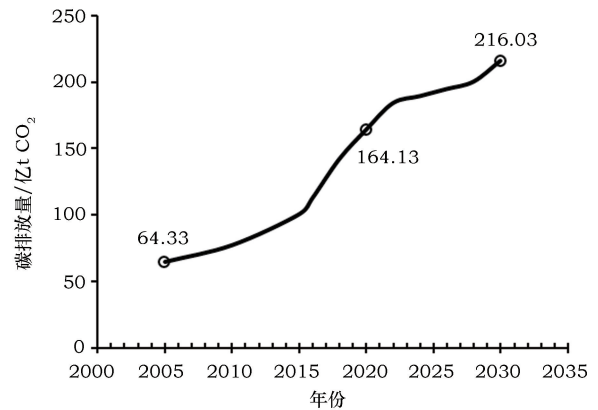


图2 2005—2030年基于碳生产率模型的全国家碳排放量

Figure 2 The national carbon emission from 2005—2030 based on network ZSG-DEA model

表1 三种发展方式下的情景设置

Table 1 Scenarios of three-development pattern

发展方式	情景	目标设定/%		时期 /年	GDP 增长率%	就业 增长率%	资本存量 增长率/%
		2020年	2030年				
中速发展(基本情形)	情景1	45	60	2016—2020	6.7	0	8.4
	情景2	45	65	2021—2025	6.4	0	7.8
				2026—2030	5.9	-0.3	7.0
低速发展(风险情形)	情景3	45	60	2016—2020	5.7	0	6.9
	情景4	45	65	2021—2025	5.1	0	6.1
				2026—2030	4.3	-0.3	4.9
高速发展(增长情形)	情景5	45	60	2016—2020	7.2	0	7.5
	情景6	45	65	2021—2025	6.8	0	6.8
				2026—2030	6.0	-0.3	5.5

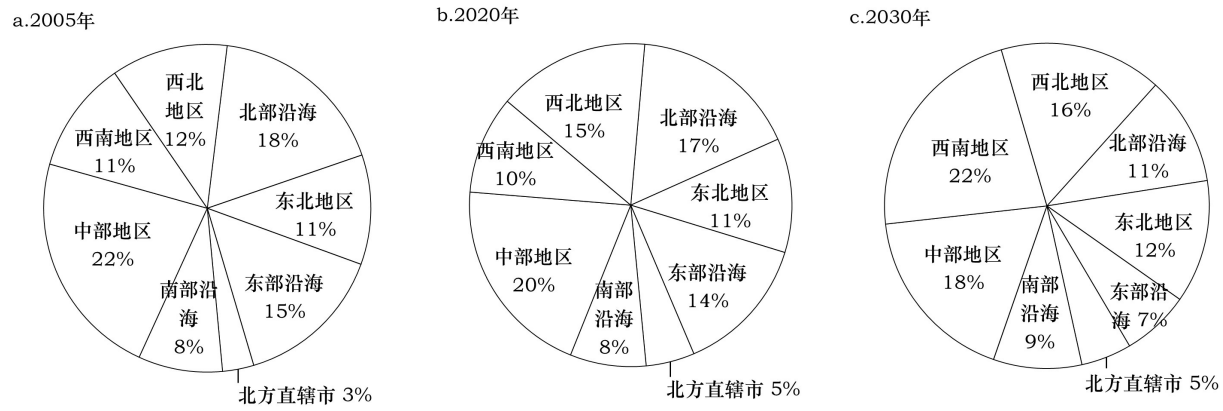


图3 2005—2030年基于碳生产率模型的八地区碳排放占比对比

Figure 3 The proportion of carbon emission for eight regions from 2005–2030 based on network ZSG–DEA model

表2 基于碳生产率模型的2030年各部门减排贡献

Table 2 Emission reduction contribution for particular sectors in 2030  
based on network ZSG–DEA model

部门		减排贡献/%
北部沿海	金属矿物制品业	74.9
	金属冶炼及压延	74.3
	交通运输及仓储	73.9
	批发、零售、住宿与餐饮业	74.4
东部沿海	农林牧渔业	71.2
	采矿业	71.3
	轻工业	69.3
	非金属矿物制品	70.4
	金属冶炼及压延	69.6
	装备制造业	70.1
	电力、热力、燃气和水供应业	69.8
	建筑业	71.0
	轻工业	71.5
	其他制造业	79.0
中部地区	电力、热力、燃气和水供应业	70.8
	交通运输及仓储	70.3
	批发、零售、住宿与餐饮业	72.0
	其他制造业	68.6

注:表中仅列出减排贡献超出65%的地区和部门,65%及以下部分此表未列出。

总量以及碳强度发展趋势上呈现出较大的差异。

总体来说,2005—2030年期间,各地区的碳排放量都呈现上升趋势,且在2015—2020年期间上升表现更为明显。中部地区、北部沿海以及西北地区的碳排放量呈现出自2010年有较大幅度的增长,2020年后保持稳定且缓慢的增长趋势,这与国家加

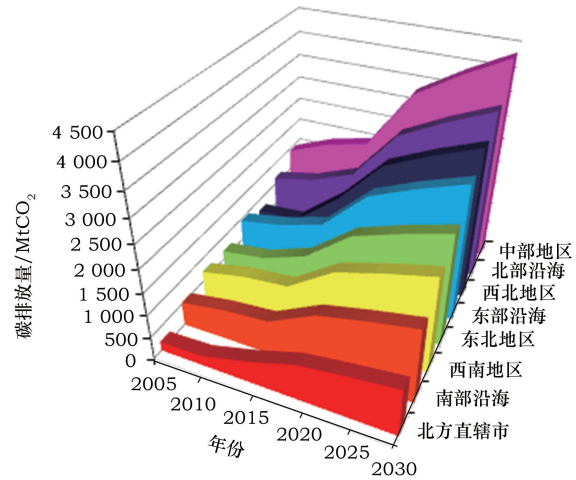


图4 2005—2030年八地区碳排放发展路径

Figure 4 The pathway of emission reduction for eight regions  
from 2005 to 2030

大对节能减排的重视力度有关。中部地区由山西、河南、安徽等人口大省和资源大省组成,其碳排放量在全国的占比一直在20%左右;北部沿海地区由山东、河北两高排放省组成,2015年该地区碳排放总量占全国的16.9%;对于西北地区来说,虽然存在一些发展较为落后的省份,但是由于内蒙古、新疆这样主要依靠资源发展的省份存在,其碳排放量占比在全国也保持高位,因而节能减排政策目标的实现势必需要这些地区发挥更大的贡献。相比于其他地区,东部沿海地区,在2010—2030年间的增长趋势较为缓慢,这种趋势也与该地区以第三产业为主的产业结构密不可分。



2017年12月

从地区碳强度方面看,2030年的总量减排目标对于各地区碳减排的效果各有不同。如表3所示,整体来看,INDC目标对于中国碳强度下降有积极作用。其中,北部沿海、中部地区的降幅更加明显。而碳强度较低的北方直辖市、南部沿海地区,总量控制目标对其碳强度的影响相对较小。西北和西南地区的碳强度也有所下降,但是碳强度水平与全国其他地区相比依然居于高位。这主要是因为以低耗能产业或服务业为主的地区减排潜力较小,而以高耗能产业为主的地区减排潜力较大。因此,总量减排目标的设定只能在一定程度上促进各地区碳强度的降低,对于节能减排潜力较小的地区来说,应保持低碳发展模式,并根据其发展现状制定相应的减排目标。

表3 2005—2030年中国八地区碳强度平均变化

Table 3 Chances of carbon intensity for China's eight regions

年份	from 2005 to 2030					
	2005	2010	2015	2020	2025	2030
北方直辖市	1.64	1.40	1.46	1.32	1.24	1.10
北部沿海	3.14	2.73	2.16	1.95	1.83	1.01
东北地区	2.93	2.64	2.35	2.11	1.98	1.83
东部沿海	1.79	1.52	1.19	1.07	1.01	0.42
南部沿海	1.36	1.39	0.88	0.79	0.75	0.74
中部地区	3.05	2.52	1.63	1.47	1.38	1.05
西南地区	2.99	2.43	1.29	1.17	1.09	2.13
西北地区	3.72	2.99	3.30	2.97	2.79	2.55

## 4 结论与政策建议

### 4.1 结论

本文将ZSG环境生产技术效率、网络DEA及投入产出方法三者有机结合,以不同地区各部门的碳排放扩张系数最小化为目标,构建了ZSG-网络DEA模型。利用该模型,对中国2030年INDC目标在地区与行业层面进行了效率分配,并对2005—2030年的区域碳排放发展路径进行了探索。与以往研究相比,本文从以下几个方面进行了创新。

(1)把区域间投入产出表中的区域间溢出和反馈效应引入网络DEA模型,补充考虑了各地区各部门之间的内在联系。

(2)考虑到未来减排目标的阶段性和长期性,本文针对最新的INDC减排目标,以2030年实现60%~65%的减排目标为约束,同时满足在2020年

实现45%的减排目标。

(3)与传统研究碳排放问题的DEA研究不同,本文模型中考虑到了碳排放空间的有限性,将CO<sub>2</sub>视为一种生产要素,作为投入变量引入模型。

结果显示:

(1)基于环境生产技术效率的碳排放总量目标分配,在各地碳排放占比和各行业碳排放贡献上都存在较大差异。与2005年水平相比,2030年东部沿海地区的碳排放占比降幅最大,为8%。而对于除东部沿海和中部地区外的其他地区,碳排放占比略有上升。在行业碳排放贡献上,采矿业、非金属矿物制品业等高耗能行业面临的碳排放形势更为严峻,其碳强度下降水平远超过INDC 65%的目标。

(2)应该看到,尽管最终可以实现2030年INDC的碳强度减排目标,但各地区为实现该目标的碳排放发展路径各不相同。中部地区、北部沿海以及西北地区的碳排放量呈现出自2010年有较大幅度增长,2020年后保持稳定增长的趋势;而东部沿海地区在2010—2030年间的碳排放增长趋势较为缓慢。这种差异化的碳排放发展路径与地区的低碳发展水平和产业结构存在密切关系。

(3)2030年的总量减排目标对于各地区碳减排的效果各有不同,从地区碳强度方面看,INDC目标对于中国碳强度下降有积极作用,尤其对北部沿海、中部地区。而对于本身碳强度较低的北方直辖市、南部沿海地区,总量控制目标对其碳强度的影响也相对较小。

### 4.2 政策建议

本文提出三点政策建议:

(1)中央政府在未来制定碳排放约束指标分配方案时,要在考虑到各地区、各行业资源禀赋、能源效率、产业结构等方面差异性的同时,也要体现出指标分配的公平性。然而,公平性只是一方面,对于高排放地区来说,如中部地区。虽然其在短时间内可以获得较为明显的减排效果,但长期来看,减排潜力较为稳定。因而,不能片面地实施“多排多减”的公平原则,更应考虑整体约束指标分配的效率性,以实现效率和公平并存。

(2)各地区应意识到自身碳排放发展路径的独

特性,在积极承担国家碳减排约束任务的同时,制定符合地区碳减排现状的经济发展和产业配套政策,以达到既定的碳排放约束目标。

(3)各地区也应加强合作,利用地区间产业联系。除了通过技术进步、产业结构调整等传统方式,还可以利用市场的手段促进节能减排,如:建立区域、全国性碳交易市场。

## 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 强化应对气候变化行动-中国国家自主贡献[EB/OL]. (2015-11-18)[2017-11-01]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/33978/35364/gzc35370/Document/1514539/1514539.htm>. [The State Council Information Office of the People's Republic of China. Strengthening Action to Tackle Climate Change China's National Independent Contribution[EB/OL]. (2015-11-18)[2017-11-01]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/33978/35364/xgzc35370/Document/1514539/1514539.htm>.]
- [2] Hickman R, Banister D. Looking over the horizon: transport and reduced CO<sub>2</sub> emissions in the UK by 2030[J]. *Transport Policy*, 2007, 14(5): 377-387.
- [3] Özer B, Görgün E, İncecik S. The scenario analysis on CO<sub>2</sub> emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006-2030[J]. *Energy*, 2013, 49(1): 395-403.
- [4] Iii W R M, Hasanbeigi A, Sathaye J, et al. Assessment of energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65: 131-141.
- [5] 冯东, 李健. 京津冀区域城市二氧化碳排放效率及减排潜力研究[J]. *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[J]. *Resources Science*, 2017, 39(5): 978-986.]
- [6] Su X, Zhou W, Sun F, et al. Possible pathways for dealing with Japan's post-Fukushima challenge and achieving CO<sub>2</sub> emission reduction targets in 2030[J]. *Energy*, 2014, 66(1): 180-185.
- [7] Chunark P, Promjiraprawat K, Limmeechokchai B. Impacts of CO<sub>2</sub> reduction target and taxation on Thailand's power system planning towards 2030[J]. *Energy Procedia*, 2014, 52: 85-92.
- [8] Luukkanen J, Panula-Ontto J, Vehmas J, et al. Structural change in Chinese economy: impacts on energy use and CO<sub>2</sub> emissions in the period 2013-2030[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2014, 94: 33-42.
- [9] Li F, Dong S, Li Z, et al. The improvement of CO<sub>2</sub> emission reduction policies based on system dynamics method in traditional industrial region with large CO<sub>2</sub> emission[J]. *Energy Policy*, 2012, 51(6): 683-695.
- [10] 崔强, 匡海波, 李焯. 基于协同论和演化的交通运输方式低碳协同研究[J]. *中国管理科学*, 2014, (S1): 852-858. [Cui Q, Kuang H B, Li Y. The low-carbon synergy study based on synergy theory and evolution equation[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, (S1): 852-858.]
- [11] Wang Z X, Zhang J J, Pan L, et al. Estimate of China's energy carbon emissions peak and analysis on electric power carbon emissions[J]. *Advance in Climate Change Research*, 2014, 5(4): 181-188.
- [12] 程路, 邢璐. 2030年碳排放达到峰值对电力发展的要求及影响分析[J]. *中国电力*, 2016, 49(1): 174-177. [Cheng L, Xing L. Analysis of requirement and impact of power development under the peak carbon emission in 2030[J]. *Electric Power*, 2016, 49(1): 174-177.]
- [13] Yuan J, Xu Y, Hu Z, et al. Peak energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China[J]. *Energy Policy*, 2014, 68(2): 508-523.
- [14] 柴麒麟, 徐华清. 基于IAMC模型的中国碳排放峰值目标实现路径研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(6): 37-46. [Bi Q M, Xu H Q. Modeling carbon emission peaking pathways in China based on integrated assessment model IAMC[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(6): 37-46.]
- [15] 毕超. 中国能源CO<sub>2</sub>排放峰值方案及政策建议[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, (5): 20-27. [Bi C. Scheme and policies for peaking energy carbon emissions in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, (5): 20-27.]
- [16] Elzen M D, Fekete H, Höhne N, et al. Greenhouse gas emissions from current and enhanced policies of China until 2030: can emissions peak before 2030?[J]. *Energy Policy*, 2016, 89: 224-236.
- [17] 朱宇恩, 李丽芬, 贺思思, 等. 基于IPAT模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测[J]. *资源科学*, 2016, 38(12): 2316-2325. [Zhu Y E, Li L F, He S S, et al. Peak year prediction of Shanxi Province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis[J]. *Resources Science*, 2016, 38(12): 2316-2325.]
- [18] 苗壮, 周鹏, 李向民. 我国“十二·五”时期省级碳强度约束指标的效率分配-基于ZSG环境生产技术的研究[J]. *经济管理*, 2012, (9): 25-36. [Miao Z, Zhou P, Li X M. China's carbon intensity constraint efficiency allocation research during "12.5" Period[J]. *Economic Management*, 2012, (9): 25-36.]
- [19] Gomes E G, Lins M P E. Modelling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis models[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(5): 616-623.
- [20] Lins M P E, Gomes E G, Soares de Mello J C C B, et al. Olympic ranking based on a zero sum gains DEA model[J].



2017年12月

- European Journal of Operational Research*, 2003, 148(2): 312-322.
- [21] 国家统计局国民经济核算司. 中国地区投入产出表2012 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [Department of National Accounts at National Bureau of Statistics of China. China Regional Input-Output Table 2012[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [23] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel V A R. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[J]. Hayama: IPCC, 2006.
- [24] 李善同. “十二五”时期至2030年我国经济增长前景展望[J]. 经济研究参考, 2010, (43): 2-27. [Li S T. The outlook of China's economic growth from “12.5” Period to 2030[J]. *Review of Economic Research*, 2010, (43): 2-27.]

## The pathway of Chinese regional carbon emission in 2030: a research based on ZSG environmental production technology efficiency

YAO Ye<sup>1 2</sup> XIA Yan<sup>1 2</sup> FAN Ying<sup>3</sup> JIANG Maorong<sup>1 2</sup>

(1. Institutes of Science and Development Chinese Academy of Sciences Beijing 100190 China ;

2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China ;

3. School of Economics and Management Beihang University Beijing 100191 China )

**Abstract** :China has enhanced its actions on climate change ,including the intention to lower 2030 carbon intensity by 60%~65% from 2005 levels. One the one hand ,we should admit that the corresponding technical efficiency is dramatically different when completing the same reduction rate of carbon emissions in different regions given the diversity in regional energy conservation foundation and economic development. On the other hand ,the energy efficiency and energy saving potential is also different across sectoral levels. The CO<sub>2</sub> emission reduction target for different regions will directly affect regional industrial structure adjustment and the strategy of different energy production and consumption. Therefore ,it is worthwhile to build the scientific distribution mechanism for each region and sector under a 2030 emission reduction target. In order to answer the above questions we combined the principle of input-output table with ZSG-DEA modeling to analyze the pathway to Chinese regional emission reduction in 2030. We found that different sectors and regions have their own emission reduction pathways under the 2030 national carbon emissions reduction targets. For northern and eastern coasts and central regions ,the emission reduction targets in 2030 will be stricter than ever. Furthermore ,the reduction target of several energy-intensive sectors ,such as the mining and non-metallic mineral products industries ,will exceed national average standards ,which means these sectors need to make more efforts to shift towards low carbon development. Overall ,the INDC target has a positive effect on the decrease in carbon intensity for each region in China.

**Key words** :emission reduction pathway ;input- output technique ;network- DEA ;efficiency of environmental production technology ;China