

# 中国 2030 年 CO<sub>2</sub> 排放情景预测与减排潜力分析

王迪<sup>1,2</sup>, 和维<sup>1</sup>, 聂锐<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国矿业大学管理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省能源经济与管理研究基地, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 建立了中国 CO<sub>2</sub> 排放情景预测与调控路径优化的集成分析框架, 分情景预测了中国 CO<sub>2</sub> 排放趋势, 测算了各部门的减排潜力并给出了相应的调控路径. 研究表明, 深度能源转型情景下中国 CO<sub>2</sub> 排放将在 2025 年实现达峰目标( $102.54 \times 10^8$  t) 并在 2030 年实现强度减排目标(0.65 t/万元), 同时煤炭消费将在 2020 年达峰( $28.11 \times 10^8$  tce). 未来中国 CO<sub>2</sub> 减排的关键在于挖掘经济增长、能源技术进步与能耗结构优化的减排潜力, 特别是提高第二部门的能源效率, 优化第一部门和第二部门的能耗结构, 以及调整第二部门、第四部门和第六部门的经济发展模式. 此外, 推进能源结构转型和能源技术创新也是实现中国 2030 年 CO<sub>2</sub> 减排双重目标的重要保障.

**关键词:** CO<sub>2</sub> 排放; 减排潜力; 情景预测; 对数平均指数分解模型

中图分类号: F205 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2019)06-0721-15

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.06.001

## China's CO<sub>2</sub> emission scenario prediction and emission reduction potential analysis in 2030

Wang Di<sup>1,2</sup>, He Wei<sup>1</sup>, Nie Rui<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Energy Economy and Management Research Base, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** An integrated analysis framework for China CO<sub>2</sub> emission scenario prediction and regulation path optimization is established, The emission trend of China CO<sub>2</sub> is predicted by scenario, the emission reduction potential of each departments is calculated and the corresponding regulation path is given. It is found that under the deep energy transition scenario, China's CO<sub>2</sub> emissions will peak in 2025 (10.254 billion tons), the intensity reduction target will be realized in 2030(0.65 tons/10<sup>4</sup> yuan), and the coal will peak in 2020(2.811 billion tce). In the future key to China's CO<sub>2</sub> emission reduction is to tap the potential of economic growth, energy technology advancement and energy structure optimization, Especially in the second sector Energy efficiency, optimizing the energy consumption structure of the first and second sectors, and adjusting the economic development model of the second, fourth and sixth sectors. In addition, Promoting the transformation of energy structure and innovation of energy technology is also an important guarantee to achieve China's dual targets of CO<sub>2</sub> emission reduction in 2030.

**Key words:** CO<sub>2</sub> emissions; reduction potential; scenario prediction; LMDI model

收稿日期: 2018-07-03; 修订日期: 2019-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71974191; 71874191); 国家社会科学基金后期资助项目(19FGLB057); 江苏省高校哲学社会科学研究重点资助项目(2017ZDIXM162); 中国矿业大学研究生教改资助项目(YJSJG-2017-048); 中国矿业大学文化传承专项-能源矿业经济智库资助项目(2018WHCC01).

\* 通信作者.

## 1 引言

随着全球经济的快速发展,化石能源消费急剧增长,以 $\text{CO}_2$ 为主体的温室气体排放问题逐渐成为世界各国关注的焦点<sup>[1]</sup>.国际社会先后通过了《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》,旨在通过降低成员国的 $\text{CO}_2$ 排放量来应对全球气候变暖问题.作为世界上最大的能源消费国和最大的 $\text{CO}_2$ 排放国,中国为响应国际 $\text{CO}_2$ 减排号召,在巴黎气候会议上承诺“2030年单位GDP的 $\text{CO}_2$ 排放量比2005年下降60%~65%, $\text{CO}_2$ 排放达到峰值并争取尽早达峰”,低碳发展已成为中国的重要战略要务<sup>[2-3]</sup>.目前中国正处于工业化与城市化快速发展阶段,同时又受到以煤为主的能源禀赋的约束,未来中国在经济高质量发展情景下能否实现又如何实现2030年 $\text{CO}_2$ 排放的双控目标,已成为当前亟待研究的问题.因此,预测中国 $\text{CO}_2$ 排放的演变趋势和特征,识别影响 $\text{CO}_2$ 减排目标的关键因素和重点调控部门,测算相应影响因素及各部门的减排潜力与调控路径,对于实现 $\text{CO}_2$ 减排双重目标具有重要意义.

根据以往文献,许多学者对中国的能源消费及其相关的 $\text{CO}_2$ 排放进行了预测.回归分析法<sup>[4]</sup>、BP神经网络<sup>[5]</sup>、马尔可夫模型<sup>[6]</sup>以及灰色GM(1,1)模型<sup>[7]</sup>等被广泛使用,但这些方法的预测结果多是单一的,且不宜用于中长期预测.科学预测未来 $\text{CO}_2$ 排放的变动趋势,是判断中国 $\text{CO}_2$ 排放2030年能否达峰的根本依据.由于影响 $\text{CO}_2$ 排放的相关因素相对复杂, $\text{CO}_2$ 排放的变动趋势往往受社会、经济和能源等政策因素不确定性的影响,其预测结果是多维导向的.针对这一问题,情景预测方法具有较好的适用性<sup>[8]</sup>.王勇等<sup>[9]</sup>基于中国实现2030年 $\text{CO}_2$ 排放达到峰值的宏观目标为背景,对工业部门的 $\text{CO}_2$ 排放达峰进行了情景预测及减排潜力评估.Elzen等<sup>[10]</sup>认为中国现行的减排政策难以实现2030年的巴黎减排承诺,基准情景下中国2030年 $\text{CO}_2$ 排放总量将达到 $147 \times 10^8 \text{ t} \sim 154 \times 10^8 \text{ t}$ 之间,而政策情景下将减少到 $131 \times 10^8 \text{ t} \sim 137 \times 10^8 \text{ t}$ .总体来看,情景分析方法受到诸多学者的青睐,该方法将定性分析与定量分析相结合,有助于探索不同情景下各因素的变化对未来 $\text{CO}_2$ 排放走势的差异性影响,有助于揭示各影响因素的减排潜力及其减排路径.因此,运用情景分析法,对全国和六个经济部门的 $\text{CO}_2$ 排放进行预测.

对 $\text{CO}_2$ 排放的关键影响因素进行识别,是中国 $\text{CO}_2$ 有效减排的前提,诸多学者对此展开了广泛的研究.田立新等<sup>[11]</sup>认为经济发展因素对碳排放变动的贡献最多,其次是能源结构和能源强度.Chen等<sup>[12]</sup>发现经济增长、能源效率和能源结构对 $\text{CO}_2$ 减排起到主导作用.谢锐等<sup>[13]</sup>认为中国 $\text{CO}_2$ 排放增长的最大驱动因素是经济增长,而抑制因素则是各部门 $\text{CO}_2$ 排放强度的下降.Zhu等<sup>[14]</sup>发现经济产出对 $\text{CO}_2$ 排放的贡献最大,能源强度和能源结构是两个主要的减排因素.总体看来,共识性的观点认为经济增长和人口规模是导致 $\text{CO}_2$ 排放的促增因素,而能源技术进步、能源结构与产业结构优化则是 $\text{CO}_2$ 排放的促减因素.从研究方法上看,这些研究多是基于Kaya方程对 $\text{CO}_2$ 排放的影响因素进行识别.该模型能够综合反映人口、能源、经济及环境等多系统的耦合关系,成为识别 $\text{CO}_2$ 排放影响因素的有效工具<sup>[15]</sup>.许多学者将其与因素分解模型相结合,对 $\text{CO}_2$ 排放的因素进行分解分析<sup>[16-17]</sup>.其中,对数平均指数分解模型(LMDI)在理论基础、适用性与结果解释性方面均比其他分解方法具有更大优势,因此被广泛使用<sup>[18]</sup>.总体来看,现有的研究多是基于 $\text{CO}_2$ 排放及其影响因素的历史数据,测算相关因素在历史时期内的减排贡献,而难以反映未来的减排潜力.基于这一考虑,采用Kaya扩展形式并结合LMDI方法,对2016年~2030年基准情景与目标情景下中国 $\text{CO}_2$ 排放的情景差距进行分解,以求识别和界定 $\text{CO}_2$ 减排的关键影响因素,进而测算相关因素和各部门的减排潜力.

截止目前,很多研究已经对中国 $\text{CO}_2$ 的减排潜力与调控路径进行了分析,并提出了相应的减排战略<sup>[19]</sup>.在国家层面上,Wang等<sup>[20]</sup>等采用Kaya-LMDI方法分三种情景研究中国2020年和2030年的 $\text{CO}_2$ 减排路径.在省级层面上,Jiang等<sup>[21]</sup>综合运用LMDI模型系统评估了中国30个省份的相关驱动因素对 $\text{CO}_2$ 排放增长的贡献,并据此提出了更有针对性的减排策略.在行业层面上,Du等<sup>[22]</sup>运用LMDI模型分析了中国冶金行业1991年~2014年的 $\text{CO}_2$ 排放量变化,计算了未来的减排潜力并提出政策建议.总体来看,这些研究从不同的尺度讨论了二氧化碳排放的减排路径,相关研究多是针对不同国家或省域层面的 $\text{CO}_2$ 减排问题,或是针对某一具体行业的 $\text{CO}_2$ 减排路径问题展开研究,缺乏 $\text{CO}_2$ 减排影响因素的部门异质性分析,导致相

关研究结论和政策建议不具有针对性和可操作性。因此,考察各部门CO<sub>2</sub>排放影响因素的减排贡献的部门异质性,以求发挥各部门合作减排的协同效应,最终实现中国2030年减排目标。

综上所述,中国如何实现2030年CO<sub>2</sub>减排承诺,不仅要考虑中国未来的CO<sub>2</sub>排放发展趋势,还要综合考虑相关因素和相关领域的减排潜力与调控路径的差异性。基于这一考虑,首先采用拓展的Kaya方程对CO<sub>2</sub>排放的影响因素进行识别;其次,基于中国CO<sub>2</sub>排放的演变趋势和相关的减排政策目标,分情景预测中国及各生产部门CO<sub>2</sub>排放的变化趋势;然后,采用LMDI完全分解模型对未来CO<sub>2</sub>排放的情景差异进行分解,测算中国CO<sub>2</sub>排放的关键影响因素和重点调控部门的减排潜力,最终确定各部门的CO<sub>2</sub>减排路径,以期为实现中国2030年CO<sub>2</sub>减排目标提供决策依据。

## 2 方法和数据

首先在对中国及各生产部门CO<sub>2</sub>排放量进行测算的基础上,建立Kaya方程的扩展形式,对中国CO<sub>2</sub>排放的影响因素进行识别,进而根据我国社会经济发展的现行趋势,设定CO<sub>2</sub>排放的基准情景(BS);根据2030年我国社会经济的发展目标和CO<sub>2</sub>强度减排的承诺,界定我国低碳发展的政策情景(PS);同时在PS情景基础上,假设中国完全实现2030年的减排承诺,化石能源消费总量与碳排放总量已同步达峰,能源、经济与环境实现“脱钩”发展,从而设定深度能源转型情景(ETS)。然后分别预测三种情景下中国及各生产部门的一次能源需求以及CO<sub>2</sub>排放量,测算三者之间CO<sub>2</sub>排放的情景差异。进一步以BS和ETS情景下中国CO<sub>2</sub>排放的差额为基准,以ETS情景下的一次能源需求与CO<sub>2</sub>排放量为总量约束,讨论经济增长率调整、能源效率提高与能源结构优化等减排因素对深度能源转型情景实现的贡献,评估各部门、各影响因素对减排目标实现的贡献率,以求为实现2030年CO<sub>2</sub>减排目标与化石能源消耗总量控制目标而提供合理建议。

### 2.1 中国CO<sub>2</sub>排放量测算

根据文献[23],CO<sub>2</sub>人为排放源的全球增长主要是由于化石燃料的燃烧。因此,主要讨论由于化石燃料的燃烧所产生的CO<sub>2</sub>排放,采用IPCC<sup>[24]</sup>提出的CO<sub>2</sub>排放量估算方法,对中国六部门的CO<sub>2</sub>排放量进行测算,即

$$CE_t = \sum_{i=1}^6 CE_{it} = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 CE_{ijt} = \frac{11}{3} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 EC_{ijt} Coe_j, \quad (1)$$

其中*i* = 1, 2, ..., 6分别表示国民经济中6个生产部门(农、林、牧、渔和水利业等;工业;建筑业;运输、仓储、邮政和通讯业;批发、零售、住宿和餐饮服务业;生活消费和其他行业);*j* = 1, 2, 3, 4分别表示煤炭、石油、天然气和非化石能源;CE<sub>*t*</sub>表示*t*时刻的CO<sub>2</sub>排放总量(单位:10<sup>4</sup>t),CE<sub>*it*</sub>表示*t*时刻*i*部门的CO<sub>2</sub>排放,EC<sub>*ijt*</sub>表示表示*t*时刻*i*部门的第*j*类能源的消费量,Co<sub>*e<sub>j</sub>*</sub>表示煤炭,石油,天然气和非化石能源的碳排放系数。其中能源需求预测是CO<sub>2</sub>排放预测模型体系的基础,2016年~2030年中国及6个经济生产部门的能耗消费量根据汪行等<sup>[25]</sup>提出的GM(1,1)灰色预测模型进行预测。

### 2.2 中国CO<sub>2</sub>排放驱动因素分析

根据文献[26],Kaya恒等式作为一种系统的(建立了环境影响与人类驱动因素之间的数学关系)、完整的(捕捉到自然和社会科学的基本规律)和简单的(嵌入人口,富裕和技术等关键人为因素)方法,被公认为是揭示人口,经济,能源和环境之间联系的重要工具。

$$CE_t = P_t \frac{G_t}{P_t} \frac{EC_t}{G_t} \frac{CE_t}{EC_t}, \quad (2)$$

其中*P<sub>t</sub>*, *G<sub>t</sub>*, *EC<sub>t</sub>*分别表示*t*时期的人口总量,国内生产总值和一次能源消费量。

为了综合反映不同部门中国CO<sub>2</sub>排放量的影响因素,结合式(1)对式(2)进行扩展,得到

$$CE_t = \frac{11}{3} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \left( P_t \frac{G_t}{P_t} \frac{G_{it}}{G_t} \frac{EC_{it}}{G_{it}} \frac{EC_{ijt}}{EC_{it}} \frac{CE_{ijt}}{EC_{ijt}} \right) = \frac{11}{3} P_t A_t \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 (Y_{it} I_{it} S_{ijt} Coe_j), \quad (3)$$

其中  $A_t$  表示第  $t$  期的人均 GDP,  $Y_{it}$  和  $I_{it}$  分别表示  $t$  时期第  $i$  部门的产业结构与能源强度,  $S_{ijt}$  表示第  $t$  期第  $i$  部门第  $j$  种能源的消费结构.

从式(3)可知,  $\text{CO}_2$  排放受人口规模, 经济发展, 产业结构, 能源强度, 能耗结构和碳排放系数的影响. 为了实现 2030 年中国  $\text{CO}_2$  排放达峰甚至尽早达峰的目标, 需要充分挖掘各影响因素的减排潜力. 假定人均 GDP 增长率为  $g$ , 人口自然增长率为  $n$ , 能源强度的技术进步率为  $e$ , 产业结构与能耗结构调整的变动比率分别为  $u$  和  $v$ , 由于各种能源的碳排放系数在短期内相对固定, 可以认为  $\text{Coe}_j$  是一个常数, 其减排效果可以忽略不计. 由此, 相邻两期的  $\text{CO}_2$  排放量的关系可表述如下

$$\text{CE}_t = \text{CE}_{t-1} ((1+n)(1+g)(1-e)(1-u)(1-v)). \quad (4)$$

由此可知,

1) 若  $(1+n)(1+g)(1-e)(1-u)(1-v) > 1$ , 人口和 GDP 增长抵消了能源技术进步, 能源结构优化和产业结构调整减排作用,  $\text{CO}_2$  排放在各影响因素综合作用下有所增长.

2) 若  $(1+n)(1+g)(1-e)(1-u)(1-v) = 1$ , 能源技术进步, 能源结构优化和产业结构调整减排作用抵消了人口和 GDP 增长对  $\text{CO}_2$  排放的促进作用, 在这些因素的共同作用下,  $\text{CO}_2$  排放实现了与经济成长的脱钩发展.

3) 若  $(1+n)(1+g)(1-e)(1-u)(1-v) < 1$ , 能源技术进步, 能源结构优化和产业结构调整减排作用大于人口和 GDP 增长对  $\text{CO}_2$  排放的促进作用,  $\text{CO}_2$  排放将在各影响因素综合作用下呈减少趋势.

综上所述, 将根据各影响因素的参数调整, 对中国 2030 年能源消费与  $\text{CO}_2$  排放进行情景预测.

### 2.3 中国 $\text{CO}_2$ 减排潜力分解

根据 LMDI 模型的基本原理<sup>[27]</sup>, 假定指标  $V$  受  $l$  个因素  $V_k, k = 1, 2, \dots, l$  的影响, 且可表示为  $l$  个因素乘积的形式  $V = \prod_{k=1}^l V_k$ , 那么指标  $V$  从基期到考察期  $t$  的变动可表示为

$$\Delta V_t = \prod_{k=1}^l V_{k,t} - \prod_{k=1}^l V_{k,0} = \sum_{k=1}^l \Delta V_{k,t} = \sum_{k=1}^l \left( \frac{V_{k,t} - V_{k,0}}{\ln V_{k,t} / V_{k,0}} \ln V_{k,t} / V_{k,0} \right), \quad (5)$$

其中  $\Delta V_{k,t}$  表示从基期到  $t$  期第  $k$  个因素  $V_k$  对指标  $V$  的影响效应,  $\Delta V_t$  可视为  $l$  个因素共同作用的结果. 为研究不同情景下中国  $\text{CO}_2$  排放的差异, 采用这一方法对其进行分解, 以期考察人口规模, 经济发展, 产业结构, 能源强度, 能耗结构和碳排放系数等 6 个因素的减排潜力.

令  $\Delta \text{CE}_t^{\text{BS}}$  和  $\Delta \text{CE}_t^{\text{TS}}$  分别表示第  $t$  期基准情景与目标情景下的  $\text{CO}_2$  排放量, 则根据式(3)与式(5)可知第  $t$  期  $\text{CO}_2$  排放量的情景差异  $\Delta \text{CE}_t$  为

$$\Delta \text{CE}_t = \text{CE}_t^{\text{BS}} - \text{CE}_t^{\text{TS}} = \sum_{k=1}^6 \text{CE}_{k,t} = \sum_{k=1}^6 \left( \frac{\text{CE}_{k,t}^{\text{BS}} - \text{CE}_{k,t}^{\text{TS}}}{\ln \text{CE}_{k,t}^{\text{BS}} - \ln \text{CE}_{k,t}^{\text{TS}}} \ln V_{k,t}^{\text{BS}} / V_{k,t}^{\text{TS}} \right), \quad (6)$$

其中  $\text{CE}_{k,t}^{\text{BS}}$  与  $\text{CE}_{k,t}^{\text{TS}}$  分别表示基准情景与目标情景下第  $k$  个影响因素第  $t$  期的预测值.

考虑到不同影响因素减排潜力的部门异质性, 根据式(6)对中国  $\text{CO}_2$  排放情景差异的影响因素进行部门分解, 分析 2016 年~2030 年中国 6 个经济部门和 6 个影响因素的减排潜力. 计算过程为

$$\begin{aligned} \Delta \text{CE}_t &= \sum_{k=1}^l \text{CE}_{k,t} = \Delta \text{CE}_t^P + \Delta \text{CE}_t^A + \Delta \text{CE}_t^Y + \Delta \text{CE}_t^I + \Delta \text{CE}_t^S + \Delta \text{CE}_t^{\text{Coe}} \\ &= \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \frac{\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} - \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}}}{\ln (\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} / \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}})} \ln \frac{P_t^{\text{BS}}}{P_t^{\text{TS}}} + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \frac{\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} - \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}}}{\ln (\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} / \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}})} \ln \frac{A_t^{\text{BS}}}{A_t^{\text{TS}}} + \\ &\quad \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \frac{\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} - \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}}}{\ln (\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} / \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}})} \ln \frac{Y_t^{\text{BS}}}{Y_t^{\text{TS}}} + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \frac{\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} - \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}}}{\ln (\text{CE}_{ijt}^{\text{BS}} / \text{CE}_{ijt}^{\text{TS}})} \ln \frac{I_t^{\text{BS}}}{I_t^{\text{TS}}} + \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \frac{CE_{ijt}^{BS} - CE_{ijt}^{TS}}{\ln(CE_{ijt}^{BS}/CE_{ijt}^{TS})} \ln \frac{S_t^{BS}}{S_t^{TS}} + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 \frac{CE_{ijt}^{BS} - CE_{ijt}^{TS}}{\ln(CE_{ijt}^{BS}/CE_{ijt}^{TS})} \ln \frac{Coe_t^{BS}}{Coe_t^{TS}}, \quad (7)$$

其中  $CE_{ijt}^{BS}$  和  $CE_{ijt}^{TS}$  分别代表在基准情景与目标情景下  $t$  时刻第  $i$  部门  $j$  种能源消费导致的 CO<sub>2</sub> 排放量,  $\Delta CE_t^P, \Delta CE_t^A, \Delta CE_t^Y, \Delta CE_t^I, \Delta CE_t^S$  与  $\Delta CE_t^{Coe}$  分别表示人口规模, 经济发展, 产业结构, 能源强度, 能源结构和碳排放系数的 CO<sub>2</sub> 减排潜力. 因假定碳排放系数  $Coe_j$  为常数, 故  $\Delta CE_t^{Coe} \approx 0$ .

### 2.4 减排潜力优化

根据 CO<sub>2</sub> 排放情景预测与减排潜力的测算模型, 可以得到中国 CO<sub>2</sub> 减排潜力初始分解方案. 借鉴文献[28], 利用 DEA-BCC 模型对 2016 年~2030 年中国 CO<sub>2</sub> 减排潜力初始分解方案进行效率评估和优化, 得到各年份中国 CO<sub>2</sub> 的最优减排量. 该模型有 15 个相同类型的决策单元(记为 DMU, 即 15 个年份), 以 CO<sub>2</sub> 减排量作为模型唯一的投入变量, 能源耗费和 GDP 指标作为模型的产出变量, 构建中国 CO<sub>2</sub> 减排效率评价的 DEA-BCC 模型

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} (\theta_0 - \varepsilon (s^- + s_q^+)), \quad q = 1, 2 \\ \text{s.t.} \\ \sum_{p=1}^{15} \lambda_p y_{pq} - s_q^+ = y_{0q}, \quad q = 1, 2 \\ \sum_{p=1}^{15} \lambda_p = 1 \\ \sum_{p=1}^{15} \lambda_p x_{pr} + s^- = \theta_0 x_{0r}, \quad r = 1 \\ \lambda_p > 0, \quad s^- \geq 0, \quad s_q^+ \geq 0, \quad q = 1, 2, \end{array} \right. \quad (8)$$

其中  $\theta_0$  为目标年份的相对效率,  $\lambda_p$  为相对于目标年份构造的 DMU 有效组合中各年份组合比例,  $y_{pq}$  为不同年份产出变量,  $p$  为决策单元,  $q$  为产出变量的类型,  $r$  为投入变量类型,  $y_{0q}$  为目标年份产出值,  $x_{0r}$  和  $x_{pr}$  分别代表初始减排量和第  $p$  年的减排量,  $s^-$  和  $s_q^+$  为松弛变量,  $q = 1, 2$ .

当  $\theta_0 < 1$ , DMU 为非 DEA 有效; 若  $\theta_0 = 1, s^- + s_q^+ \neq 0$ , 则 DMU 为弱有效; 若  $\theta_0 = 1, s^- + s_q^+ = 0$ , 则 DMU 为强有效, 当决策单元为非 DEA 有效时, 可以从投入或产出的角度进行改进, 使非 DEA 有效的决策单元投影到有效前沿面上, 从而得到最佳的减排量

$$X' = \theta_0 x_{0r} - s^-, \quad Y' = y_{0q} + s_q^+, \quad q = 1, 2. \quad (9)$$

### 2.5 中国 CO<sub>2</sub> 数据来源与处理

人口总量, GDP 和能源消费等相关指标的数据均来自《中国统计年鉴(2001~2016)》, 其中 GDP 数据按 2015 年不变价格折算成实际 GDP. 各部门能源强度、产业结构均通过间接测算得到. 关于 CO<sub>2</sub> 排放系数, 根据文献[24, 29]提出的方法估算, 将每种化石燃料消耗量与其 CO<sub>2</sub> 排放系数和氧化率相乘, 相关数据整理如表 1 所示.

表 1 化石燃料的标准煤折算系数和 CO<sub>2</sub> 排放系数  
Table 1 Standard coal conversion coefficient and CO<sub>2</sub> emission coefficient of fossil fuel

化石燃料	平均低热值	标准煤系数	碳含量	碳氧化率	碳排放系数
煤炭	20 908 kJ/kg	0.714 3 kgce/kg	26.37 t · CO <sub>2</sub> /TJ	0.94	1.900 3 kg · CO <sub>2</sub> /kg
石油	41 816 kJ/kg	1.428 6 kgce/kg	20.10 t · CO <sub>2</sub> /TJ	0.98	3.020 2 kg · CO <sub>2</sub> /kg
天然气	38 931 kJ/m <sup>3</sup>	1.330 0 kgce/m <sup>3</sup>	15.30 t · CO <sub>2</sub> /TJ	0.99	2.162 2 kg · CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

事实上, 许多学者没有考虑中国化石燃料的热值和氧化率, 高估了中国的 CO<sub>2</sub> 排放量, 本文考虑这两个因素并参考 Wang 等<sup>[30]</sup>提出的方法对 CO<sub>2</sub> 排放系数进行修正. 由于非化石碳排放系数  $Coe^4 = 0$ , 因此只讨

论煤炭、石油和天然气三种化石能源.

### 3 中国 CO<sub>2</sub> 排放情景预测

#### 3.1 情景设计

考虑中国能源需求和 CO<sub>2</sub> 排放的现状以及未来能源需求和环境政策, 本文基于当前中国社会、经济、资源与环境的现状与历史发展趋势, 构建了中国 CO<sub>2</sub> 排放的基准情景(BS); 考虑到 2030 年中国 CO<sub>2</sub> 减排承诺与相关政策规划, 设定政策情景(PS); 在政策情景的基础上本文考虑到能源结构优化对碳生产力的影响<sup>[31]</sup>, 本文设想中国大力发展非化石能源产业, 强化能源结构转型, CO<sub>2</sub> 排放与经济增长实现“脱钩”发展, 设定了 2030 年 CO<sub>2</sub> 减排双重目标完全实现的深度能源转型情景(ETS). 情景描述如下表 2.

表 2 中国 CO<sub>2</sub> 排放情景及其参数设置  
Table 2 China's CO<sub>2</sub> emission scenarios and parameter settings

项目	BS 情景	PS 情景	ETS 情景
人口总量	中国人口的自然增长率在“十二五”期间是 5%, “十三五”时是 4.5%, 根据这种演变趋势, 假设以后每五年降低 0.5%, 总人口和各部门人口均按此设定.	根据《国家人口发展规划(2016~2030年)》, 2020 年总人口达到 14.2 亿人左右, 2030 年达到 14.5 亿人左右, 各部门人口根据总人口增长速率测算.	同 PS 情景
经济增长	中国经济发展进入中速增长时期 <sup>[32]</sup> , “十二五”期间为 7.0, “十三五”GDP 增长率为 6.5, 之后每五年降低 0.5%, 各部门经济增长与 GDP 增速相同.	考虑到减排约束, GDP 增长率假设低于 BS 情景, 设定“十三五”GDP 增长率为 6, 之后每五年降低 0.5%, 各部门经济增长与 GDP 增速相同.	同 PS 情景
产业结构	将传统的三大产业分为六个部门, 根据当前的产业结构趋势, 按照 2001 年~2015 年数据进行计算, 工业将处于主导地位.	根据工业化国家的经验, 当人均 GDP 达到 10 000 USD 时, 第一产业将保持在 5 左右, 第二产业约 40, 第三产业约 55, 预计 2020 年~2030 年中国将进入工业化后期 <sup>[33]</sup> , 第三产业将成为主导产业.	同 PS 情景
能源结构	不考虑能源消费结构的优化, 煤炭仍然是总量的主体, 总体及各部门能耗结构均根据历史规律, 借助成分数据模型, GM(1,1)模型进行预测.	根据《能源生产和消费革命战略(2016~2030)》, 2020 年煤炭消费结构 58%, 天然气 10%, 石油 17%, 非化石能源 15; 2030 年煤炭消费 48%, 天然气 15%, 非化石能源 20, 剩下为石油占比, 各部门能源结构根据不同能源的总体需求增长率及经济增长测算.	强化能源转型, 全面实施煤炭消费减量替代方案. 假定 2030 年中国化石能源消费总量与 CO <sub>2</sub> 排放总量已同步达峰, 煤炭消费结构 40%(预估 2025 年煤炭达峰), 石油占比 20%, 天然气占比 18%, 非化石能源占比 22%.
能源强度	按 2001 年~2015 年的趋势推动, 能源强度平均年均增长率为 -2.016, 按此增长率测算.	2020 年能源强度比 2015 年下降 15%, 2030 年达到 2015 年世界平均水平, 各部门的能源强度按照预测的能源结构和经济调整进行测算.	能源强度得到进一步降低, 2025 年中国能源强度达到 2015 年世界平均水平, 2030 年达到 2010 年 OECD 国家平均水平.

能源转型主要涉及能源结构转型与能源效率的提升. 对能源结构的预测, 本文主要考虑其内在驱动因素和历史变化规律, 根据文献<sup>[30,34]</sup>, 集成运用成分数据预测方法与 GM(1,1) 模型预测 2016 年~2030 年中国及其国民经济六部门的能源结构.

#### 3.2 情景预测

根据情景分析的基本原理, 本文以 2015 年为基期, 分别对 2016 年~2030 年中国 CO<sub>2</sub> 排放的基准情景、政策情景和深度能源转型情景进行预测, 结果如表 3 所示.

##### 3.2.1 中国 CO<sub>2</sub> 排放情景预测与比较

由表 3 预测结果可知, 中国 CO<sub>2</sub> 排放存在显著的情景差异. 基准情景下, 人口和 GDP 的快速增长抵消了能源技术进步、能源结构优化和产业结构调整减排作用, 中国能源消费总量持续增长, 2030 年达到  $75.88 \times 10^8$  tce. 相关的 CO<sub>2</sub> 排放以年均 4.36% 的速度由 2015 年的  $90.07 \times 10^8$  t 增长到 2030 年

的  $148.98 \times 10^8$  t, 相应的 CO<sub>2</sub> 排放强度也由 1.31 t / 万元下降到 0.90 t / 万元, 较之于 2005 年下降 57.56 %, 既未实现 CO<sub>2</sub> 排放达峰目标, 也未能实现强度减排目标。

表 3 中国 CO<sub>2</sub> 排放情景预测  
Table 3 Scenario prediction of China's CO<sub>2</sub> emission

情景	时间	人口总量 (亿人)	GDP (万亿元)	能耗总量 (10 <sup>8</sup> tce)	能源强度 (tce / 万元)	煤炭消费 (10 <sup>8</sup> tce)	CO <sub>2</sub> 排放量 (10 <sup>8</sup> t)	CO <sub>2</sub> 强度 (t / 万元)
BS 情景	2015	13.75	68.91	42.99	0.62	27.38	90.07	1.31
	2020	14.06	96.64	54.46	0.56	35.04	113.24	1.17
	2025	14.34	129.33	65.82	0.51	40.63	133.11	1.03
	2030	14.59	165.06	75.88	0.46	44.76	148.98	0.90
PS 情景	2015	13.75	68.91	42.99	0.62	27.38	90.07	1.31
	2020	14.20	94.41	50.07	0.53	29.04	99.64	1.06
	2025	14.35	123.39	57.07	0.46	30.32	108.86	0.88
	2030	14.50	153.76	62.03	0.40	29.78	112.86	0.73
ETS 情景	2015	13.75	68.91	42.99	0.62	27.38	90.07	1.31
	2020	14.20	94.41	49.84	0.53	28.11	98.90	1.05
	2025	14.35	123.39	55.11	0.45	26.66	102.54	0.83
	2030	14.50	153.76	58.11	0.38	23.24	100.59	0.65

相比之下, 政策情景下中国 CO<sub>2</sub> 排放虽未实现与经济增长的脱钩发展, 但 CO<sub>2</sub> 排放总量及其增长趋势明显减缓, 由 2015 年的  $90.07 \times 10^8$  t 增长到 2030 年的  $112.86 \times 10^8$  t, CO<sub>2</sub> 排放强度也由 2015 年的 1.31 t / 万元下降到 2030 年的 0.73 t / 万元, 较之于 2005 年下降 65.48 %, 实现了强度减排目标, 但尚未实现达峰目标. 进一步的测算表明, 当且仅当 2030 年中国 CO<sub>2</sub> 排放强度相比 2005 年下降 70.44 % 以上, 此时中国才有可能在 2030 年甚至更早实现 CO<sub>2</sub> 排放总量达峰的目标. 究其根源, 主要在于各自政策子系统相互割裂, 未能充分实现减排政策目标协调. 例如, 根据《中国国民经济和社会发展“十三五”规划》中经济中高速发展的要求, 本文预测政策情景下 GDP 将持续增长到 2030 年的  $153.76 \times 10^{12}$  t, 而根据《能源生产和消费革命战略(2016~2030)》中 CO<sub>2</sub> 排放强度减排 60 % ~ 65 % 的目标, 2030 年中国 CO<sub>2</sub> 排放将持续增长到  $112.86 \times 10^8$  t, 但尚未实现预期的达峰目标. 由此可见, 经济系统与能源系统的政策目标不协调, 因此应构建相互兼容的减排政策网络, 从全局视角注重各政策子系统的叠加效应。

深度能源转型情景下, CO<sub>2</sub> 排放与经济增长实现了脱钩发展, 中国完全实现 2030 年 CO<sub>2</sub> 减排双重目标. 如图 1 所示, CO<sub>2</sub> 排放提前至 2025 年实现达峰目标( $102.54 \times 10^8$  t), 而后逐渐减少到 2030 年的  $100.59 \times 10^8$  t.

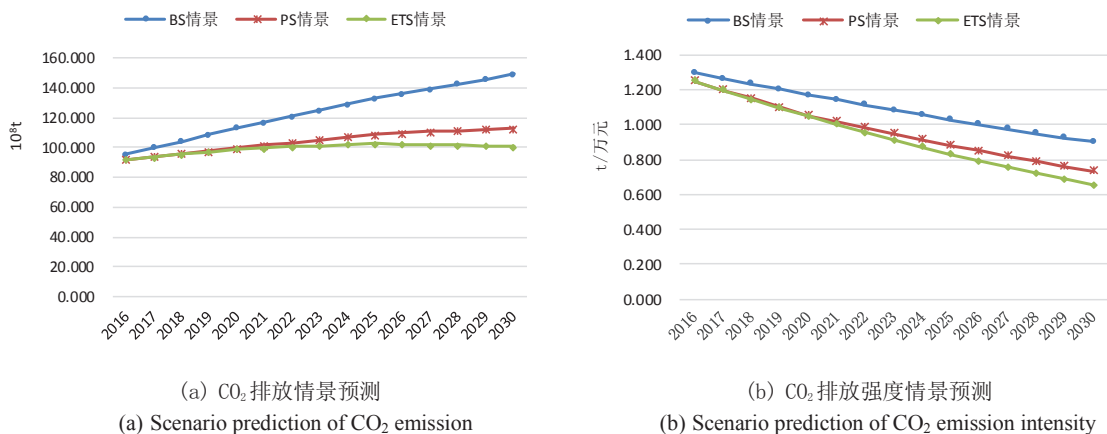


图 1 中国 CO<sub>2</sub> 排放情景预测与比较

Fig. 1 Scenario prediction and comparison of China's CO<sub>2</sub> emission

相较于基准情景与政策情景, 能源转型情景下中国 2030 年 CO<sub>2</sub> 排放量分别减少  $48.39 \times 10^8$  t 和  $12.27 \times$

10<sup>8</sup> t; 相应的 CO<sub>2</sub> 排放强度由 2015 年的 1.31 t / 万元下降到 2030 年的 0.65 t / 万元, 较之于 2005 年下降 69.24%。从目标达成度来看, 主要得益于能源转型导致的能源结构优化和效率提升。根据能源转型情景预测结果可知, 尽管能源消费量逐年增长, 但由于能源结构转型的强化推进, 煤炭消费量在 2020 年达峰(28.11 × 10<sup>8</sup> tce), 煤炭消费结构在 2030 年降低至 40% 左右。

### 3.2.2 中国 CO<sub>2</sub> 排放分部门比较

基准情景下, 工业部门是造成中国 CO<sub>2</sub> 排放逐年增长的关键, 如表 4 所示。2030 年工业 CO<sub>2</sub> 排放量达到 123.37 × 10<sup>8</sup> t, 占同期全国 CO<sub>2</sub> 排放总量的 82.81%。交通运输、仓储邮政、批发零售、住宿餐饮业以及其它等第三产业 CO<sub>2</sub> 排放总量相对较小, 2016 年~2030 年均 CO<sub>2</sub> 排放贡献结构约为 14.82%。

表 4 中国六部门 CO<sub>2</sub> 排放情景预测与比较  
Table 4 Scenario prediction and comparison of CO<sub>2</sub> emissions in the 6 sectors

年份	第一部门(10 <sup>8</sup> t)			第二部门(10 <sup>8</sup> t)			第三部门(10 <sup>8</sup> t)			第四部门(10 <sup>8</sup> t)			第五部门(10 <sup>8</sup> t)			第六部门(10 <sup>8</sup> t)		
	BS	PS	ETS	BS	PS	ETS	BS	PS	ETS	BS	PS	ETS	BS	PS	ETS	BS	PS	ETS
2016	1.00	1.01	1.02	79.61	75.19	74.81	1.18	1.26	1.28	6.55	7.09	7.24	1.03	1.00	1.00	6.34	6.45	6.49
2017	1.04	1.02	1.05	83.02	76.61	75.85	1.22	1.28	1.34	6.82	7.29	7.60	1.08	1.03	1.02	6.65	6.68	6.76
2018	1.08	1.04	1.07	86.58	78.01	76.86	1.27	1.30	1.39	7.10	7.49	7.98	1.13	1.06	1.05	6.97	6.93	7.04
2019	1.12	1.05	1.00	90.27	79.39	77.83	1.31	1.32	1.44	7.40	7.70	8.36	1.19	1.10	1.08	7.31	7.19	7.34
2020	1.16	1.06	1.13	94.12	80.73	78.77	1.36	1.34	1.49	7.70	7.91	8.75	1.24	1.13	1.11	7.66	7.47	7.64
2021	1.19	1.09	1.14	97.20	82.34	78.92	1.39	1.38	1.53	7.95	8.22	9.07	1.29	1.17	1.13	7.96	7.74	7.89
2022	1.22	1.12	1.16	100.37	83.96	79.03	1.43	1.42	1.57	8.20	8.54	9.39	1.34	1.20	1.16	8.28	8.03	8.14
2023	1.26	1.14	1.17	103.64	85.60	79.10	1.46	1.46	1.61	8.46	8.87	9.72	1.39	1.24	1.18	8.60	8.33	8.40
2024	1.29	1.17	1.19	107.00	87.24	79.12	1.50	1.51	1.64	8.73	9.20	10.05	1.44	1.27	1.20	8.94	8.64	8.68
2025	1.32	1.20	1.20	110.46	88.89	79.11	1.54	1.55	1.68	9.01	9.55	10.38	1.50	1.31	1.23	9.29	8.96	8.96
2026	1.35	1.22	1.20	112.95	90.12	78.30	1.56	1.59	1.69	9.20	9.86	10.61	1.54	1.35	1.24	9.56	9.25	9.16
2027	1.37	1.24	1.20	115.48	91.35	77.47	1.59	1.63	1.71	9.41	10.18	10.83	1.58	1.38	1.25	9.84	9.55	9.37
2028	1.39	1.26	1.19	118.06	92.57	76.62	1.61	1.67	1.72	9.62	10.50	11.05	1.63	1.41	1.27	10.13	9.85	9.58
2029	1.42	1.29	1.19	120.69	93.78	75.75	1.63	1.71	1.73	9.83	10.84	11.27	1.67	1.45	1.28	10.43	10.17	9.80
2030	1.44	1.31	1.18	123.37	94.99	74.87	1.66	1.75	1.74	10.05	11.17	11.48	1.72	1.49	1.30	10.74	10.50	10.02

政策情景下, 中国 CO<sub>2</sub> 排放总量及其增长趋势明显减缓。工业部门依然占主导地位, 年均 CO<sub>2</sub> 排放的贡献结构约为 80.10%。但从其变动趋势上来看, CO<sub>2</sub> 排放量虽然不断增加但其增速将趋于平缓, 交通运输、仓储邮政、批发零售、住宿餐饮业以及其它等第三产业 CO<sub>2</sub> 排放总量逐渐升高, 2016 年~2030 年年均 CO<sub>2</sub> 排放贡献结构约为 17.43%。其中第四部门 CO<sub>2</sub> 排放强度情景差异很大, 相对于基准情景, CO<sub>2</sub> 排放强度由 2.18 t / 万元逐渐下降到 1.64 t / 万元, 相对降低 24.79%。

深度能源转型情景下, 中国 CO<sub>2</sub> 排放总量及其增长趋势明显低于基准情景和政策情景。工业部门 CO<sub>2</sub> 排放的贡献结构约为 78.03%, 但从其变动趋势上来看, CO<sub>2</sub> 排放量在 2024 年达到峰值(79.12 × 10<sup>8</sup> t); 相对于基准情景与政策情景, CO<sub>2</sub> 排放强度进一步减小, 2030 年下降到 1.42 t / 万元, 相对减少 34.86% 和 21.18%。交通运输、仓储邮政、批发零售、住宿餐饮业以及其它等第三产业 CO<sub>2</sub> 排放总量逐渐升高, 2016 年~2030 年年均 CO<sub>2</sub> 排放贡献结构约为 19.24%。

从政策情景与深度能源转型情景下各部门 CO<sub>2</sub> 排强度来看(表 5), 第一部门、第二部门和第五部门的 CO<sub>2</sub> 排放强度比基准情景明显下降, 尤其是第二部门(工业部门), 深度能源转型情景下 CO<sub>2</sub> 排放强度低至 1.42 t / 万元, 是促进节能减排的主导部门; 第三部门和第六部门的 CO<sub>2</sub> 排放强度虽然比基准情景相对较大, 但差异不明显; 批发、零售、住宿和餐饮等行业快速发展, 相应的能源消费和 CO<sub>2</sub> 排放强度高于基准情景。就 CO<sub>2</sub> 排放强度的变动趋势来看, 三种情景下工业部门 CO<sub>2</sub> 排放强度均不断下降, 但深度能源转型情景下 CO<sub>2</sub> 排放强度下降最快, 对全国 CO<sub>2</sub> 减排目标的实现更有利, 而第三产业的 CO<sub>2</sub> 排放贡献结构趋于增加。由此可见, 深度能源转型情景下中国将进入工业化的后期阶段, 第四部门、第五部门和第六部门等低污染的行业将得以发展。



表 5 中国六部门 CO<sub>2</sub> 排放强度情景预测与比较  
Table 5 Scenario prediction and comparison of CO<sub>2</sub> emissions intensity in the 6 sectors

情景	时间	第一部门 (t/万元)	第二部门 (t/万元)	第三部门 (t/万元)	第四部门 (t/万元)	第五部门 (t/万元)	第六部门 (t/万元)
BS 情景	2016	0.15	3.15	0.24	2.01	0.12	0.25
	2020	0.13	2.84	0.21	1.80	0.11	0.23
	2025	0.11	2.49	0.18	1.57	0.10	0.21
	2030	0.10	2.18	0.15	1.38	0.09	0.19
PS 情景	2016	0.15	2.99	0.25	2.18	0.12	0.26
	2020	0.12	2.49	0.21	1.89	0.11	0.23
	2025	0.11	2.10	0.19	1.75	0.09	0.21
	2030	0.09	1.80	0.17	1.64	0.09	0.20
ETS 情景	2016	0.15	2.97	0.26	2.23	0.12	0.26
	2020	0.13	2.43	0.23	2.10	0.10	0.24
	2025	0.11	1.87	0.20	1.90	0.09	0.21
	2030	0.08	1.42	0.17	1.69	0.07	0.19

### 3.2.3 中国 CO<sub>2</sub> 排放影响因素分析

比较可知, 三种情景下中国 CO<sub>2</sub> 排放总量都呈逐年上升趋势, 但政策情景和深度能源转型情景下 CO<sub>2</sub> 排放总量相对较小, 2030 年较之于基准情景分别减少 CO<sub>2</sub> 排放量  $36.12 \times 10^8$  t 和  $49.39 \times 10^8$  t. 究其根源, 主要在于政策情景和深度能源转型情景下 CO<sub>2</sub> 排放强度下降趋势更快, 而其更深层次的原因在于社会、经济、技术与资源等方面的情景差异.

针对社会人口因素来看, 三种情景下中国人口总量均有不同程度的增长. 十三五期间, ETS/PS 情景下人口增长速度明显快于基准情景, 2020 年达到 14.20 亿人, 相对于基准情景增加  $0.14 \times 10^8$  人, 主要归因于允许生二胎政策的全面放开. 此后, 政策情景/深度能源转型情景下人口增长速度低于基准情景增速, 2030 年分别达到 14.50 亿人和 14.59 亿人.

从经济发展因素来看, 经济增长与经济结构是影响 CO<sub>2</sub> 排放的主要因素. 基准情景下中国经济增长保持中高速增长趋势, 2030 年 GDP 总量 165.06 万亿元, 相应的人均 GDP 为 11.31 万元. 相比之下, 政策情景和深度能源转型情景下经济增长相对缓慢, 但产业结构将得到优化, 2030 年第三产业经济结构约占 55%, 人均 GDP 为 10.60 万元, GDP 总量达到 153.76 万亿元, 较之于 2015 年经济水平实现了翻一番的目标, 但相对于基准情景减少 11.30 万亿元. 由此可见, CO<sub>2</sub> 减排目标的实现一定程度上是以牺牲经济增长速度为代价的, 其潜在经济损失累积高达 72.76 万亿元.

就资源利用因素来看(表 6), 基准情景下 2030 年中国能耗总量达到  $75.88 \times 10^8$  t 标准煤, 其中煤炭占比 59.00%、石油占比 13.41%、天然气占比 11.56% 和非化石能源 16.04%, 未达到能耗结构优化的预期目标. 相比之下, 政策情景下中国能源消费总量显著降低, 2030 年能耗总量达到  $62.03 \times 10^8$  tce, 能耗结构达到政策预期要求, 2030 年煤炭消费结构达到 48.0%、石油消费结构 17.0%、天然气 15% 和非化石能源 20%. 深度能源转型情景是以实现 2030 年 CO<sub>2</sub> 减排双重目标为导向的情景, 尽管考察期内能耗总量尚未达峰, 但高碳此时作为单位能源 CO<sub>2</sub> 排放强度最高的煤炭消耗已经达峰, 2030 年煤炭占能源需求总量的比重降低至 40%, 天然气和非化石能源总和首次达到 40%.

从总体看, 三种情景下中国能源强度都显著降低. 基准情景下能源技术进步率按 2001 年~2015 年的趋势推动, 年均增长率为 -2.016%, 预计 2030 年能源强度为 0.46 tce/万元. 在政策情景下, 2020 年能源强度比 2015 年下降 15%, 2030 年达到世界平均水平 0.40 tce/万元. 深度能源转型情景下, 2025 年中国能源强度达到 2015 年世界平均水平, 2030 年达到 2010 年 OECD 国家平均水平 0.38 tce/万元. 分部门来看, 第一部门、第五部门和第六部门部门能源强度的情景差距不大, 第三部门和第四部门基准情景下的能源强度略高于其他情景, 但均呈下降趋势; 第二部门能源强度存在较大的情景差异, 深度能源转型情景下 2030 年能源

强度为 0.95 tce/万元,明显低于其他两个情景.

表6 中国能源消费总量与能耗结构情景比较  
Table 6 Comparison of China's total energy consumption and energy consumption structure

年份	基准情景					政策情景					深度能源转型情景				
	总量 (10 <sup>8</sup> tce)	煤炭 (%)	石油 (%)	天然气 (%)	其他 (%)	总量 (10 <sup>8</sup> tce)	煤炭 (%)	石油 (%)	天然气 (%)	其他 (%)	总量 (10 <sup>8</sup> tce)	煤炭 (%)	石油 (%)	天然气 (%)	其他 (%)
2015	42.99	63.70	18.30	5.90	12.10	42.99	63.70	18.30	5.90	12.10	42.99	63.70	18.30	5.90	12.10
2020	54.46	64.35	15.49	7.65	12.52	50.07	58.00	17.00	10.00	15.00	49.84	56.40	19.49	8.85	15.27
2021	56.56	63.83	15.29	8.03	12.85	51.39	57.05	17.04	10.44	15.47	50.85	54.84	19.66	9.56	15.94
2022	58.75	63.31	15.08	8.41	13.20	52.76	56.08	17.07	10.89	15.96	51.88	53.26	19.81	10.31	16.61
2023	61.02	62.79	14.86	8.80	13.55	54.16	55.11	17.09	11.36	16.44	52.94	51.65	19.94	11.11	17.30
2024	63.38	62.26	14.65	9.19	13.90	55.60	54.12	17.11	11.84	16.94	54.01	50.02	20.04	11.96	17.98
2025	65.82	61.72	14.45	9.58	14.25	57.07	53.12	17.11	12.33	17.44	55.11	48.37	20.11	12.85	18.67
2026	67.72	61.19	14.24	9.97	14.60	58.03	52.11	17.11	12.84	17.94	55.70	46.71	20.15	13.79	19.35
2027	69.67	60.65	14.03	10.37	14.96	59.01	51.09	17.10	13.36	18.45	56.29	45.04	20.16	14.77	20.03
2028	71.68	60.10	13.82	10.76	15.32	60.00	50.07	17.07	13.89	18.96	56.89	43.36	20.14	15.80	20.7
2029	73.75	59.55	13.61	11.16	15.68	61.01	49.04	17.04	14.44	19.48	57.49	41.68	20.08	16.88	21.36
2030	75.88	59.00	13.41	11.56	16.04	62.03	48.00	17.00	15.00	20.00	58.11	40.00	20.00	18.00	22.00

## 4 中国 CO<sub>2</sub> 减排潜力分析与比较

### 4.1 中国 CO<sub>2</sub> 排放影响因素的减排潜力

本文以实现 2030 年中国 CO<sub>2</sub> 减排双重目标的ETS情景为目标情景,根据模型(6)和模型(7)对该情景下 CO<sub>2</sub> 排放量与基准情景的差额进行分解,进而评估 2016 年~2030 年各影响因素的 CO<sub>2</sub> 减排潜力.分解结果如表 7 所示.

表7 中国 CO<sub>2</sub> 减排潜力的LMDI分解结果  
Table 7 LMDI decomposition results of China's CO<sub>2</sub> emission reduction potential

年份	经济增长	人口总量	能源结构	能源效率	产业结构	累积减排
2016	0.63	-0.19	2.45	1.47	0.09	4.45
2017	1.29	-0.39	3.00	2.84	0.17	6.92
2018	2.00	-0.60	3.60	4.29	0.26	9.56
2019	2.75	-0.82	4.28	5.83	0.35	12.38
2020	3.54	-1.06	5.03	7.45	0.45	15.40
2021	3.91	-0.88	5.80	9.08	0.54	18.45
2022	4.30	-0.69	6.65	10.76	0.62	21.65
2023	4.70	-0.49	7.56	12.51	0.71	25.00
2024	5.12	-0.28	8.55	14.32	0.79	28.50
2025	5.55	-0.06	9.61	16.18	0.87	32.15
2026	5.99	0.10	10.65	17.93	0.94	35.63
2027	6.45	0.27	11.75	19.71	1.01	39.18
2028	6.91	0.44	12.90	21.51	1.07	42.82
2029	7.37	0.61	14.10	23.33	1.12	46.54
2030	7.85	0.79	15.35	25.17	1.17	50.33
2016~2030	68.35	-3.22	121.28	192.39	10.17	388.96

注:表中数据为各影响因素减排潜力分解值(单位:10<sup>8</sup> t),“-”表示对 CO<sub>2</sub> 排放有促增作用,“+”表示对 CO<sub>2</sub> 排放有促减作用.

总体来看,除人口因素外,各因素对 CO<sub>2</sub> 减排贡献值逐年递增.2030 年能源效率、能源结构优化和经济增速调整三者减排量较大,分别为 25.17 × 10<sup>8</sup> t, 15.35 × 10<sup>8</sup> t 和 7.85 × 10<sup>8</sup> t,减排量不断增加,2016 年~2030 年累积减排贡献率达到 49.46%, 31.18% 和 17.57%,而增速却不断趋于平缓,从 2026 年开始三者贡献率趋于稳定,但由于其自身基数比较大,仍是我国 CO<sub>2</sub> 减排的主要因素.产业结构对 CO<sub>2</sub> 减排

的贡献率相对较小, 累积贡献率约为 42.32%, 2028 年左右减排贡献率趋于稳定. 人口对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献是先抑制后促进, 主要是因为 2015 年全面实施二孩政策的影响, 人口自然增长率达到 46.52% 的突破性增长, 2025 年开始人口总量趋于稳定, 对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献从负值转化为正值并逐年升高, 但由于自身贡献占比不高, 对 CO<sub>2</sub> 的减排作用不显著.

#### 4.2 中国 CO<sub>2</sub> 排放分部门减排潜力分析

本文以深度能源转型情景(完全实现 2030 年减排承诺)和基准情景下中国国民经济 6 个部门 CO<sub>2</sub> 排放的情景差异为对象, 进一步采用 LMDI 模型对其进行分解, 考察 6 个部门的 CO<sub>2</sub> 减排潜力及其影响因素, 测算结果如表 8 所示.

表 8 中国 CO<sub>2</sub> 排放分部门减排潜力测算结果  
Table 8 Sub-sector energy reduction potential measurement results of China's CO<sub>2</sub> emissions

年份	第一部门		第二部门		第三部门		第四部门		第五部门		第六部门	
	绝对量	相对量	绝对量	相对量	绝对量	相对量	绝对量	相对量	绝对量	相对量	绝对量	相对量
	(10 <sup>8</sup> t)	(%)	(10 <sup>8</sup> t)	(%)	(10 <sup>8</sup> t)	(%)	(10 <sup>8</sup> t)	(%)	(10 <sup>8</sup> t)	(%)	(10 <sup>8</sup> t)	(%)
2016	0.53	11.95	4.93	110.77	-0.10	-2.31	-0.74	-16.62	0.03	0.60	-0.20	-4.39
2017	0.61	8.79	7.46	107.83	-0.11	-1.58	-0.88	-12.69	0.04	0.59	-0.20	-2.95
2018	0.69	7.21	10.16	106.30	-0.11	-1.20	-1.02	-10.68	0.06	0.59	-0.21	-2.22
2019	0.77	6.25	13.05	105.37	-0.12	-0.97	-1.17	-9.45	0.07	0.59	-0.22	-1.79
2020	0.87	5.62	16.12	104.69	-0.12	-0.80	-1.32	-8.58	0.09	0.58	-0.23	-1.51
2021	0.95	5.16	19.22	104.14	-0.12	-0.67	-1.46	-7.92	0.11	0.58	-0.24	-1.29
2022	1.04	4.82	22.45	103.71	-0.12	-0.57	-1.60	-7.39	0.13	0.58	-0.25	-1.14
2023	1.14	4.55	25.84	103.36	-0.12	-0.48	-1.74	-6.97	0.14	0.57	-0.26	-1.02
2024	1.23	4.33	29.36	103.03	-0.12	-0.41	-1.88	-6.60	0.16	0.57	-0.26	-0.93
2025	1.34	4.16	33.03	102.74	-0.11	-0.34	-2.01	-6.27	0.18	0.57	-0.27	-0.85
2026	1.43	4.01	36.51	102.48	-0.10	-0.28	-2.13	-5.97	0.20	0.56	-0.28	-0.79
2027	1.52	3.88	40.05	102.21	-0.09	-0.22	-2.23	-5.69	0.22	0.56	-0.29	-0.73
2028	1.62	3.77	43.67	101.97	-0.07	-0.17	-2.33	-5.44	0.24	0.55	-0.29	-0.69
2029	1.71	3.68	47.35	101.75	-0.06	-0.12	-2.42	-5.20	0.25	0.55	-0.30	-0.65
2030	1.81	3.60	51.09	101.52	-0.04	-0.07	-2.50	-4.97	0.27	0.54	-0.31	-0.62
2016~2030	17.26	4.44	400.29	102.91	-1.52	-0.39	-25.44	-6.54	2.19	0.56	-3.82	-0.98

可以看出, 2016 年~2030 年中国 CO<sub>2</sub> 减排量不断增长, 考察期内累计减排  $388.96 \times 10^8$  t, 其中工业部门累计减排  $400.29 \times 10^8$  t, 年均减排率 102.91%, 减排效果明显. 第一部门和第五部门促进减排, 年均减排率分别为 4.44% 和 0.56%. 第四部门和第六部门对减排起到抑制作用, 主要是因为 CO<sub>2</sub> 排放达峰目标下, 产业结构得到调整, 低排放行业得到快速发展, 其相关的能源消耗和 CO<sub>2</sub> 排放量有所提高, 由于以煤为主的能源消耗得到控制, 其在一定程度上促进了 CO<sub>2</sub> 排放达峰. 第三部门(建筑业)在考察期内抑制碳减排, 但其影响作用相对较小, 占比仅为 0.39%.

#### 4.3 中国 CO<sub>2</sub> 减排潜力评价及优化

根据情景预测的结果可知, 深度能源转型情景一定程度上是以强化能源结构转型和牺牲经济增速为代价实现了中国 2030 年 CO<sub>2</sub> 减排的双控目标, 而该情景设定 2030 年中国煤炭消费结构 40%, 实现这一理想的能源结构转型目标存在很大的难度, 且由于经济、环境和政策等影响因素的不确定性, 各年份的减排能力和效率存在差异. 因此, 有必要针对中国 CO<sub>2</sub> 初始减排潜力进行评价和优化, 以求实现减排任务的合理分配. 本文以 2016 年~2030 年中国 CO<sub>2</sub> 减排潜力作为评价指标, 借助 DEA-CCR 模型进行效率评价, 并对非 DEA 有效的年份进行优化, 结果如表 9 所示.

根据中国 CO<sub>2</sub> 减排分配的综合效率可知, 初始减排效率平均值为 0.845, 处于中等偏上水平, 但只有 2030 年的 CO<sub>2</sub> 减排分配为 DEA 有效, 其余年份减排效率均为非 DEA 有效, 减排任务分配不合理. 考察期内,  $s_1^+ = 0$ , 说明 GDP 设置处于最优状态,  $s^-$  和  $s_2^+$  两个变量不等于 0, 表明初始 CO<sub>2</sub> 减排分配和能源资源投入存在改进空间( $s^-$  表示初始 CO<sub>2</sub> 减排量改进指标,  $s_1^+ = 0$  表示 GDP 改进指标,  $s_2^+ = 0$  表示能源资源

投入改进指标).在保证经济中高速发展、能源消耗不变的情况下,对非DEA有效年份的减排量进行调整得到优化后的CO<sub>2</sub>减排量,与初始减排潜力的分配方案相比,2016年~2030年累计CO<sub>2</sub>减排 $362.11 \times 10^8$  t,相对初始减排方案减少 $26.85 \times 10^8$  t,优化后的减排目标更易于实现.

表9 中国CO<sub>2</sub>减排潜力效率评价结果  
Table 9 Efficiency evaluation of CO<sub>2</sub> reduction potential in China

年份	能源消耗 (10 <sup>8</sup> tce)	GDP (百亿元)	初始减排量 (10 <sup>8</sup> t)	综合效率值 $\theta$	$s^-$	$s_1^+$	$s_2^+$	优化后减排量 (10 <sup>8</sup> t)	差值 (10 <sup>8</sup> t)
2016	4.45	0.34	0.79	0.503	0.225	0.000	0.636	2.02	-2.44
2017	6.92	0.74	1.65	0.675	0.145	0.000	0.409	4.52	-2.39
2018	9.56	1.18	2.57	0.761	0.105	0.000	0.296	7.17	-2.39
2019	12.38	1.68	3.56	0.814	0.081	0.000	0.229	10.00	-2.38
2020	15.40	2.24	4.62	0.850	0.065	0.000	0.184	13.02	-2.37
2021	18.45	2.84	5.72	0.878	0.054	0.000	0.154	16.51	-2.31
2022	21.65	3.51	6.87	0.899	0.046	0.000	0.131	19.42	-2.23
2023	25.00	4.25	8.08	0.915	0.040	0.000	0.113	22.84	-2.17
2024	28.50	5.06	9.36	0.930	0.035	0.000	0.099	26.47	-2.03
2025	32.15	5.95	10.71	0.944	0.031	0.000	0.088	30.32	-1.83
2026	35.63	6.86	12.03	0.956	0.028	0.000	0.079	34.03	-1.60
2027	39.18	7.85	13.39	0.968	0.026	0.000	0.072	37.90	-1.28
2028	42.82	8.91	14.80	0.979	0.023	0.000	0.066	41.90	-0.92
2029	46.54	10.06	16.26	0.990	0.021	0.000	0.061	46.05	-0.49
2030	50.33	11.30	17.77	1.000	0.020	0.000	0.088	50.33	-0.00

## 5 中国CO<sub>2</sub>减排路径分析

基于优化后各年度的CO<sub>2</sub>减排量,本文推算ETS情景下的优化排放量,并对其与BS情景下CO<sub>2</sub>排放的差额进行分解.考虑到各影响因素的减排效应存在部门差异,本文分别对2016年~2030年各部门的CO<sub>2</sub>减排潜力进行因素分解,进而确定中国国民经济六部门CO<sub>2</sub>减排的关键路径.

2030年各部门CO<sub>2</sub>减排潜力的因素分解结果如图2所示.

图2表明,1)第一部门能耗结构与产业结构优化的减排潜力相对较大,考察期内累计减排分别达到 $10.88 \times 10^8$  t和 $5.94 \times 10^8$  t,经济调整和能源效率的提升对减排贡献率相对较小,人口因素对CO<sub>2</sub>减排的贡献是先抑制后促进的作用,其贡献率最小;2)第二部门能源技术进步的减排贡献最大,考察期内年均减排贡献率达到56.65%,其次是能耗结构优化和经济调整,累计减排 $101.44 \times 10^8$  t和 $54.88 \times 10^8$  t,而产业结构优化的减排贡献相对较小;3)第三部门中经济增长和产业结构与能耗结构优化均对CO<sub>2</sub>减排有正向促进作用,考察期内三者累计减排量分别为 $0.94 \times 10^8$  t, $0.34 \times 10^8$  t和 $0.17 \times 10^8$  t,而人口因素与能源技术进步并未起到减排作用;4)第四部门仅有经济调整对CO<sub>2</sub>减排有促进作用,考察期内累计减排 $5.61 \times 10^8$  t,而能源强度和产业结构对CO<sub>2</sub>排放的促增作用相对较大,分别达到 $22.96 \times 10^8$  t和 $7.68 \times 10^8$  t;5)第五部门能源结构和经济调整对CO<sub>2</sub>减排的贡献最大,考察期内累计减排 $2.27 \times 10^8$  t和 $0.79 \times 10^8$  t,而产业结构对CO<sub>2</sub>减排有抑制作用( $1.07 \times 10^8$  t),能源强度和人口因素对CO<sub>2</sub>减排的贡献相对较小;6)第六部门能源结构优化和经济调整对CO<sub>2</sub>减排的贡献最大,考察期内累积减排 $6.76 \times 10^8$  t和 $5.34 \times 10^8$  t,相比之下,能源强度和产业结构对CO<sub>2</sub>排放促增作用最大,考察期内累积达到 $8.4710^8$  t和 $7.23 \times 10^8$  t.

综上所述,经济增速调整、能源技术进步和能源结构优化是实现CO<sub>2</sub>减排的主要途径.其中,经济增长对第二部门、第四部门和第六部门CO<sub>2</sub>减排贡献相对较大,2016年~2030年累计减排值在三个部门中分别为 $54.88 \times 10^8$  t, $5.67 \times 10^8$  t和 $5.34 \times 10^8$  t,对第二部门、第四部门和第六部门的经济增速进行调整,能够大大促进减排工作;能源利用效率对第二和第五部门的减排贡献为正值(促进作用),且第二部门贡献最大,2016年~2030年累计减排 $226.77 \times 10^8$  t,占总减排的58.30%,所以提高第二部门的能源利用效率也是CO<sub>2</sub>减排的关键路径;对于能源消费结构而言,其对第二部门的减排贡献最大,2016年~2030年累计减

排  $101.44 \times 10^8$  t, 第一部门和第六部门次之, 累计减排分别为  $10.88 \times 10^8$  t 和  $6.76 \times 10^8$  t, 因此, 优化第一部门、第二和第六部门的能耗结构, 也是促进 CO<sub>2</sub> 减排的重要路径。

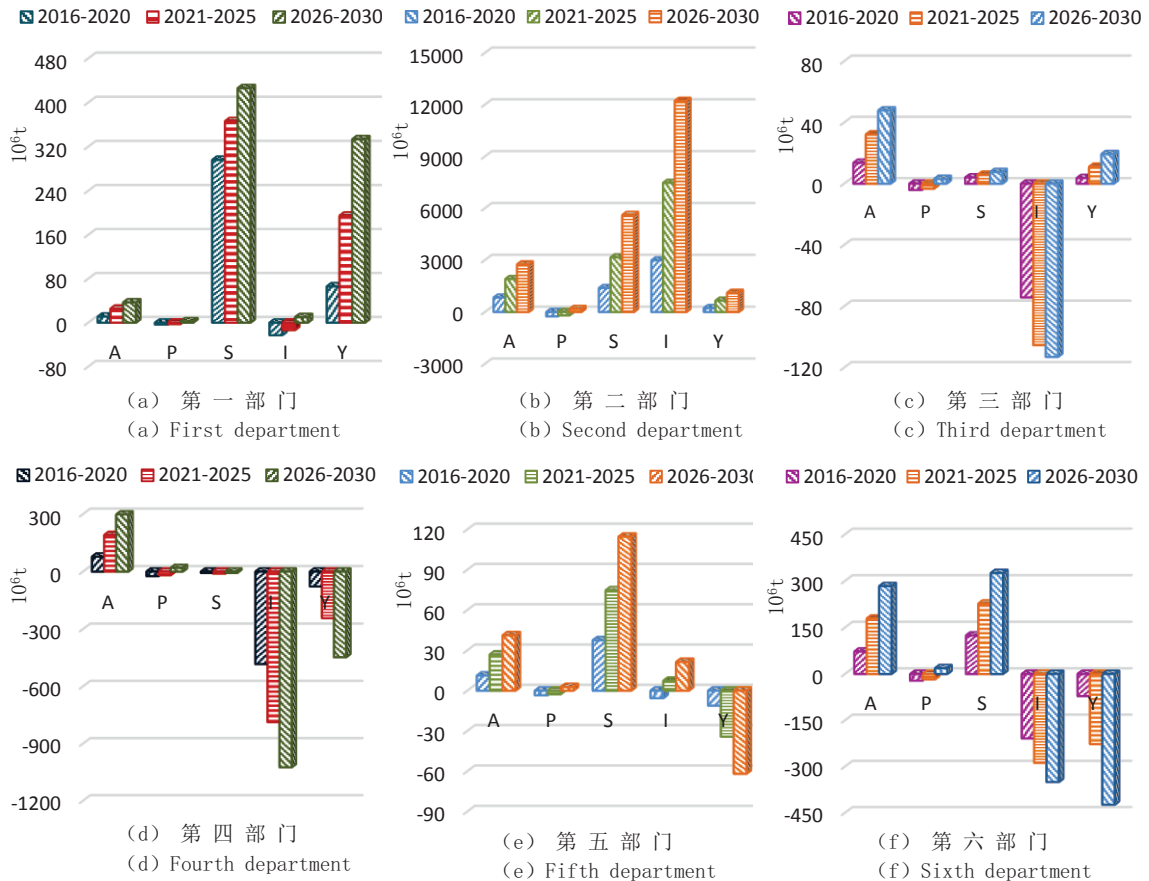


图 2 国民经济 6 部门 CO<sub>2</sub> 减排潜力因素分解

Fig. 2 Factor decomposition of CO<sub>2</sub> emission reduction potential in the six sectors

## 6 结束语

实现 2030 年 CO<sub>2</sub> 减排的双重目标, 中国不仅要考虑未来 CO<sub>2</sub> 排放趋势, 还要考虑国民经济各部门的减排潜力与减排路径的差异性. 本文首先采用 Kaya 扩展模型对 CO<sub>2</sub> 排放的影响因素进行识别, 进而分情景预测中国 CO<sub>2</sub> 排放的变化趋势, 进一步采用 LMDI 完全分解模型测算了中国 CO<sub>2</sub> 排放的关键影响因素和重点调控部门的减排潜力, 最终确定各部门的 CO<sub>2</sub> 减排路径, 以期为实现中国 2030 年 CO<sub>2</sub> 减排目标提供决策依据. 研究认为, 深度能源转型情景下中国将在 2025 年实现 CO<sub>2</sub> 排放量达峰目标, 2030 年实现 CO<sub>2</sub> 排放强度减排目标. 转变工业部门的经济发展模式, 优化能源消费结构, 提高能源利用效率是实现中国 CO<sub>2</sub> 减排目标的关键. 根据研究结论, 本文提出了未来中国 CO<sub>2</sub> 减排的政策取向, 一是要根据各部门 CO<sub>2</sub> 减排的关键影响因素不同, 实施部门减排差异化策略, 二是要通过高碳能源清洁利用, 能源技术创新和新能源产业化措施, 持续推进中国能源结构的低碳转型战略, 三是从全局视角注重各系统政策目标的协调, 构建相互兼容的减排政策网络. 各子系统减排政策的叠加效应将是下一步研究的方向.

## 参考文献:

[1] 周 岩, 蒋京龙, 孙 浩, 等. 面向能源和低碳发展的多准则供应链网络均衡. 系统工程学报, 2014, 29(5): 652-661.  
 Zhou Y, Jiang J L, Sun H, et al. Multicriteria supply chain network equilibrium with energy and low carbon development. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(5): 652-661. (in Chinese)

- [2] Zhou S, Wang Y, Yuan Z Y, et al. Peak energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China's industrial. *Energy Strategy Reviews*, 2018(20): 113–123.
- [3] 王会娟, 夏炎. 中国居民消费碳排放的影响因素及发展路径分析. *中国管理科学*, 2017, 25(8): 1–10.  
Wang H J, Xia Y. Influence factors vs. developments of China's household carbon emissions. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(8): 1–10. (in Chinese)
- [4] 陈正. 基于经济增长与能源消费关系的中国能源消费预测. *西北大学学报*, 2011, 41(5): 65–70.  
Chen Z. China's energy consumption forecast based on the relationship between economic growth and energy consumption. *Journal of Northwest University*, 2011, 41(5): 65–70. (in Chinese)
- [5] Chen T. Analyzing and forecasting the global CO<sub>2</sub> concentration—a collaborative fuzzy-neural agent network approach. *Journal of Applied Research and Technology*, 2015, 13(3): 364–373.
- [6] 何立华, 杨盼, 蒙雁琳, 等. 能源结构优化对低碳山东的贡献潜力. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(6): 89–97.  
He L H, Yang P, Meng Y L, et al. Contribution potential of optimizing energy structure to low carbon Shandong. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(6): 89–97. (in Chinese)
- [7] Yuan C Q, Liu S F, Fang Z G. Comparison of China's primary energy consumption forecasting by using ARIMA (the autoregressive integrated moving average) model and GM(1,1) model. *Energy*, 2016, 100: 384–390.
- [8] Xu G Y, Schwarz P, Yang H L. Determining China's CO<sub>2</sub> emissions peak with a dynamic nonlinear artificial neural network approach and scenario analysis. *Energy Policy*, 2019, 128: 752–762.
- [9] 王勇, 毕莹, 王恩东. 中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(10): 131–140.  
Wang Y, Bi Y, Wang E D. Scene prediction of carbon emission peak and emission reduction potential estimation in Chinese industry. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(10): 131–140. (in Chinese)
- [10] 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. *Energy Policy*, 2016, 89: 224–236.
- [11] 田立新, 张蓓蓓. 中国碳排放变动的因素分解分析. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(11): 1–7.  
Tian L X, Zhang B B. Factor decomposition analysis of carbon emissions change in China. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(11): 1–7. (in Chinese)
- [12] Chen L, Yang Z. A spatio-temporal decomposition analysis of energy-related CO<sub>2</sub> emission growth in China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 49–60.
- [13] 谢锐, 王振国, 张彬彬. 中国碳排放增长驱动因素及其关键路径研究. *中国管理科学*, 2017, 25(10): 119–129.  
Xie R, Wang Z G, Zhang B B. Study on driving factors and critical supply chain paths of CO<sub>2</sub> emissions in China. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(10): 119–129. (in Chinese)
- [14] Zhu X H, Zou J W, Feng C. Analysis of industrial energy-related CO<sub>2</sub> emissions and the reduction potential of cities in the Yangtze River Delta region. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 791–802.
- [15] Štreimikienė D, Balezentis T. Kaya identity for analysis of the main drivers of GHG emissions and feasibility to implement EU “20–20–20” targets in the Baltic States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1108–1113.
- [16] Wei J, Huang K, Yang S S, et al. Driving forces analysis of energy-related carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in Beijing: An input–output structural decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 58–68.
- [17] Wang H, Zhou P. Assessing global CO<sub>2</sub> emission inequality from consumption perspective: An index decomposition analysis. *Ecological Economics*, 2018, 154: 257–271.
- [18] 武娟妮, 程亮, 逯元堂, 等. 中国工业大气污染物排放的影响因素研究. *环境污染与防治*, 2018, 40(11): 1321–1326.  
Wu J N, Cheng L, Lu Y T, et al. Research on driving factors of industrial air pollutants emissions in China. *Environmental Pollution and Prevention*, 2018, 40(11): 1321–1326. (in Chinese)
- [19] 张盼, 熊中楷. 基于政府视角的最优碳减排政策研究. *系统工程学报*, 2018, 33(5): 627–636.  
Zhang P, Xiong Z K. Research on optimal regulation of carbon emissions reduction from government's perspective. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(5): 627–636. (in Chinese)
- [20] Wang J, Zhao T, Wang Y N. How to achieve the 2020 and 2030 emissions targets of China: evidence from high, mid and low energy-consumption industrial sub-sectors. *Atmospheric Environment*, 2016, 145: 280–292.
- [21] Jiang J, Ye B, Xie D, et al. Provincial-level carbon emission drivers and emission reduction strategies in China: Combining multi-layer LMDI decomposition with hierarchical clustering. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 169: 178–190.
- [22] Du Z L, Lin B Q. Analysis of carbon emissions reduction of China's metallurgical industry. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 1177–1184.

- [23] Li L, Chen C, Xie S, et al. Energy demand and carbon emissions under different development scenarios for Shanghai, China. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4797–4807.
- [24] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japan: IGES, 2006.
- [25] 汪 行, 范中启. 基于改进 GM(1,1)模型的能源消费预测研究. *煤炭技术*, 2017, 36(8): 305–307.  
Wang X, Fan Z Q. Prediction of energy consumption based on optimized GM(1,1) model. *Coal Technology*, 2017, 36(8): 305–307. (in Chinese)
- [26] Jung S, An K J, Dodbiba G, et al. Regional energy-related carbon emission characteristics and potential mitigation in eco-industrial parks in South Korea: Logarithmic mean Divisia index analysis based on the Kaya identity. *Energy*, 2012, 46(1): 231–241.
- [27] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867–871.
- [28] 杨 俊, 陆宇嘉. 基于三阶段 DEA 的中国环境治理投入效率. *系统工程学报*, 2012, 27(5): 699–711.  
Yang J, Lu Y J. Environmental investment efficiency in China based on three-stage DEA model. *Journal of Systems Engineering*, 2012, 27(5): 699–711. (in Chinese)
- [29] Li N, Zhang X, Shi M, et al. The prospects of China's long-term economic development and CO<sub>2</sub> emissions under fossil fuel supply constraints. *Resources Conservation & Recycling*, 2016, 121: 11–12.
- [30] Wang D, He W, Shi R Y. How to achieve the dual-control targets of China's CO<sub>2</sub> emission reduction in 2030. Future trends and prospective decomposition. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 1251–1263.
- [31] 曹 静, 贾 娜, 李 根, 等. 3E系统视角下能源结构合理度评价研究. *系统工程学报*, 2018, 33(5): 698–709.  
Cao J, Jia N, Li G, et al. Research on the evaluation of the sanity degree of energy structure based on the perspective of 3E system. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(5): 698–709. (in Chinese)
- [32] He J K. An analysis of China's CO<sub>2</sub> emission peaking target and pathways. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 5(4): 155–161.
- [33] Yuan J, Xu Y, Hu Z, et al. Peak energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China. *Energy Policy*, 2014, 68(2): 508–523.
- [34] Zhu B Z, Wang K, Chevallier J, et al. Can China achieve its carbon intensity target by 2020 while sustaining economic growth. *Ecological Economics*, 2015, 119: 209–216.

#### 作者简介:

王 迪 (1983—), 男, 安徽宿州人, 博士, 副教授, 研究方向: 资源与环境管理, Email: wangdi9605@163.com;

和 维 (1991—), 女, 安徽萧县人, 硕士, 研究方向: 资源与环境管理, Email: hwhewei2018@163.com;

聂 锐 (1958—), 男, 山西原平人, 博士, 教授, 研究方向: 能源经济与管理, Email: adean@cumt.edu.cn.