



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

# 碳中和目标下的中国碳减排因素分析

## ——基于LMDI和SDA分解方法

2021年5月30日

指导老师：戴瀚程  
小组成员：马啸天，房晨，周珊羽，李卓超

# › CONTENT ‹

**01 研究背景与目标**

**02 数据与方法**

**03 结果与讨论**

**04 总结与不足**



**PART 01**  
**研究背景与目标**

### 《巴黎协定》 (The Paris Agreement, 2015)

明确国家自主贡献减缓气候变化

碳排放尽早达峰值,

20 世纪下半叶实现碳中和,

**20 世纪末将全球地表温度相对于工业化前上升的幅度控制在 2°C 以内, 并为争取实现 1.5°C 的温控目标努力**

### 两个阶段性目标

#### 碳达峰 (Peak Carbon Dioxide Emissions)

二氧化碳的年排放量达到峰值后不再增长, 趋势转为稳步下降。

#### 碳中和 (Carbon Neutral)

人类经济社会活动所必需的碳排放通过森林碳汇和其他人工技术或工程手段加以补集利用或封存, 而使排放到大气中的二氧化碳净增量为零。

### 欧盟

《绿色新政》提出**2050 年前实现碳中和**的目标

应对气候变化的经济社会长期战略及投资计划, 涵盖了农业、工业、交通、建筑等领域的全面转型

借此更好的应对气候变化, 最大限度降低碳排放。

2012 年, 丹麦哥本哈根市政府制定了《**2025 气候行动计划**》, 提出世界上首个碳中和城市建设目标。

### 美国

2021-2025 年间, 能源消耗带来 CO<sub>2</sub>排放量持续下降

2035 年, 通过能源结构向可再生能源方向的过渡, 实现无碳发电

#### 2050 年实现碳中和

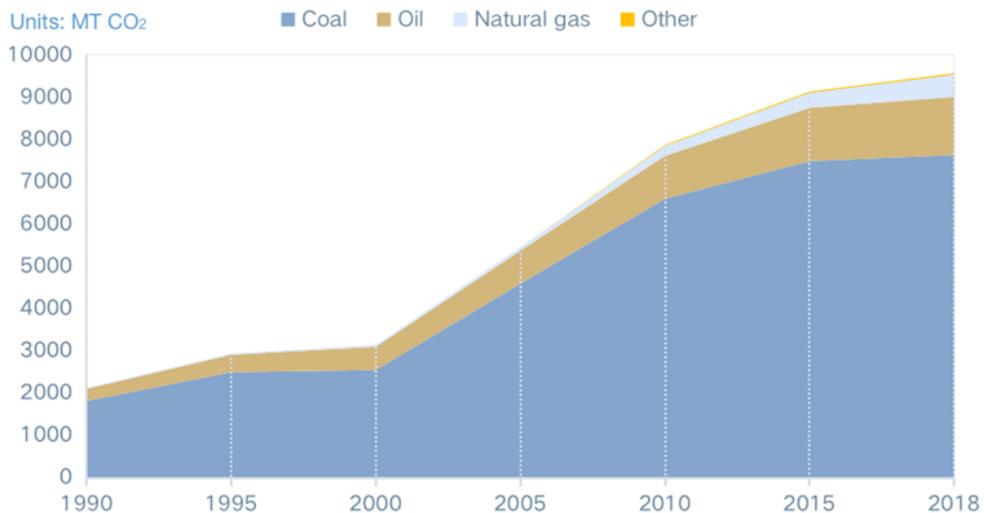
自 1990 年起, 美国在保持 GDP 持续增长的同时, 成功使得单位 GDP 能耗和单位能耗 CO<sub>2</sub>排放逐步下降

### 中国

“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”

——2020年9月22日，第七十五届联合国大会

2021年1月，国务院国资委研究制定了《中央企业能源节约与生态环境保护监督管理办法（征求意见稿）》，明确提出中央企业应持续提升能源利用效率，控制温室气体排放，**积极参加碳达峰与碳中和行动**



数据来源: Carbon Monitor

图 2 1990-2018 年中国分能源种类的CO<sub>2</sub>排放(单位: Mt CO<sub>2</sub>)



### 研究目标

本文试图基于**结构分解分析**等数据分析方法

- 部门尺度上定量考察**人口增长、经济发展、能源强度变化、碳强度变化和结构转型**等因素对于我国历史碳排放量变化的贡献，分析历史碳排放增加的“基本驱动因素”；
- 进一步分析在未来不同发展情景下**各类驱动力影响的可能变化趋势**；
- 深入分析中国碳排放的关键驱动因素，探讨我国绿色低碳转型发展路径的有效性和具体政策需求，为我国制定**合理的绿色低碳发展政策提供支撑**。



**PART 02**  
**数据与方法**

计算二氧化碳排放量的方法采用 IPCC/OECD 推荐的方法：

$$Emission = AD * EF$$

- AD (activity data): 人类活动相关数据, 主要为各部门各类能源用量数据。
- EF (emission factors): 单位用量产生的CO<sub>2</sub>排放。

$$EF_{ij} = NCV_i * EF_i * O_{ij}$$

- NCV (net calorific value) : i种能源的净热值
- EF: i种能源单位热值二氧化碳排量
- O: 氧化效率

表1: 采用的折标准煤系数和排放因子数据

能源名称	折标准煤系数	平均低位发热量		燃料CO <sub>2</sub> 排放因子 (kgCO <sub>2</sub> /TJ)
		数值	单位	
煤炭	0.7143	20908	MJ/t	87300
天然气	1.215	38931	MJ/k(m <sup>3</sup> )	54300
原油	1.4286	41816	MJ/t	71100

本研究主要使用了国家统计局中的 2002, 2007, 2012, 2017年的能源平衡表进行计算

[1] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1.1 introductions.

[2] 数据来源: 《中国能源统计年鉴》, 附录四: 各种能源折标准煤参考系数.



我们选取**2002、2007、2012、2017**这四个年份，利用SDA方法对每两个年份之间，每个部门的**二氧化碳排放量及其占比**进行计算与分解。

简要的操作过程：

- ①搜集国家统计局网站上公布的以上四个年份的**投入产出表**  
年度的投入产出表对部门做了很细致的分类，在此次研究中，为了操作的可行性与数据之间的匹配性，我们将其内部的部门合并后，统一划分调整为**六部门**<sup>注</sup>
- ②根据**能源统计年鉴**里“煤”、“石油”、“天然气”在以上四个年份、六个部门所分别对应的消耗数据建立**能源强度与能源结构矩阵**
- ③加上三种能源相应的**排放因子 (EF)** 即可利用Matlab软件编程进行SDA的分解计算

### 主要原理:

- 通过获取若干年的**投入产出表**与**能源平衡表**构建下述的**(进口) 竞争型经济—能源—碳排放投入产出表**
- 表格最左侧的“中间投入”至“总投入”三行的内容从投入产出表整理获得
- “能源消费”至“碳排放量”三行的内容则根据相对应年份的能源平衡表的整理填入。

表2: (进口) 竞争型经济—能源—碳排放产出

中间使用



[1] 顾阿伦, & 吕志强. (2016). 经济结构变动对中国碳排放影响——基于 io-sda 方法的分析. 中国人口资源与环境, 26(003), 37-45.

[2] 郭朝先. (2010). 中国碳排放因素分解: 基于 LMDI 分解技术. 中国人口·资源与环境, 020(012), 4-9.

**碳排放总量**  $Q = c\hat{E}X$  ( $c$ 是二氧化碳**排放系数向量**)

若令  $S = c \times F$ , 并将其写成**角阵**的形式, 则  $Q = \hat{S}\hat{E}X$

**碳排放量变化值**可以直接表示记作  $\Delta Q = Q_1 - Q_0 = \hat{S}_1\hat{E}_1X_1 - \hat{S}_0\hat{E}_0X_0$

下标1,0分别表示变量在报告期与基期的取值

首先, 将  $\Delta Q$  分解为  $\Delta \hat{S}\hat{E}_0X_0 + \hat{S}_1 \Delta \hat{E}X_0 + \hat{S}_1\hat{E}_1 \Delta X$  或者  $\Delta \hat{S}\hat{E}_1X_1 + \hat{S}_0 \Delta \hat{E}X_1 + \hat{S}_0\hat{E}_0 \Delta X$

对  $\Delta Q$  细化的分解分析选择误差较小, 操作流程较为直观的**两极分解法**:

$$\text{即 } \Delta Q = \frac{(\Delta \hat{S}\hat{E}_0X_0 + \Delta \hat{S}\hat{E}_1X_1)}{2} + \frac{\hat{S}_1\Delta \hat{E}X_0 + \hat{S}_0\Delta \hat{E}X_1}{2} + \frac{\hat{S}_1\hat{E}_1\Delta X + \hat{S}_0\hat{E}_0\Delta X}{2}$$

之后, 根据投入产出表平衡关系式, 经济规模变化  $\Delta X$  可以进行细分为**国内需求变动效应**、**出口扩张效应**、**进口替代效应**、**技术变动效应**, 因此将  $\Delta X$  进一步分解后的结果代入则可以形成“**双层嵌套**”的**结构分解**。

恒等式：**总产品=国内生产国内使用的中间产品+国内生产国内使用的最终需求产品+出口产品**

$$X_0 = \hat{U}_0 A_0 X_0 + \hat{U}_0 (C_0 + I_0) + EX_0$$

$$X_1 = \hat{U}_1 A_1 X_1 + \hat{U}_1 (C_1 + I_1) + EX_1$$

令  $R_0 = (I - \hat{U}_0 A_0)^{-1}$ 、 $k = (\hat{S}_1 \hat{E}_1 - \hat{S}_0 \hat{E}_0)/2$ ，最后可以得到：

$$\begin{aligned} \Delta Q = & (\Delta \hat{S} \hat{E}_0 X_0 + \Delta \hat{S} \hat{E}_1 X_1)/2 \dots \dots \text{能源消费结构变动效应} \\ & + (\hat{S}_1 \Delta \hat{E} X_0 + \hat{S}_0 \Delta \hat{E} X_1)/2 \dots \dots \text{能源消费强度变动效应} \\ & + k(R_0 \hat{U}_0 + R_1 \hat{U}_1) \Delta C/2 \dots \dots \text{消费扩张效应} \\ & + k(R_0 \hat{U}_0 + R_1 \hat{U}_1) \Delta I/2 \dots \dots \text{投资扩张效应} \\ & + k(R_0 + R_1) \Delta EX/2 \dots \dots \text{出口扩张效应} \\ & + k[R_0 \Delta \hat{U}(A_1 X_1 + C_1 + I_1) + R_1 \Delta \hat{U}(A_0 X_0 + C_0 + I_0)]/2 \dots \dots \text{进口替代效应} \\ & + k(R_0 \hat{U}_0 \Delta A X_1 + R_1 \hat{U}_1 \Delta A X_0)/2 \dots \dots \text{投入产出系数变动效应} \end{aligned}$$

注：此页中  $\hat{U}$  为**国内供给比率**的对角矩阵，对角元素  $u_i$  为各部门产品的国内供给比率，计算公式为  $u_i = \frac{x_i - e_i}{x_i - e_i + m_i}$

其中， $m_i$  为进口列向量IM、 $e_i$  为出口列向量EX、 $x_i$  为总产出列向量X相应的元素)

本文中所用的**IMED|CGE**模型是由北京大学能源环境经济与政策研究室（LEEEP）自主开发的全球多部门、多区域动态CGE模型，由GAMS/MPSGE建模并用PATH算法器求解，以1年为步长动态模拟基准年至未来目标年（2050年）期间我国经济走势、产业结构变化、能源消费及其碳排放趋势。

表3 模型的情景设置

		社会经济发展路径		
		SSP1	SSP2	SSP3
Baseline		Base SSP1	Base SSP2	Base SSP3
2 Degree	High end	2 Degree SSP1 High	2 Degree SSP2 High	2 Degree SSP3 High
	Medium range	2 Degree SSP1 Medium	2 Degree SSP2 Medium	2 Degree SSP3 Medium
	Low end	2 Degree SSP1 Low	2 Degree SSP2 Low	2 Degree SSP3 Low
1.5 Degree	High end	1.5 Degree SSP1 High	1.5 Degree SSP2 High	1.5 Degree SSP3 High
	Medium range	1.5 Degree SSP1 Medium	1.5 Degree SSP2 Medium	1.5 Degree SSP3 Medium
	Low end	1.5 Degree SSP1 Low	1.5 Degree SSP2 Low	1.5 Degree SSP3 Low

借助**Kaya恒等式**，可以将二氧化碳总排放量分解为**碳密度**、**能源强度**，**经济结构**和**经济规模**四要素的乘积形式（在具体应用时乘积形式会有所变化）：

$$CE^t = \sum_i CE_i^t = \sum_i \frac{CE_i^t}{E_i^t} \times \frac{E_i^t}{GDP_i^t} \times \frac{GDP_i^t}{GDP^t} \times GDP^t = \sum_i CI_i^t \times EI_i^t \times ES_i^t \times G^t$$

$i$ ：第*i*个经济部门；

$CE^t$ ：t时期的碳排放总量；

$CE_i^t$ ：部门*i*在第t年度内的碳排放总量；

$E_i^t$ ：部门*i*在第t年度内消耗的能源总量；

$GDP^t$ ：第t年度内的国内生产总值；

$GDP_i^t$ ：第t年度内部门*i*的产出；

$CI_i^t$ ：第t年度部门*i*的碳排放密度( $CI_i^t = CE_i^t / E_i^t$ )；

$EI_i^t$ ：第t年度部门*i*的能源强度( $EI_i^t = E_i^t / GDP_i^t$ )；

$ES_i^t$ ：第t年度部门*i*的经济份额( $ES_i^t = GDP_i^t / GDP^t$ )；

$G^t$ ：即 $GDP^t$ 。

LMDI模型中运用了上述**Kaya恒等式**，进行分解时我们运用了**加法形式**，分解式如下：

$$\begin{aligned}
 \Delta C_{\text{tot}} = & \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t, \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{P^t}{P^{t-1}}\right) + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t, \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{Y^t}{Y^{t-1}}\right) \\
 & + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t, \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{M^t}{M^{t-1}}\right) + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t, \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{S^t}{S^{t-1}}\right) \\
 & + \sum_i \sum_j L(\omega_{ij}^t, \omega_{ij}^{t-1}) \ln\left(\frac{I^t}{I^{t-1}}\right) = \Delta C_P + \Delta C_Y + \Delta C_M + \Delta C_S + \Delta C_I
 \end{aligned}$$

其中  $\omega$  代表不同时间段的二氧化碳排放

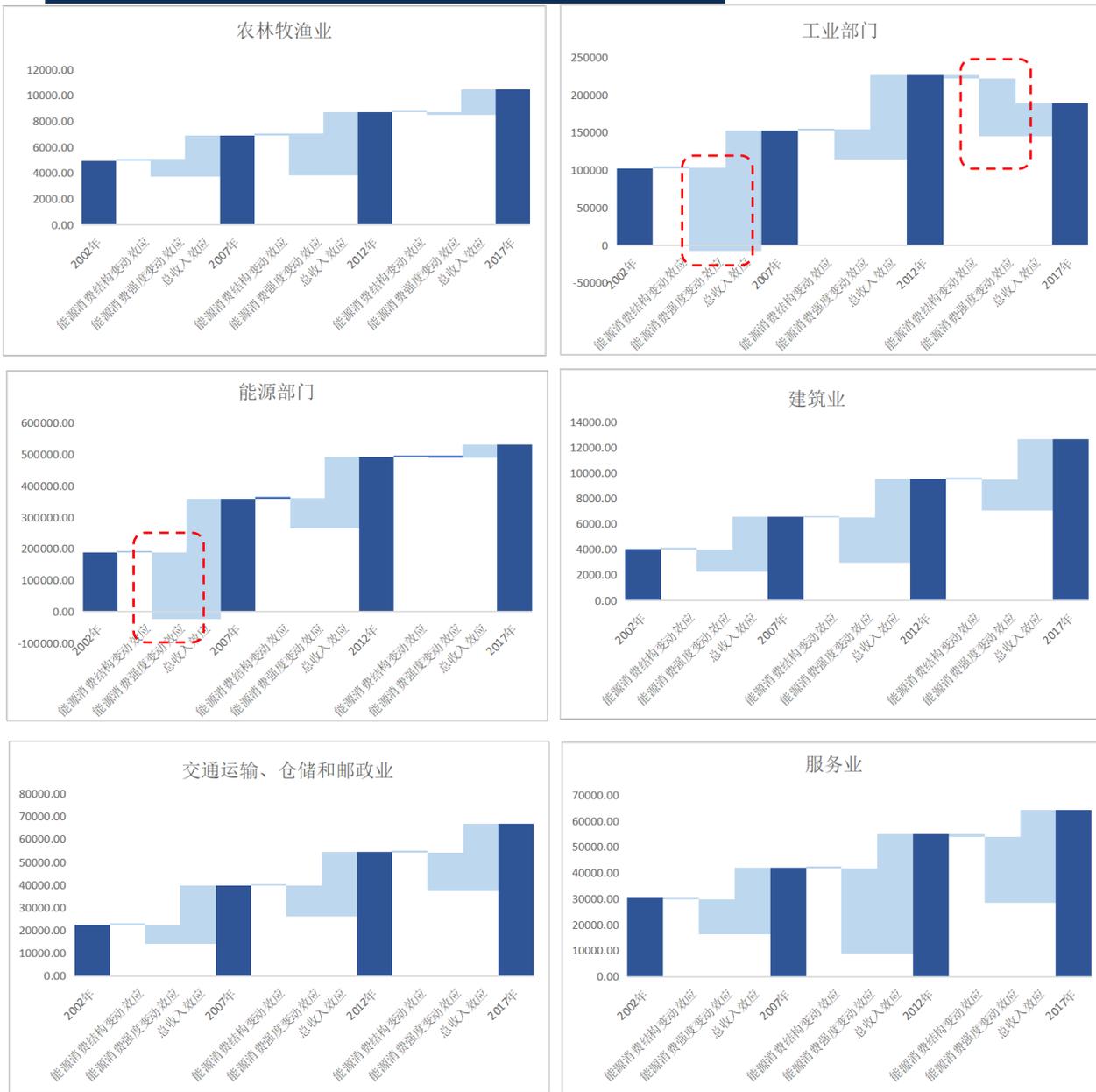
P, Y, M, S, I 分别代表人口、总产出、能源强度、能源结构、碳排放强度

$$\text{其中} \quad L(x, y) = \begin{cases} (x - y) / (\ln x - \ln y), & x \neq y > 0 \\ x, & x = y > 0 \end{cases}$$



**PART 03**  
**结果与讨论**

# 结果与讨论——历史数据



采用SDA分解方法对**2002-2017年**间六部门碳排放数据分解分析的结果如左图

- ①**能源消费结构的变动**在2002-2012的十年之间并没有对减排做出明显贡献而**能源强度的变动**一直以来都为减排做出了巨大的贡献
- ②**投入产出系数变动效应**则从21世纪最初几年的贡献**15亿吨**的二氧化碳增长一直降低到了近年来**减少16亿吨**的排放
- ③**工业部门**作为碳排放的重中之重，变动的趋势也呈现出明显的复杂性

图 3 2002-2017 年中国 6 部门二氧化碳排放因素结构分解结果（单位为万吨二氧化碳）

我们采用LMDI分解方法对2005-2050年间2°C情景下中国碳排放数据进行了分解分析

(考虑**人口**，**人均GDP**，**能源强度**，**能源结构**，**碳排放强度**五种因素)，下图为分解结果：

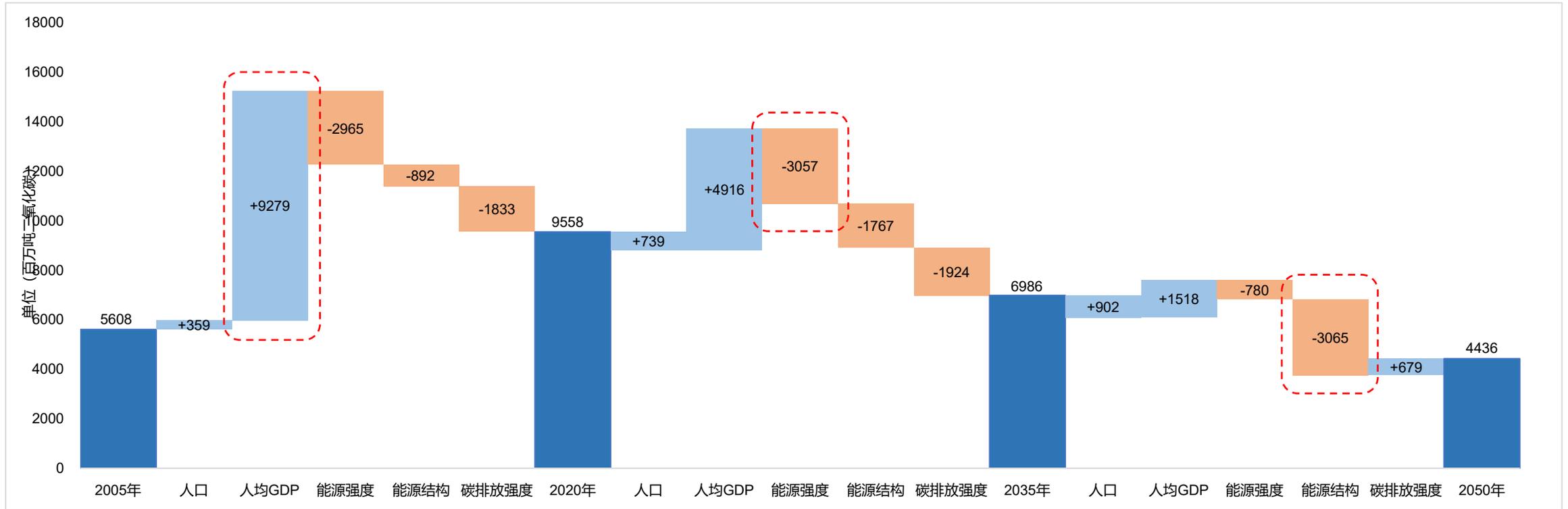


图 4 2005-2050 年 LMDI 分解结果

从结果中可以看出：

- 未来人口效应会提供负的碳排放贡献，同时产出效应会有较为明显的下降
- 在2020-2035年间，我国的化石能源强度下降明显
- 而在2035-2050年，则主要依赖能源结构的转变实现碳排放的降低

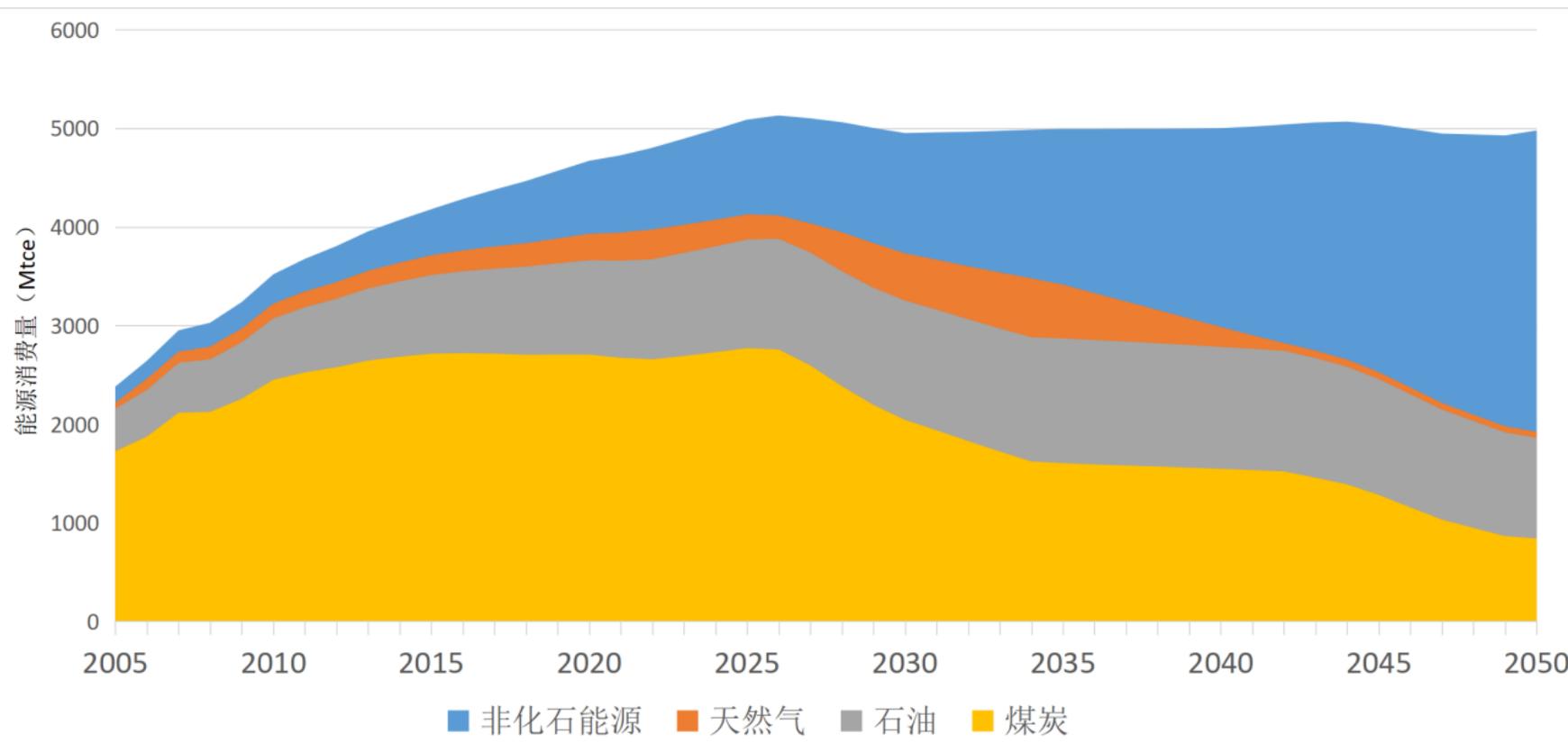


图 5 2005-2050 年中国一次能源结构变化

- **非化石能源**的量以一种较为平滑的趋势上升，在2050年已经可以达到6成
- 三种主要化石能源占比却产生了各不相同的变化，**煤炭**的使用下降最为显著
- 在过渡阶段，为治理空气污染，**天然气**在特定时期用量有所增加

总的来看，化石燃料的使用**呈现先升后降的趋势**，并需要在2050-2060年下降至一个较低的水平。长期以煤炭作为主要能源的中国，必须在几十年的时间内完成能源结构翻天覆地的改变。

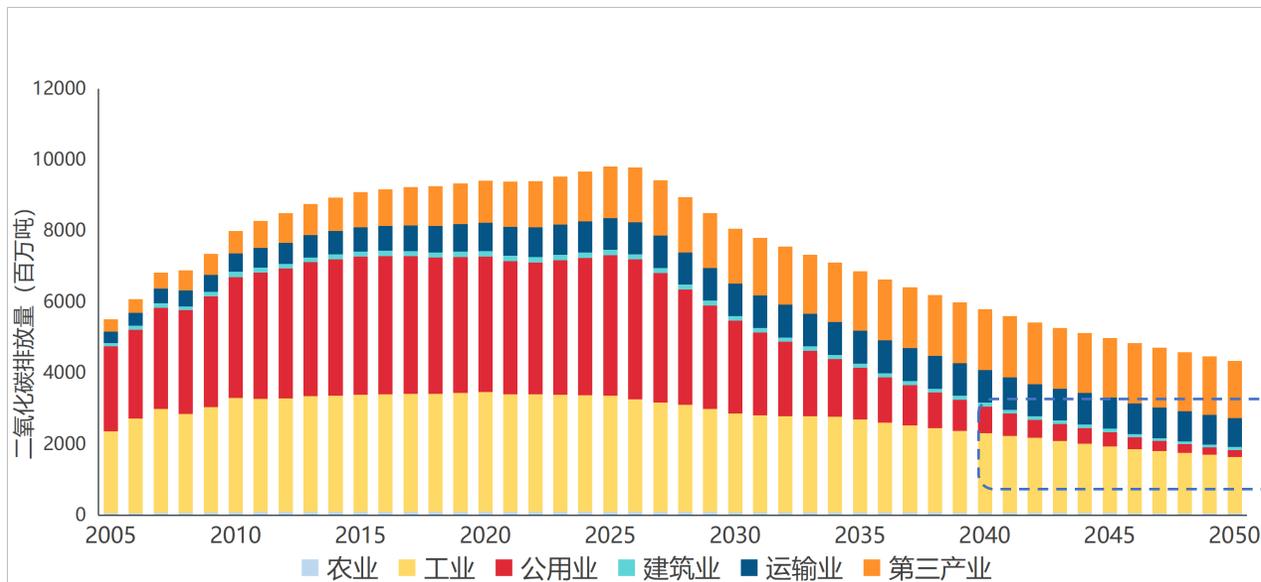


图 6 2005-2050年中国六部门二氧化碳排放变化

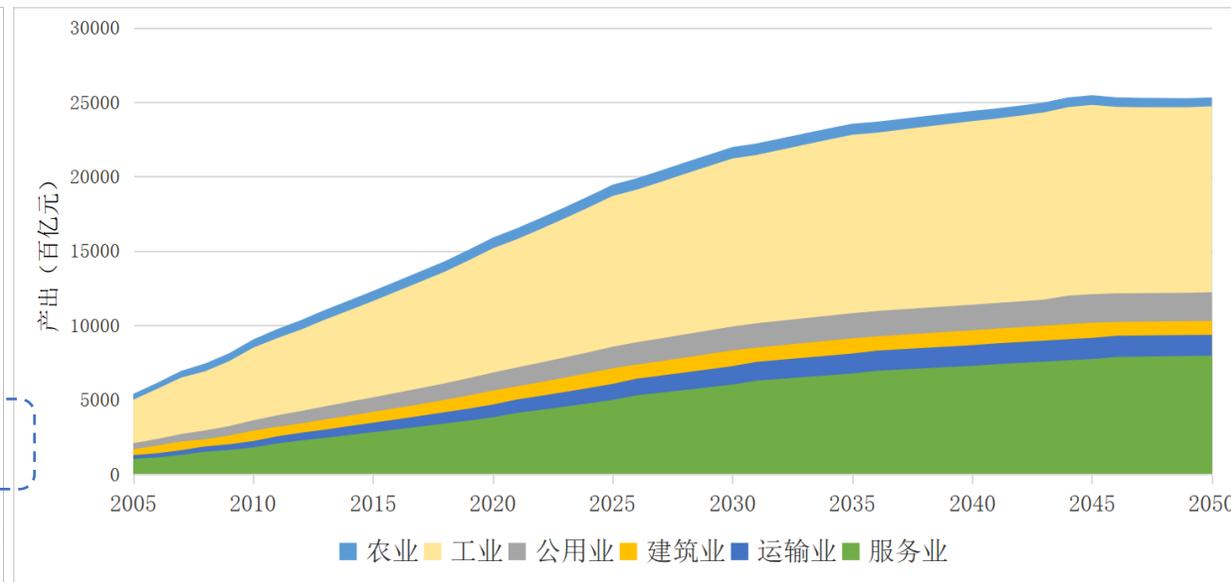


图 7 2005-2050年中国6部门产出变化

- 2°C情景下，中国**能够在2025年前后实现碳达峰**，而各产业呈现出各不相同的变化趋势。
- 目前对于我国碳排放贡献较为明显的是**公用业（主要包括供水以及发电等产业）和工业**，而到2050年，由于第三产业的总产出持续上升，二氧化碳排放长时间缓慢上升，第三产业将会在碳排放总量中占据重要的地位。

值得注意的是：2°C情景下，中国的**发电行业**能够在2050年（具体是在2049年）之前实现零碳发电，这对于碳中和目标的实现是极为有利的。

## 结果与讨论——未来数据（六部门）

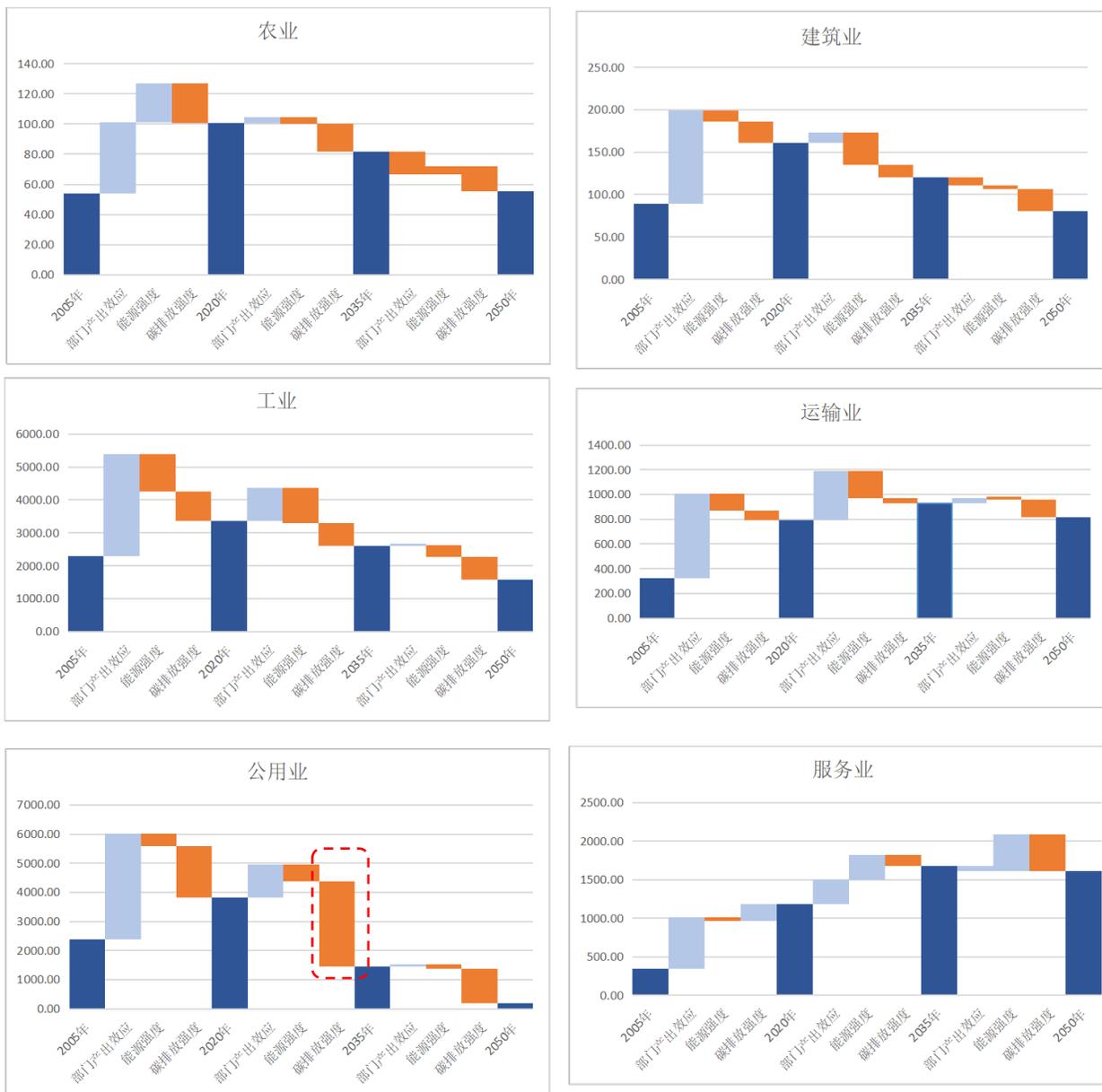


图 8 2005-2050 年中国 6 部门二氧化碳排放因素分解

我们采用LMDI分解方法对2005-2050年间2°C情景下中国**6部门碳排放数据**进行了分解分析（部门产出，能源强度，碳排放强度三种因素），左图为分解结果：

- **农业**碳排放量总体较低，未来的农业碳减排主要依赖碳排放强度的降低
- **建筑业**在过去的十几年中，能源强度有较为明显的上升，但在2°C情景下，需要在未来较为迅速地降低能源的使用量，同时转变能源结构
- **工业**是实现碳中和需要关注的重点部门，碳排放量一直占有较大的比重，未来产出的增加会逐渐缓慢，并主要依赖**能源强度和能源结构的转变**实现碳排放的下降
- 由于产出的增加，再加上能源强度和碳排放强度下降并不明显，**运输业**并不能实现有效的碳排放的下降
- 未来**电力部门**碳排放下降最为明显，这主要得益于**碳排放强度效应**，非化石能源的使用推动电力部门实现零排放，使得电力部门走在碳中和的前列
- **服务业**在未来**会成为碳排放的主要贡献部门**，这主要是由于**产出的大量增加以及能源使用**的增加



**PART 04**  
**总结与不足**

### 能源

能源结构的变革是我国实现碳中和最重要的任务。

### 部门

工业与能源转换部门（包含电力部门）在未来具有强劲的减排潜力。

某些部门的产出在未来仍然处在增长的过程中，特别是第三产业，但碳排放量依然要求有较大下降，这需要相应行业的不同主体共同发挥减排潜力。

### 从历史趋势到未来趋势

我们可以看到历史数据的分析结论中，能源结构的变化并未做出较大的减排贡献，而能源强度效应对于防止碳排放不断增加做出了一定的贡献。

但通过对于未来数据的分析，能源结构的变化是未来碳中和过程中的重中之重。

另外，2°C情景下，**人口数量与人均GDP**对于碳排放减少的贡献也是不容忽视的，因此仍需要坚持我国人口的科学、平稳增长，促进人口与经济的协调发展。

### 主要不足

#### ● 情景层面

在分析未来数据时仅仅针对2°C情景进行分析，**缺乏不同情景间的对比**，不能全面说明中国碳中和目标下的碳减排因素。

#### ● 方法层面

在历史数据的分析中，对于**总产出效应**进一步分解时，结果存在一定的误差，可能是由于方法本身的系统误差，也可能是因为计算中存在一些问题。



**敬请指正!**

