

中国碳排放影响因素分析与碳中和路径探寻

■ 周云柯^{1,2}/吴建国¹

(1. 北京大学工学院, 北京 100871; 2. 青矩技术股份有限公司, 北京 100069)

摘要: 文章借助Kaya恒等式, 构建了3层LMDI (Logarithmic Mean weight Divisia Index method) 分解模型, 研究产业结构、人口、GDP、能源强度等影响因素对中国碳排放总量的影响, 旨在探索实现碳中和的有效路径。研究发现, 人均GDP的正效应与能源消费结构的负效应对碳排放影响因素贡献最大。在此基础上, 从政策、技术发展、财政预算三方面提出中国碳中和实施路径建议, 并提出2021—2060年各阶段建议重点研发的低碳技术。

关键词: 碳排放; 碳排放因子; 指数分解; 影响因素; 实施路径

中图分类号: F062.1; F205 文献标识码: A 文章编号: 1672-6995 (2025) 04-0012-13

DOI: 10.19676/j.cnki.1672-6995.001078

Analysis of Influencing Factors of Carbon Emissions and Exploration of Carbon Neutrality Path in China

ZHOU Yunke^{1,2}, WU Jianguo¹

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Qingju Technology Co., LTD., Beijing 100069, China)

Abstract: With the help of Kaya identity, this paper constructs a three-layer LMDI (Logarithmic Mean weight Divisia Index method) decomposition model to study the impact of industrial structure, population, GDP, energy intensity and other influencing factors on total carbon emissions in China, aiming to explore an effective path to achieve carbon neutrality. It is found that the positive effect of GDP per capita and the negative effect of energy consumption structure contribute the most to the influencing factors of carbon emissions. On these basis, this paper puts forward suggestions on the implementation path of carbon neutrality in China from three aspects, including policy, technology development and fiscal budget, and puts forward the low-carbon technologies that are recommended for key research and development in each stage from 2021 to 2060.

Keywords: carbon emissions; carbon emission factors; index decomposition; influencing factors; implementation path

0 引言

可持续发展已被联合国列为最重要的议题。2019年3月, 联合国环境规划署发布的《全球环境展望》第6期中提出^[1], 全球环境形势总体仍在恶化, 世界并未在实现2030可持续发展议程设定的环境目标的正确轨道上, 可以采取行动的时间窗口正在关闭, 特别需要采取紧急行动, 加强国际合作。2020年7月, 联合国发布《2020年可持续发展目标

进展报告》^[2], 指出国际社会已脱离实现巴黎协定设定的1.5摄氏度和2摄氏度目标的轨道。联合国专门机构世界气象组织发表的一项报告指出^[3], 气候变化并未因2019年新型冠状病毒病而止步, 温室气体浓度达到了创纪录的水平并在继续上升, 世界将目睹有记录以来最暖的五年。

应对气候变化所采取的优化能源结构、提高能源资源利用效率、发展可再生能源、调整产业结

收稿日期: 2024-02-26; 修回日期: 2024-05-07

▲ 基金项目: 重点实验室开放项目“油气资源与探测国家重点实验室”(PRP/open-2109)

▲ 作者简介: 周云柯(1992—), 女, 北京市人, 青矩技术股份有限公司中级工程师, 工学硕士, 主要研究方向为能源与低碳发展。

▲ 通讯作者: 吴建国(1987—), 男, 湖南省邵阳市人, 北京大学工学院研究员、博士生导师, 工业与系统工程系博士, 主要研究方向为大数据分析。E-mail: j.wu@pku.edu.cn。

构、增加森林碳汇、改善环境质量、加强环境韧性等政策措施有助于促进可持续发展，符合提高经济增长质量、实现可持续发展、推进生态文明建设的战略方向。

近几年，中国积极应对气候变化，陆续提出一系列的碳排放目标和举措。2020年，中国确立“双碳”目标，并陆续出台多个政策文件，从整体方案、五年规划、远景目标、体制机制、绿色金融、节能减排、城乡建设、生态产品价值、国民经济等方面，分层级、分领域共同打造“1+N”体系^[4-15]，各有关部门出台12份重点领域、重点行业实施方案和11份支撑保障方案，31个省（自治区、直辖市）制定了本地区碳达峰实施方案^[16]。2021年，中共中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，重点提出碳达峰碳中和的顶层设计和总体部署，并明确具体行动计划和部门分工。2022年，《国务院政府工作报告》提出能耗“双控”向碳排放“双控”转变，构建绿色低碳循环发展的经济体系。2023年，生态环境部发布《温室气体自愿减排管理办法（试行）》，全国碳市场收盘价突破70元/吨。2024年初，国家市场监督管理总局等十八部门联合印发《贯彻实施〈国家标准化发展纲要〉行动计划（2024—2025年）》，要求健全“双碳”标准体系。此外，中国人民银行、中国证券监督管理委员会、国家金融监督管理总局等部门发布绿色保险相关文件，北京证券交易所、上海证券交易所、香港交易所等相继出台上市公司可持续发展报告指引相关文件；国务院国有资产监督管理委员会要求中央企业上市公司披露可持续发展报告。由此可见，在推动实现“双碳”目标的进程中，平衡经济发展和环境保护的关系越发重要。

中国将在最短的时间内减少最大量的碳排放，从碳达峰到碳中和所用时间远少于欧盟和美国各自所确定的目标，因此“双碳”目标具有极大的挑战性，主要体现在能源结构、经济发展与碳减排的关系、产业结构等方面。中国2019年人均GDP排在世界第63位，低于世界人均GDP平均值，因此在发展经济的同时大幅降低碳排放将成为重点难点。例如

2021年下半年出现的大规模限电停产减产现象，说明以政策为导向的自上而下治理方式不仅无法从根本上实现经济社会全面低碳转型，还会进一步加剧环境冲突，导致转型风险积聚，因此分析经济、产业发展对碳排放的影响是必要的。

1 文献综述

围绕中国如何实现“双碳”目标，国内外众多学者集中于研究中国碳排放的发展历程、碳排放影响因素、现阶段碳排放量核算及碳排放预测，其中准确判断碳排放影响因素是科学制定碳减排实施路径的重要环节。碳排放影响因素具有涉及领域多、关联性强、空间性复杂、时间跨度大等特点。近两年，众多学者从国家、区域、行业层面详细分析了碳排放影响因素。

从国家层面，芮琦运用STIRPAT模型和GA-BP模型研究中国碳排放影响因素及情景分析^[17]。任宏洋等系统梳理了中国碳排放影响因素及识别方法的研究现状，发现已有研究缺乏影响因素对碳排放重要性随时间的变化，缺少复合影响因素研究，未充分考虑经济特征、能源方式、社会特点等潜在影响因素，具有滞后性^[18]。周杰文等研究分析产业结构与环境规制对碳排放绩效的影响^[19]。要蓉蓉等采用多期双重差分法评估政策效应，研究发现低碳试点政策显著降低了试点省市的碳排放强度^[20]。孙建卫采用拉式分解（Laspeyres）研究产业结构调整、技术进步、GDP、产业结构调整与各产业碳排放强度对中国碳排放强度、总量及各产业部门的影响^[21]。王春春采用两层M-H LMDI研究一次能源和各产业部门对福建省碳排放总量变化的贡献度^[22]。徐军委采用三层LMDI将碳排放影响因素分解为30个省、7个部门和8种能源，分析结构、强度和规模对中国碳排放的影响^[23]。Wu Libo研究分析20世纪80年代和90年代中期中国碳排放变化趋势的主要原因^[24]。沈谦采用迪氏因素分解法对三次产业进行能源强度单层分解，发现第二产业的技术进步是重要影响因素^[25]。

从区域和行业层面，徐妍等研究了中国254个城市样本，发现城市数字经济空间关联网络能够提

升碳排放绩效^[26]。姜军等采用蒙特卡洛模拟法预测居住建筑运行碳排放^[27]。李健等选用结构向量自回归模型研究京津冀水泥业的碳排放影响因素^[28]。胡雨朦等采用LMDI模型研究数字化投入对中国工业行业碳排放的影响^[29]。孙景妍等构建土地利用、省级能源消费碳排放数据等多源数据碳排放空间化模型，研究北方农牧交错区的碳排放时空变化及各类城市差异化的减排路径^[30]。应钰等从自然-社会二元系统视角测算碳足迹的时空格局演变特征，采用Kayak模型分析碳足迹的影响因素^[31]。梁毅等采用灰色关联分析法研究河北省碳排放影响因素，并运用STIRPAT模型分析影响因素的指标，研究发现能源消费和人口因素为碳排放主要影响因素^[32]。何飞扬等运用Tapio脱钩模型和LMDI分解法对比分析浙江省与安徽省的EKC曲线及碳排放脱钩的影响因素^[33]。

现有研究在省市、空间及重点行业等方面进行系统探讨，但仍存在一定局限，主要体现在以下几个方面：①缺少对影响因素随时间的变化情况的研究，未能发现不同时期的关键影响因素；②通常将经济特征与产业分析作为相互独立的影响因素，对于经济与产业发展对碳排放影响的分析有待完善；③多数研究将分解结果用于对未来碳排放的情景预测，分解结果未能与政策紧密结合。

针对既有研究成果存在的上述不足之外，本文分析了影响因素随时间的变化，发现我国不同时期碳排放总量的关键影响因素。在构建分解模型时加入了产业分解，将分解结果与政策相结合，提出碳减排实施路径，并对能源与技术财政预算进行分

析，以此提出各时间段重点研发的低碳技术。

2 碳排放影响因素分析

2.1 数据来源

本文能源生产量、GDP及人口数据来源于国家统计局，电力数据来源于国家统计局与中国电力企业联合会。根据各类能源生产量与碳排放因子计算得出碳排放值，其中，电力碳排放因子取自CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2017，其他能源碳排放因子通过转换因子、碳含量和碳被氧化的比例计算得出^[34-36]，取值及计算结果如表1所示。

2.2 分析方法

影响因素常用的分解方法有结构分解分析法（SDA）和指数分解分析法（IDA）（图1）。

SDA基于投入产出表研究经济与能源消费的关系，主要包括环境库兹涅茨曲线（EKC）、Kaya恒等式（包括IPAT模型和STIRPAT模型）等方法，多用于CO₂排放影响因素分析，体现为自变量对因变量的影响程度。IDA通过加法形式或乘法形式把目标变量分解为多个影响因子，加法形式主要用于各影响因素对目标变量的贡献值，乘法形式主要用于各影响因素对目标变量的贡献率，且加法形式和乘法形式可相互转化。

求解IDA常用的两种方法有拉式分解（Laspeyres）和迪式分解（Divisia）。Laspeyres分解后有残差项；Divisia模型求解较困难，常采用近似求解的算数平均迪氏指数分解法（AMDI）和对

表1 各类能源折标准煤系数、平均低位发热量及单位热值碳排放因子

| 能源名称 | 折标准煤系数 | 平均低位发热量 | 单位热值含碳量 | 碳氧化率 | 单位热值CO ₂ 排放因子 |
|------|---------------------------|------------------------|-----------|------|-------------------------------|
| 原煤 | 0.7143kgce/kg | 20908kJ/kg | 26.8tC/TJ | 94% | 92.37tCO ₂ /TJ |
| 焦炭 | | 28435kJ/kg | 29.5tC/TJ | 93% | 100.60tCO ₂ /TJ |
| 原油 | 1.4286kgce/kg | 41816kJ/kg | 20.1tC/TJ | 98% | 72.23tCO ₂ /TJ |
| 燃料油 | | 41816kJ/kg | 21.1tC/TJ | 98% | 75.82tCO ₂ /TJ |
| 汽油 | | 43070kJ/kg | 18.9tC/TJ | 98% | 67.91tCO ₂ /TJ |
| 煤油 | | 43070kJ/kg | 19.6tC/TJ | 98% | 70.43tCO ₂ /TJ |
| 柴油 | | 42652kJ/kg | 20.2tC/TJ | 98% | 72.59tCO ₂ /TJ |
| 天然气 | 1.3300kgce/m ³ | 38931kJ/m ³ | 15.3tC/TJ | 99% | 55.54tCO ₂ /TJ |
| 电力 | | 3600kJ/(kW·h) | | | 0.657tCO ₂ /(kW·h) |

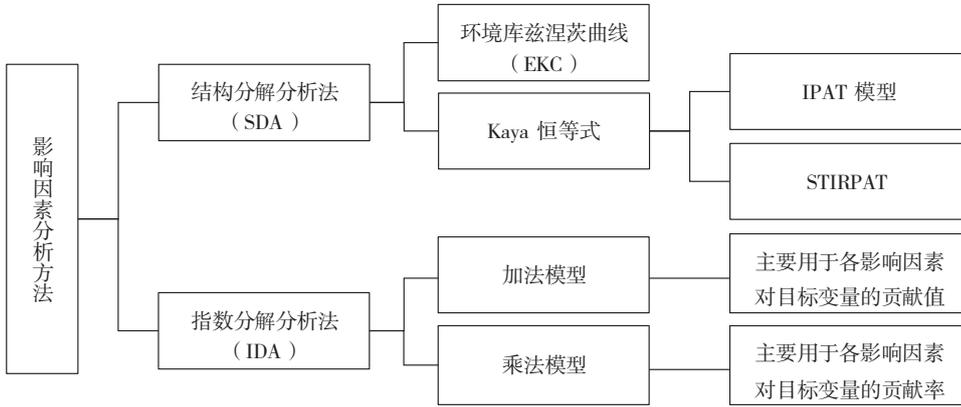


图1 影响因素分解方法

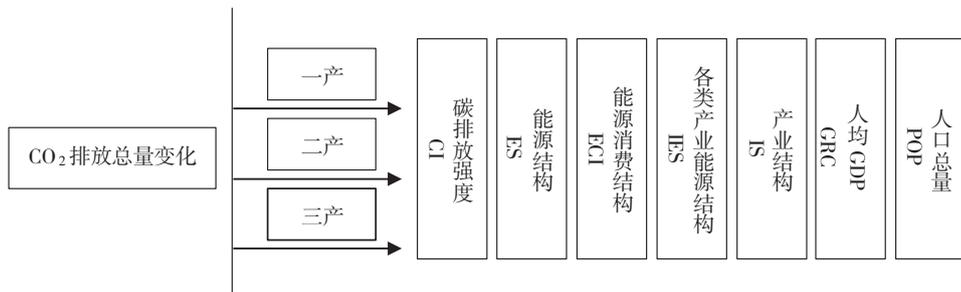


图2 模型分解示意图

应，在2010年和2015年两次达到峰值，两次达峰后的变化有所不同，2011年比2010年降低约70%，2016年比2015年降低约17%。

整体看来，2000—2019年中国碳排放量变化过程共分为四个阶段，基本上呈现以5年为一个周期。2000—2006年碳排放量逐年减少至-5399.17万tCO₂，减少了41696.69万tCO₂，2006—2010年迅速增加至138669.6万tCO₂，增长了96972.91万tCO₂，2011—2015年逐渐增加至88670.68万tCO₂，2015—

数平均迪氏指数分解法（LMDI）。

本文将SDA的Kaya恒等式与IDA中的LMDI相结合，以Kaya恒等式为基础，选用Divisia构建三层分解模型，采用LMDI近似求解，将GHG分解为碳密度（GHG/TOE）、能源强度（TOE/GDP）、人均GDP（GDP/POP）、人口总量（POP）四个基本因素，先采用加法形式对影响因素进行分解，后转换为乘法形式进一步进行分析。

2.3 计算模型与结果分析

本文构建三层LMDI分解模型，并将碳排放量分解为七个影响因素，集合的子类别等具体分解形式如图2所示。

综合考虑以上因素，得到模型：

$$C = \sum_i^3 \sum_j^4 \sum_k^9 \frac{GHG_{ijk}}{TOE_{ijk}} \cdot \frac{TOE_{ijk}}{TOE_{ij}} \cdot \frac{TOE_{ij}}{TOE_i} \cdot \frac{TOE_i}{GDP_i} \cdot \frac{GDP_i}{GDP} \cdot \frac{GDP}{POP} \cdot POP \quad (1)$$

$$= \sum_{ijk} CI_{ijk} \cdot ES_{ijk} \cdot ECI_{ij} \cdot IES_{ij} \cdot IS_i \cdot GPC \cdot POP$$

式中各变量的含义如表2所示。

以1年作为时间间隔进行计算，各产业碳排放影响因素计算结果详见表3。

从表3可以看出，中国碳排放整体呈现正效

2018年迅速下降至21009.40万tCO₂，2018—2019年基本保持稳定，其中第一产业碳减排幅度明显，第二产业碳排放有所增加，第三产业已呈现负效应，减少了0.10万tCO₂。

中国的经济发展、能源转型、“双碳”目标等均与政策有较强的关联性，五年规划是中国的长期计划，对重大建设项目、国民经济、生产力等设立目标并做出规划。根据表3呈现出的周期性，本文以5年为一个周期，分析2000—2019年碳排放的影响因素。为方便比较各个影响因素随时间变化的趋势，将LMDI加法形式计算结果按式（2）进行乘法变换，计算结果如表4所示。碳排放影响因素贡献率和贡献值分别如图3和图4所示，碳排放影响因素的整体变化趋势如图5所示。

$$I(\Delta C_k) = \frac{\Delta C_k}{\sum_k |\Delta C_k|} \quad (2)$$

从碳排放影响因素贡献率分析结果可以看出，2000—2004年能源结构对碳排放影响因素贡献率最大，2005—2009年人均GDP贡献率最大，2010—2019年人口总数贡献率最大；2000—2009年各类产业能源结构对碳减排的贡献率最大，2010—2014年

表2 分解模型各变量含义

| 变量 | 变量含义 |
|-------------|--|
| i | 产业，分别为第一产业、第二产业、第三产业 |
| j | 一次能源类型，分别为煤、石油、天然气和非化石电力 |
| k | 终端能源类型，分别为煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和非化石电力 |
| CI_{ijk} | 碳排放强度 |
| ES_{jk} | 能源结构 |
| ECl_{ijk} | 能源消费结构 |
| IES_{ij} | 各类产业能源结构 |
| IS_i | 产业结构 |
| GPC | 人均GDP |
| POP | 人口总量 |
| GHG_{ijk} | 第 <i>i</i> 个产业第 <i>j</i> 类一次能源第 <i>k</i> 类终端能源的CO ₂ 排放量 |
| TOE_{ijk} | 第 <i>i</i> 个产业第 <i>j</i> 类一次能源第 <i>k</i> 类终端能源的能源消费量 |
| TOE_{ij} | 第 <i>i</i> 个产业第 <i>j</i> 类一次能源的能源消费量 |
| TOE_i | 第 <i>i</i> 个产业的能源消费量 |
| GDP_i | 第 <i>i</i> 个产业的GDP |

表3 2000—2019年我国各产业碳排放影响因素逐年分析结果

单位：万tCO₂

| 年份 | 第一产业 | 第二产业 | 第三产业 | 总计 |
|------------|---------|-----------|-------|-----------|
| 2000—2001年 | -374.25 | 36672.09 | -0.32 | 36297.52 |
| 2001—2002年 | -935.04 | 35317.81 | -0.19 | 34382.58 |
| 2002—2003年 | 240.15 | 14470.95 | 0.26 | 14711.36 |
| 2003—2004年 | 309.49 | -8688.00 | 0.15 | -8378.36 |
| 2004—2005年 | 377.64 | -25684.18 | 0.82 | -25305.70 |
| 2005—2006年 | 164.61 | -5564.03 | 0.25 | -5399.17 |
| 2006—2007年 | 746.07 | 36185.50 | 0.72 | 36932.29 |
| 2007—2008年 | 344.63 | 61814.90 | 0.85 | 62160.38 |
| 2008—2009年 | 395.27 | 93189.20 | 0.85 | 93585.32 |
| 2009—2010年 | 1350.64 | 137317.65 | 1.34 | 138669.60 |
| 2010—2011年 | 220.90 | 41259.22 | 0.28 | 41480.40 |
| 2011—2012年 | -411.12 | 27207.13 | 0.08 | 26796.09 |
| 2012—2013年 | -401.67 | 44219.04 | 0.55 | 43817.92 |
| 2013—2014年 | -344.10 | 43778.95 | 0.08 | 43434.93 |
| 2014—2015年 | 1405.23 | 87264.46 | 0.99 | 88670.68 |
| 2015—2016年 | 1197.12 | 72406.12 | 0.90 | 73604.14 |
| 2016—2017年 | 1567.82 | 70769.09 | 0.54 | 72337.45 |
| 2017—2018年 | 557.85 | 20451.36 | 0.19 | 21009.40 |
| 2018—2019年 | 187.84 | 23150.72 | -0.01 | 23338.55 |

产业结构贡献率最大，2015—2019年能源消费结构贡献率最大。

从贡献值分析结果可以看出，能源消费结构在

2005—2009年负效应最显著，人均GDP在2005—2009年正效应最显著，产业结构在2010—2014年负效应最显著。从表3可以看出，2003—2006年第二产业对碳排放的影响因素计算结果明显与2003年前和2006年后不同，呈现负效应。主要原因是第二产业的能源消费结构和产业结构呈现明显负效应，查看原始数据发现，在此期间第二产业的汽油消耗量明显低于其他年份，其他种类能源消耗的上升或下降趋势均无特殊之处。

从图3、图4和图5可以看出，2000—2019年中国碳排放影响因素整体呈现正效应，能源结构、人均GDP和人口总数对中国碳排放呈现正效应，其中人均GDP的贡献最大；能源消费结构、各类产业能源结构和产业结构对中国碳排放呈现负效应，其中能源消费结构对碳减排的贡献最大。

3 “双碳”目标技术实施路径分析

上述计算结果表明，碳排放的显著正效应为人口总数和人均GDP，显著负效应为各类产业能源结构、产业结构和能源消费结构，碳中和的实施路径可围绕以上几个方面采取综合措施，减少对环境的负面影响，同时增强经济的可持续发展能力。本文结合节能和“双碳”的相关政策，从技术发展和财政预算两个方面，对中国达成“双碳”目标的实施路径提出建议。

3.1 能源结构与能源消费结构发展

能源结构整体呈现正效应，在2000—2004年贡献了699万tCO₂，2005—2019年较2000—2004年碳排放影响显著降低后，正效应基本稳定在100万tCO₂以下，对碳排放的影响较小，即一次能源与终端能源之间的转换、传输等能源消耗基本稳定，焦炭、原油与发电及电站供热总效率的能源加工转换效率详见表5。

从表5可以看出，从2000年到2019年，总效率

表4 碳排放影响因素贡献

| 影响因素 | 贡献值/百万tCO ₂ | | | | 贡献率/% | | | |
|----------|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 2000—2004年 | 2005—2009年 | 2010—2014年 | 2015—2019年 | 2000—2004年 | 2005—2009年 | 2010—2014年 | 2015—2019年 |
| 能源结构 | 6.99 | 0.60 | 0.36 | 0.94 | 78.63 | 6.76 | 4.08 | 10.53 |
| 能源消费结构 | 133.65 | -29.84 | -208.33 | -239.65 | 21.86 | -4.88 | -34.07 | -39.19 |
| 各类产业能源结构 | -527.87 | -2807.06 | -2185.16 | -2337.67 | -6.72 | -35.72 | -27.81 | -29.75 |
| 产业结构 | 173.19 | -96.49 | -1428.02 | -650.11 | 7.38 | -4.11 | -60.82 | -27.69 |
| 人均GDP | 2859.56 | 5686.78 | 5106.75 | 3783.64 | 16.40 | 32.61 | 29.29 | 21.70 |
| 人口总量 | 144.09 | 188.01 | 334.12 | 212.98 | 16.39 | 21.38 | 38.00 | 24.22 |

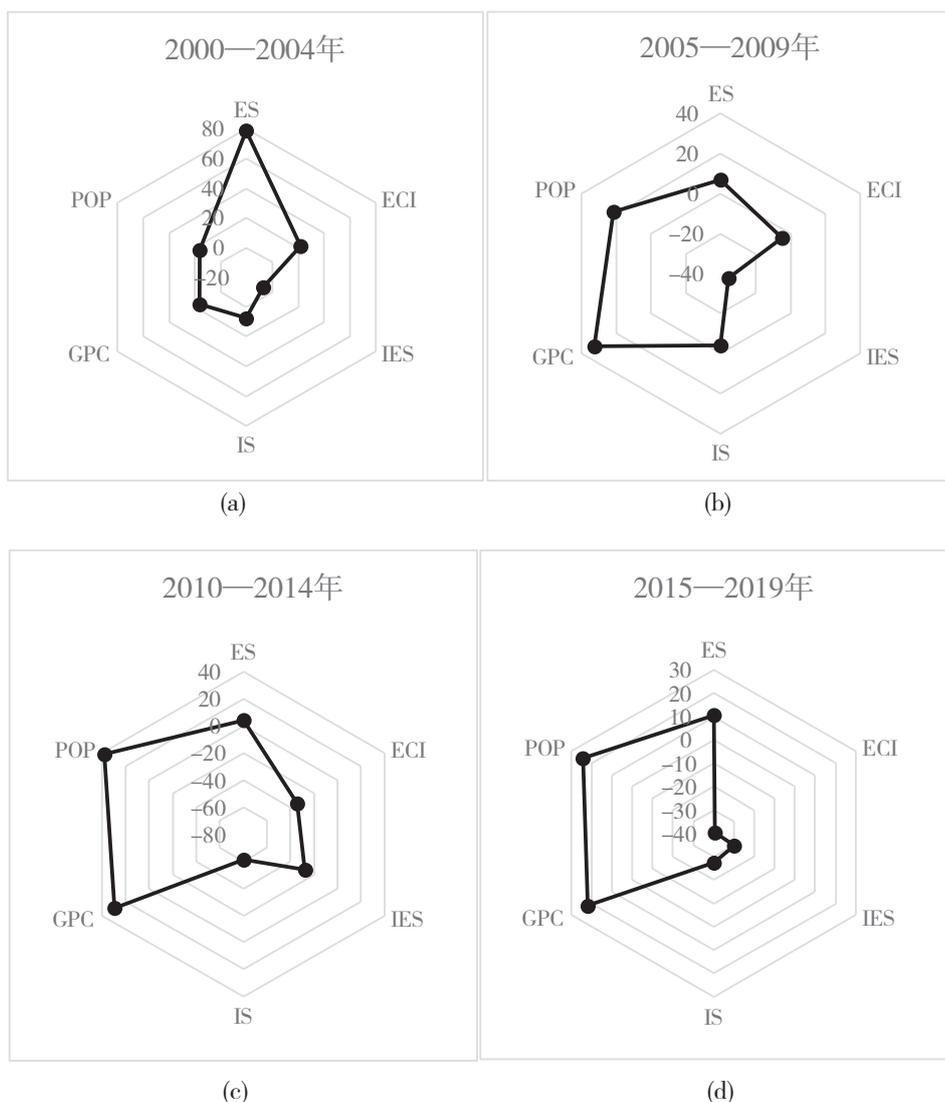


图3 中国碳排放影响因素贡献率分析结果

提高了3.9个百分点，发电及电站供热总效率提高了8个百分点，炼焦总效率降低了3.6个百分点，炼油总效率降低了2个百分点。其中，炼焦和炼油的总效率经历了先增长后降低的过程，炼焦总效率在

2008年增至98.5%后开始降低，炼油总效率在2013年增至97.7%后开始降低。

能源消费结构整体呈现负效应，在2000—2004年呈现正效应，贡献了13365万tCO₂，之后从2005年至2019年碳排放为负效应且逐渐减小，可以看出产业用能结构调整贡献逐渐增加，对碳减排产生积极影响。

目前中国一次能源以煤炭为主，约占56.8%，石油约占18.9%，天然气约占8.4%，电力约占15.9%，一次能源消耗结构详见图6。未来随着可再生能源发电比例逐渐增加，中国化石能源消耗降低。随着“煤改气”实施，天然气消耗有所增加，相应的基础设施、设备等未到改造或淘汰的年限，但主要依赖进口。因此，碳达峰前在严控煤炭增长并建立清洁能源

发电的过程中天然气用量仍将缓慢增加，碳达峰后将以绿电为主。同时电力消耗将会大幅增加，从利用化石能源发电逐步转变为电力转化为其他种类能源的结构，发电效率将会大幅提升。此外，通过

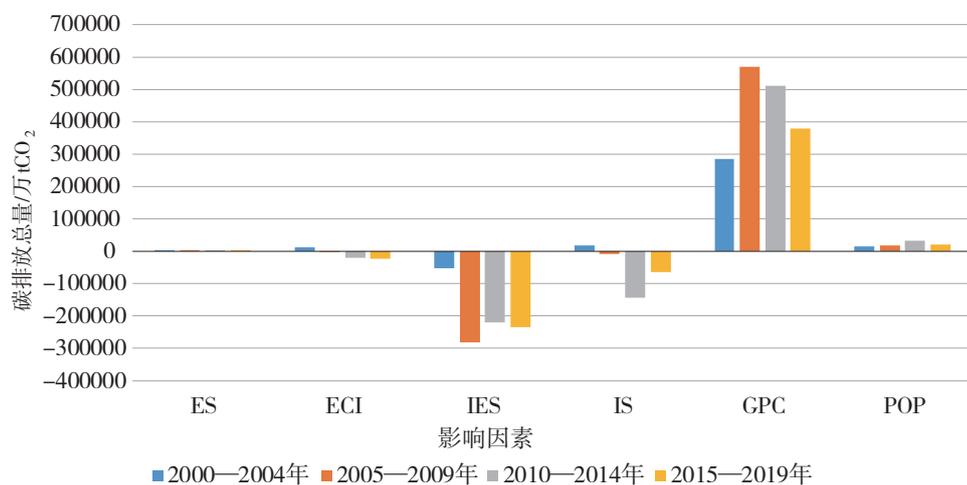


图4 2000—2019年中国碳排放影响因素贡献值分析结果

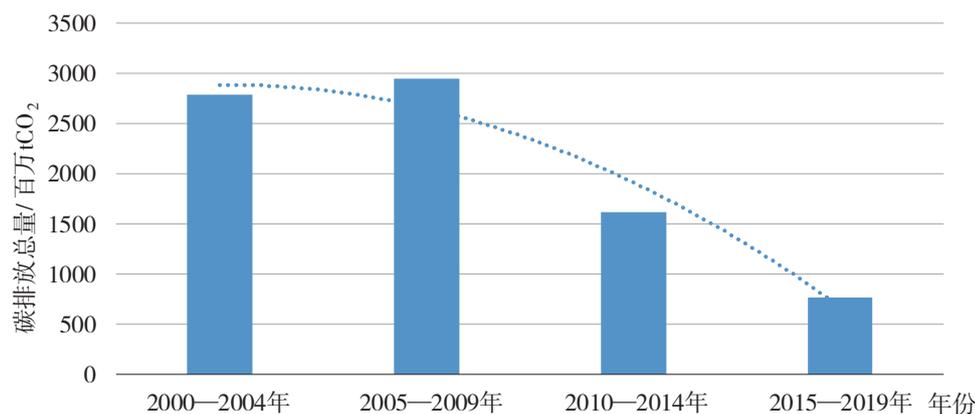


图5 2000—2019年中国碳排放影响因素总合及其趋势

采用直流用电设备、建立特高压电网等方式，电力的传输与转换效率将进一步提高，能源结构对碳排放的影响可进一步降低。

伴随能源结构调整和化石能源利用技术发展，“十四五”规划提出严控煤炭增长，采用替代燃料，并进一步改善高效利用、机组改造及热电联产，中国各类能源的碳排放因子将会减少，从而大幅度降低碳排放。

3.2 各产业能源结构与产业结构发展

各类产业能源结构整体呈现负效应且最为显著，说明经济增长稳定，同时能源消耗量减少。2005—2009年负效应最显著，能源消耗量减少了28亿t标准煤，2010—2014年减少了22亿t，或许由于GDP增速放缓，同时能源消费量有所上升，2015—2019年减少了23亿t，碳减排影响基本持平，GDP增长的同时能源消耗基本不变。

2000—2019年各产业的GDP和能源消耗量如图7所示，各产业单位GDP能源消耗如图8所示。第一产业能源消耗量最小，GDP增长缓慢，单位GDP能源消耗不到20TJ/亿元；第二产业能源消耗量最大，将近6年基本持平，GDP有所增长但增速放缓，单位GDP能源消耗约362TJ/亿元且快速下降；第三产业能源消耗量较小且有所增长，GDP快速增长，在2012年反超第二产业GDP，单位GDP能源消耗约40TJ/亿元且持续下降。可以看出降低第二产业能源消耗、增加第三产业GDP最为关键。

产业结构整体呈现负效应，能源消耗量共减少了20亿t标准煤，在

2010—2014年负效应最显著，查看原始数据发现第二产业GDP在2012年以前略高于第三产业，从2013年开始第三产业GDP增速加快，高于第二产业，如图9所示，可以看出第一产业GDP保持不变，同时降低第二产业单位GDP能耗、减少第二产业的汽油消耗量、增加第三产业GDP，可以对碳减排起到积极影响。

结合各产业能源结构及产业结构发展，可以看出第一产业可通过加大电力消耗量实现降低能源消耗的碳排放，并逐步减少第一产业GDP。第二产业可通过电气化、智能化改造、重点行业提升能源利用效率、对既有设备设施进行改造实现降低能源消耗的碳排放，同时利用政策资金支持加大太阳能、风能等清洁能源项目的市场投资，促进相关技术与产品的发展，以实现能源结构调整带动经济增长。第三产业可采用增加直流用电设备、光伏发电系统

表5 能源加工转换效率

| 指标 | 总效率/ % | 发电及电站 供热总效率/% | 炼焦总 效率/% | 炼油总 效率/% |
|-------|-----------|------------------|-------------|-------------|
| 2019年 | 73.3 | 45.8 | 92.6 | 95.3 |
| 2018年 | 72.8 | 45.5 | 92.4 | 95.6 |
| 2017年 | 73 | 45 | 92.8 | 96 |
| 2016年 | 73.5 | 44.6 | 92.8 | 96.4 |
| 2015年 | 73.4 | 44.2 | 92.1 | 96.9 |
| 2014年 | 73.1 | 43.5 | 93.7 | 97.5 |
| 2013年 | 73 | 43.1 | 95.6 | 97.7 |
| 2012年 | 72.7 | 42.8 | 95.7 | 97.1 |
| 2011年 | 72.2 | 42.1 | 96.3 | 97.4 |
| 2010年 | 72.5 | 42 | 96.4 | 97 |
| 2009年 | 72.4 | 41.2 | 98 | 96.7 |
| 2008年 | 71.5 | 40.5 | 98.5 | 96.2 |
| 2007年 | 71.2 | 39.8 | 97.5 | 97.2 |
| 2006年 | 70.9 | 39.1 | 97 | 96.9 |
| 2005年 | 71.1 | 39 | 97.1 | 96.9 |
| 2004年 | 70.6 | 38.6 | 97.1 | 96.5 |
| 2003年 | 69.4 | 38.5 | 96.1 | 96.4 |
| 2002年 | 69 | 38.7 | 96.6 | 96.7 |
| 2001年 | 69.7 | 38.2 | 96.5 | 97.6 |
| 2000年 | 69.4 | 37.8 | 96.2 | 97.3 |

自用及并网等技术，减少电力转换耗损，更高效的利用电力，同时保持GDP增长率。

3.3 经济与人口发展

人口总数对碳排放呈现正效应，贡献了8.8亿t。人均GDP对碳排放的正效应最大，贡献了174亿t，



图6 一次能源消耗结构

从2000年至2019年中国人均GDP一直处于增长态势，2017年起增速加快，但GPC的正效应有所减小，结合IES的结果可以看出，中国经济增长对碳排放的影响正在发生转变，可通过增加碳中和相关技术的投资持续提升GDP增长。

本文统计了德国、日本、美国、欧盟，以及亚洲、大洋洲等全球各类经济指标能源技术研发和开发预算，部分国家碳达峰、碳中和时间及其能源技术研发和开发预算如表6所示，从碳达峰到碳中和，德国、日本、美国、欧盟预计分别需要76年、37年、43年、60年。

德国近几年增加了氢和燃料电池、可再生能源、能源效率的技术研发和开发预算，并保留了大量的未分配预算，核能的预算主要集中在1974—1990年期间。日本近几年除化石燃料外其他的技术研发和开发预算都有所增加，特别是氢和燃料电池及其他交叉技术/研究，核能的预算主要集中在1980—2012年期间。美国2009年的总预算最高，主要投入在能源效率、化石燃料、可再生能源、其他电力和存储技术研发和开发预算，近几年大幅度增加了其他交叉技术/研究的技术研发和开发预算，此外有少量的未分配预算，核能的预算主要集中在1974—1992年期间。欧盟近几年的技术研发和开发预算基本在20亿美元上下，能源效率、可再生能源、其他电力和存储的预算占比较大。亚洲、大洋洲近几年大幅度增加了能源效率、可再生能源、氢

和燃料电池、其他交叉技术/研究、其他电力和存储的技术研发和开发预算，此外有少量的未分配预算，核能的预算主要集中在1977—2012年期间。全球的技术研发和开发预算在1980年前后和2009年以后有两

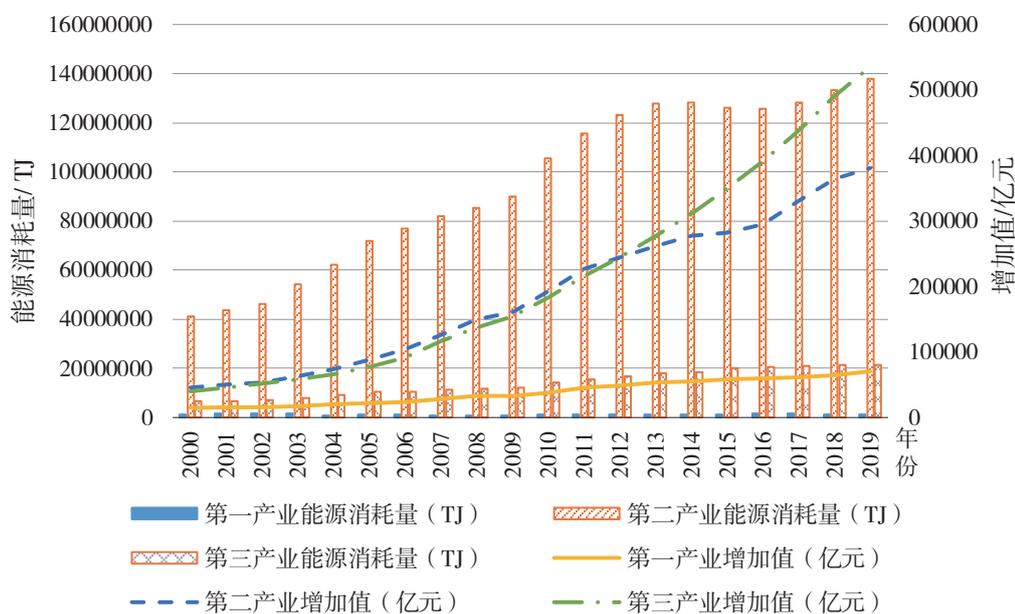


图7 各产业的GDP和能源消耗量

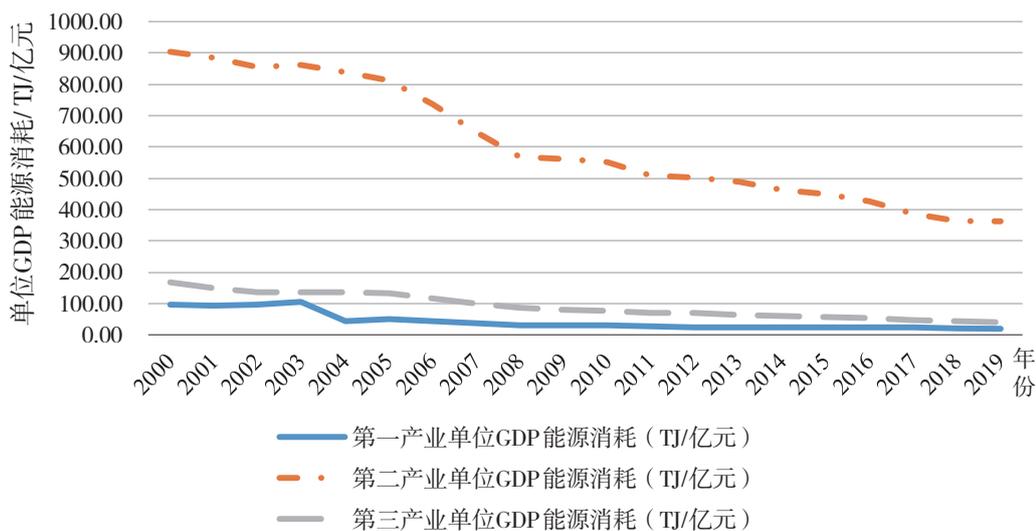


图8 各产业单位GDP能源消耗

个明显的波峰，1980年前后以化石燃料、核能的预算为主，2009以后以能源效率、可再生能源、其他交叉技术/研究的预算为主。1974—2020年部分国家及地区能源技术研发和开发预算如图10所示，按照国家进行分类的能源技术研发和开发预算如图11所示。

根据中国每年公布的全国科技经费投入统计公报及统计年鉴，中国大中型工业企业的R&D从2006年开始按照行业进行分类，主要分为采矿业、制造业和电力、热力、燃气及水生产和供应业。2006—2020年采矿业及电力、热力、燃气及水生产，以及

供应业的R&D详见表7。

在低碳发展方面的投资不仅要看减少了多少碳排放，同时也要看投入产出是否合理。通过对比可以看出，一方面，中国在低碳发展领域的R&D投入统计数据、分类方法等需要更新。虽然分类不同，但仍能看出投入金额远小于德国、日本和美国。此外，还需要统计该方面的支出所带来的收入，通过增加低碳技术、产品等方面的相关研发投入，判断中国GDP增长率的变化。另一方面，相关技术和产品研发将会创造出大量低碳就业岗位，有助于降低人口总数对碳排放总量正效应的影响。

的影响。

中国实现碳达峰和碳中和的时间较短，既需要从整体考虑也需要将碳达峰和碳中和分开考虑。参考德国、日本、美国、亚洲、大洋洲及全球30个国家的数据，从整体考虑，1974—2020年，核能、能源效率、化石燃料、可再生能源的预算占比最大，可作为重点进行研究，如图12所示。在碳达峰前，化石燃料和核能是各国的重点研究方向，在碳达峰至碳中和期间，能源效率、可再生能源和其他交叉技术/研究是各国的重点研究方向。中国

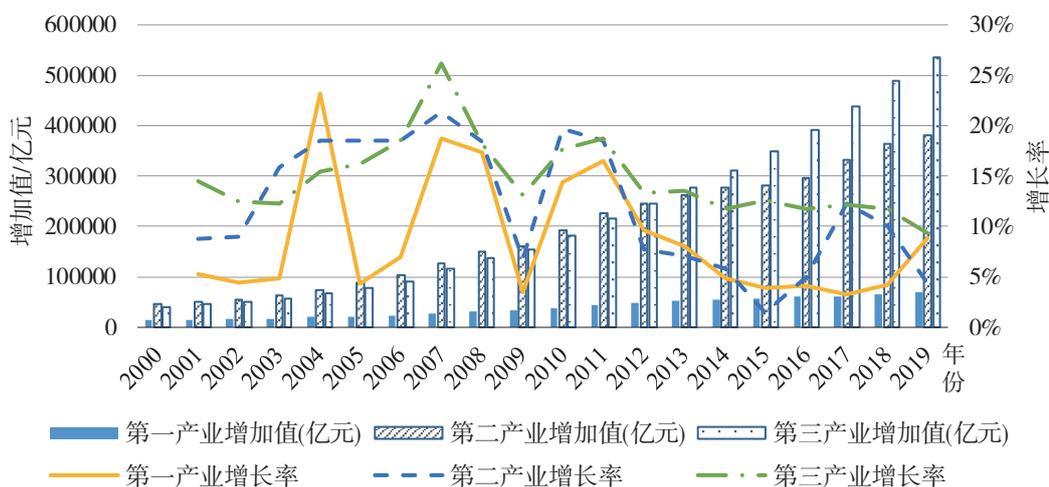


图9 2000—2019年各产业GDP及其增速

表6 部分国家碳达峰、碳中和时间及其能源技术研发和开发预算

| 国家 | 碳达峰时间 | 碳中和时间 | 1974年—碳达峰期间预算/亿美元 | 碳达峰—2020年期间预算/亿美元 |
|----|-------|-------|-------------------|-------------------|
| 德国 | 1990年 | 2050年 | 341 | 260 |
| 日本 | 2013年 | 2050年 | 1340 | 210 |
| 美国 | 2007年 | 2050年 | 1683 | 950 |
| 欧盟 | 1990年 | 2050年 | | |

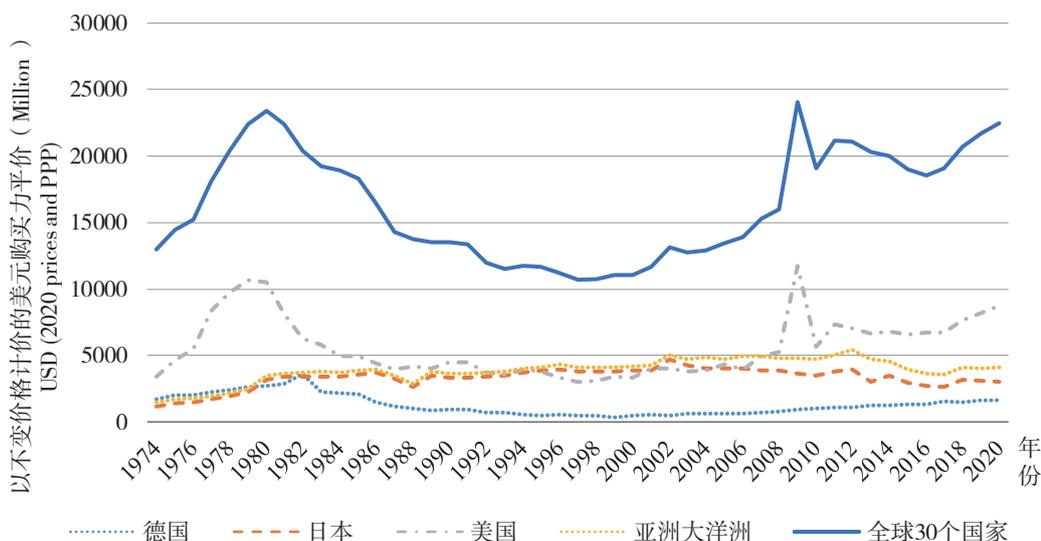


图10 1974—2020年能源技术研发和开发预算总计^[38]

能源效率、化石燃料、可再生能源为主，2031—2060年以能源效率、可再生能源和其他交叉技术/研究为主。对于氢和燃料电池的投入在碳达峰后可以适当增加，占比在5%左右。

4 结论

本文在国内外相关研究成果的基础上，将Kaya恒等式和指数分解法变形，对中国碳排放影响因素进行了逐年及以5年为周期的分析，并结合中国碳排放政策文件和国外低碳发展路径，对中国碳中和实施路径提出建议。主要结论如下：

(1)在Kaya恒等式的基础上结合三层指数分解模型，增加了产业、经济在模型中的比重，将碳排放影响因子拆分为碳排放强度、能源结构、能源消费结构、各类

“十四五”期间将能源效率、化石燃料、可再生能源、其他电力和存储技术作为重点发展方向。

中国低碳发展研究的实施路径可以按照2021—2025年以发展能源效率、化石燃料、可再生能源、其他电力和存储技术为主，2026—2030年以核能、

产业能源结构、产业结构、人口总量、人均GDP，以1年作为时间间隔进行计算，以5年为一个周期进行分析，发现中国碳排放总量在不断增长，2000—2019年增长了80.74亿tCO₂，但影响因素的正效应明显降低，减小了约80%。

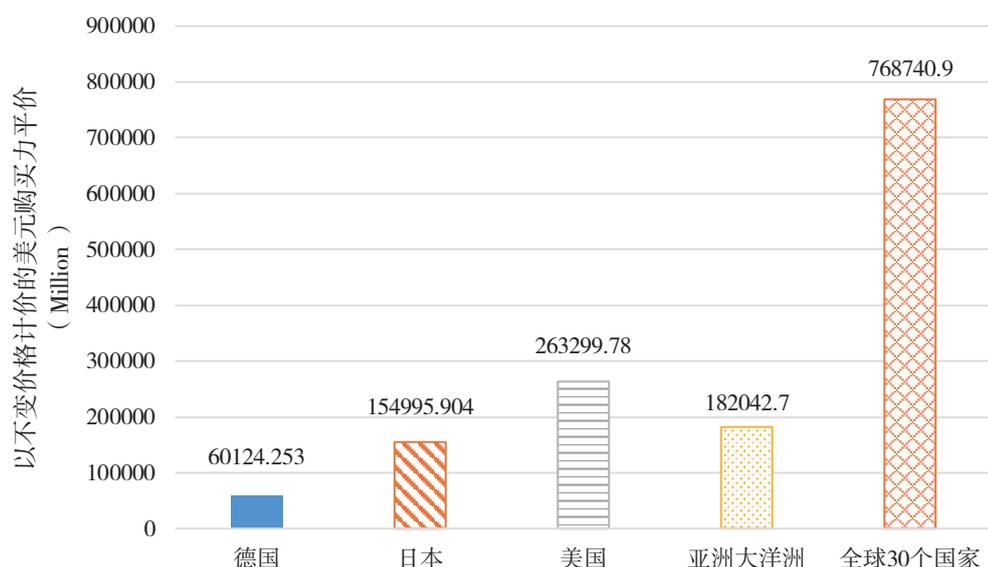


图11 部分国家及地区能源技术研发和开发预算^[38]

表7 采矿业及电力、热力、燃气及水生产和供应业的R&D

| 年份 | 采矿业 | 电力、热力、燃气及水生产和供应业 |
|-------|---------|------------------|
| | 经费投入/亿元 | 经费投入/亿元 |
| 2006年 | 62.8 | 16.0 |
| 2007年 | 82.2 | 20.7 |
| 2008年 | 108.2 | 26.7 |
| 2009年 | 170.3 | 34.2 |
| 2010年 | 209.3 | 34.2 |
| 2011年 | 252.6 | 45.9 |
| 2012年 | 280.1 | 52.1 |
| 2013年 | 292.6 | 66.0 |
| 2014年 | 290.8 | 72.6 |
| 2015年 | 269.6 | 94.3 |
| 2016年 | 267.8 | 96.6 |
| 2017年 | 281.8 | 106.4 |
| 2018年 | 294.3 | 120.4 |
| 2019年 | 288.1 | 144.5 |
| 2020年 | 294.8 | 192.7 |

(2)整体来看，人均GDP对碳排放影响因素正效应的贡献最大，能源消费结构对碳排放影响因素负效应的贡献最大；分阶段来看，2000—2004年能源结构对碳排放正效应的贡献率最大，约为79%；2005—2009年人均GDP贡献率最大，约为

33%；2010—2014年与2015—2019年人口总数贡献率最大，分别为38%和24%；2000—2004年与2005—2009年各类产业能源结构对碳排放负效应的贡献率最大，分别为-7%和36%，其中2010—2014年产业结构贡献率最大，约为-61%；2015—2019年能源消费结构贡献率最大，约为-39%。碳中和的

实施路径可侧重于减小人口总数和人均GDP对碳排放的正向影响，增大各类产业能源结构、产业结构和能源消费结构对碳排放的负向影响。

(3)结合能源结构与能源消费结构，对中国近两年的政策进行了详细分析。参考部分国外碳中和路径及计划，结合中国重点在施项目及资源禀赋，综合分析影响因素，得出以下结论：①可再生能源发电比例逐渐增加。碳达峰前在严控煤炭增长并建立清洁能源发电的过程中，天然气用量仍将缓慢增加，电力消耗将会大幅增加，随着从依赖化石能源发电逐步转向利用可再生能源发电，并进一步将电力转化为其他形式的能源，将显著提升发电效率。②通过采用直流用电设备、建立特高压电网等方式，电力的传输与转换效率将进一步提升，能源结构对碳排放的影响可进一步降低，但影响已经非常有限。③伴随能源结构调整和化石能源利用技术发展，中国各类能源的碳排放因子将会减少，从而大幅度降低碳排放。电力系统非化石能源发电量增长迅速，火力发电逐渐减少，电力碳排放因子有较大的下降空间，煤炭的碳排放因子下降趋势较明显，石油和天然气有小幅减少。通过采用严控煤炭增长，采用替代燃料，并进一步改善高效利用、机组改造及热电联产等方法，在“十四五”时期煤炭的碳排

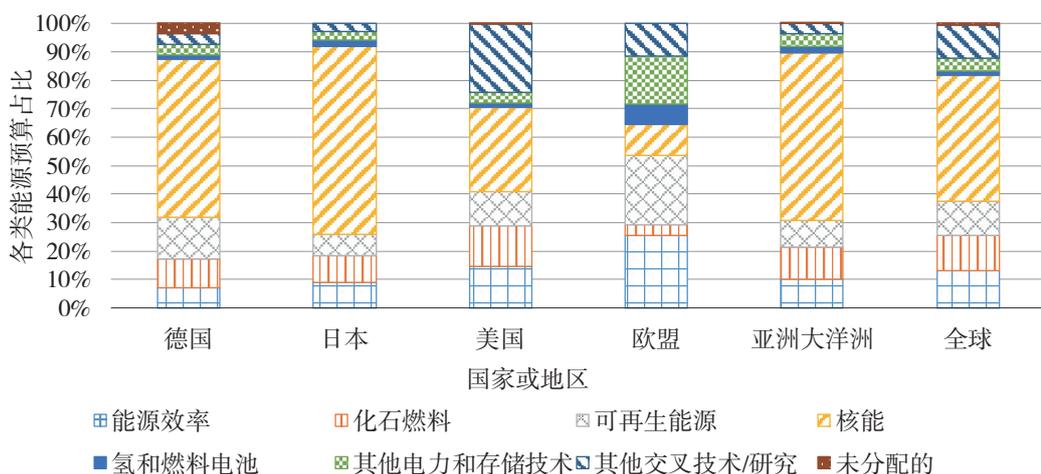


图12 各类能源技术研发和开发预算比例

少电力转换耗损，更高效的利用电力，同时保持GDP增长率。

(5)分析经济发展，结合部分国家和地区在低碳发展方面研发的预算，对中国目前的研发投入进行分析，得出以下结论：①中国低碳发展研究的

放因子可进一步降低。

(4)结合各产业能源结构及产业结构发展分析，得出以下结论：①第一产业可通过加大电力消耗量实现降低能源消耗的碳排放，并逐步减少第一产业GDP。②第二产业可通过电气化、智能化改造、重点行业提升能源利用效率、对既有设备设施进行改造等措施，实现降低能源消耗的碳排放及增加GDP，同时利用政策资金支持加大太阳能、风能等清洁能源项目的市场投资，促进相关技术与产品的发展，以实现经济增长。③第三产业可采用增加直流用电设备、光伏发电系统自用及并网等技术，减

实施路径可以按照2021—2025年以发展能源效率、化石燃料、可再生能源、其他电力和存储技术为主；2026—2030年以核能、能源效率、化石燃料、可再生能源为主；2031—2060年以能源效率、可再生能源和其他交叉技术/研究为主。②对于氢和燃料电池的投入在碳达峰后可以适当增加，占比为5%左右。③通过增加低碳技术、产品等方面的相关研发投入，实现降低能源消耗的碳排放的同时增加GDP具有可能性，此外，相关技术和产品研发将会创造出大量低碳就业岗位，有助于降低人口总数对碳排放总量正效应的影响。

参考文献

- [1] United Nations Environment Programme. Global environment outlook geo-6[R]. United Nations Environment Programme, 2020.
- [2] United Nations. The sustainable development goals report 2020[R]. United Nations, 2020.
- [3] World Meteorological Organization. United in science report: climate change has not stopped for COVID19[EB/OL]. [2024-05-07]. <https://wmo.int/news/media-centre/united-science-report-climate-change-has-not-stopped-covid19>.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL]. [2024-05-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511.html?code=&state=123.
- [5] 国家发展改革委, 工业和信息化部, 住房和城乡建设部, 等. 促进绿色消费实施方案[EB/OL]. [2024-05-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202201/t20220121_1312525.html?code=&state=123.
- [6] 国务院新闻办公室. 中国应对气候变化的政策与行动白皮书[EB/OL]. [2024-05-07]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content_5646697.htm.
- [7] 国务院. “十四五”节能减排综合工作方案的通知[EB/OL]. [2024-05-07]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5674299.htm.
- [8] 国务院. 关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. [2024-05-07]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [9] 中共中央, 国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. [2024-05-07]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [10] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于推动城乡建设绿色

- 发展的意见[EB/OL].[2024-05-07].http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/21/content_5644083.htm.
- [11]中共中央办公厅,国务院办公厅.关于深化生态保护补偿制度改革的意见[EB/OL].[2024-05-07].http://www.gov.cn/zhengce/2021-09/12/content_5636905.htm.
- [12]中共中央办公厅,国务院办公厅.关于建立健全生态产品价值实现机制的意见[EB/OL].[2024-05-07].http://www.gov.cn/zhengce/2021-04/26/content_5602763.htm.
- [13]十三届全国人大四次会议.中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL].[2024-05-07].http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [14]国务院.关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[EB/OL].[2024-05-07].http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm.
- [15]十九届五中全会.中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL].[2024-05-07].http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
- [16]国家发展改革委.国家发展改革委发布碳达峰碳中和重大宣示三周年重要成果[EB/OL].(2023-08-17)[2024-05-07].https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/stwmjs/202308/t20230817_1359890.html.
- [17]芮琦.中国碳排放影响因素及情景预测[J].科技经济市场,2023(12):46-49.
- [18]任宏洋,杜若岚,谢贵林,等.中国碳排放影响因素及识别方法研究现状[J].环境工程,2023,41(10):195-203,244.
- [19]周杰文,高翔,解佩佩.“双碳”目标下环境规制对中国绿色低碳转型发展的影响研究[J].江苏大学学报(社会科学版),2024,26(2):55-67.
- [20]要蓉蓉,郑石明,邹克.低碳试点政策传导机制及其效应:基于多维数据的实证研究[J].公共管理与政策评论,2024,13(2):131-149.
- [21]孙建卫,赵荣钦,黄贤金,等.1995—2005年中国碳排放核算及其因素分解研究[C]//江苏省环境科学学会成立30周年大会暨第6届长三角科技论坛环境保护分论坛论文集.南京:[出版社不详],2009:26-33.
- [22]王春春.基于指数分解与LEAP模型的福建省能源需求及CO₂排放预测研究[D].南京:南京大学,2019.
- [23]徐军委.中国碳排放影响因素分析及减排对策研究[M].北京:社会科学文献出版社,2016.
- [24]WU L,KANEKO S,MATSUOKA S.Driving forces behind the stagnancy of China's energy-related CO₂ emissions from 1996 to 1999:the relative importance of structural change,intensity change and scale change[J].Energy Policy,2005,33(3):319-335.
- [25]沈谦.我国能源消耗的产业特征分析[J].武汉金融,2011(3):37-40.
- [26]徐妍,张玉冰.“促进”还是“阻碍”:数字经济空间关联网络对碳排放绩效的影响[J/OL].环境科学:1-20[2024-05-07].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202311177>.
- [27]姜军,卢逸玄,牛一鸣.“双碳”背景下北京市居住建筑运行碳排放预测研究[J].工程管理学报,2024,38(2):19-24.
- [28]李健,姜佳男,董经轩.“双碳”目标下京津冀水泥业碳排放效率及影响因素研究[J/OL].天津理工大学学报:1-10[2024-05-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20240412.1557.010.html>.
- [29]胡雨朦,杨丹辉.“双碳”目标下数字化投入对我国工业碳排放的影响研究:基于LMDI分解模型的分析[J].价格理论与实践,2024(1):203-208.
- [30]孙景妍,罗佳琪,杜国红,等.北方农牧交错区碳排放时空演变及减排路径[J/OL].环境科学:1-14[2024-05-07].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202401046>.
- [31]应钰,吴纪凤,程华英.成渝地区碳足迹时空格局演化与影响因素分析[J].黑龙江环境通报,2024,37(4):19-24.
- [32]梁毅,高子涵,徐晓东,等.河北省碳排放驱动因素分析及碳减排路径研究[J].华北理工大学学报(社会科学版),2024,24(2):45-53.
- [33]何飞扬,刘天乐,周智杰,等.基于EKC理论下碳排放与经济增长的二者关系研究:浙江省与安徽省的对比分析[J].生态经济,2024,40(6):21-29.
- [34]全国能源基础与管理标准化技术委员会.GB/T 2589—2020:综合能耗计算通则[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [35]住房和城乡建设部.GB/T 51366—2019:建筑碳排放计算标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [36]国家发展改革委应对气候变化司组织国家发展改革委能源研究所.省级温室气体清单编制指南[R].国家发展改革委,2011:17,21.
- [37]ANG B W,LIU N.Handling zero values in the logarithmic mean Divisia indexed composition approach[J].Energy Policy,2007,35(1):238-246.
- [38]CARBON MONITOR.Global CO₂ emission[DB/OL].[2021-07-13].<https://www.carbonmonitor.org.cn/>.