

# “碳中和”愿景下我国碳排放现状和减排路径

刘亚莉<sup>1,2</sup>, 郭 晓<sup>2</sup>, 戴文婷<sup>2</sup>, 刘随心<sup>2</sup>, 李建军<sup>2\*</sup>

1. 西安地球环境创新研究院, 西安 710061

2. 中国科学院地球环境研究所 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061

**摘 要:** 控制以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体排放, “力争 2030 年前实现碳达峰, 争取 2060 年前实现碳中和”是我国近年来面临的重大任务。碳排放研究是实现“双碳”目标的基础和前提, 从碳排放测算、碳排放影响因素分析、行业碳排放研究三个方面对我国碳排放研究现状进行梳理, 对近年来研究的重点方向、主要成果和目前存在的主要问题进行分析, 并结合我国的“双碳”目标提出现阶段我国“以完善政策标准与加大政府扶持为基础, 以产业结构调整与新兴产业发展、能源结构调整与新能源技术发展为核心, 以探索 CCUS (碳捕集、利用与封存) 技术和增加碳汇及对居民低碳消费倾向的引导和培养为导向”的碳减排路径。

**关键词:** 碳排放测算; 影响因素; 行业碳排放; 碳减排路径; 碳达峰; 碳中和

## Carbon emission status and mitigation path under the vision “carbon neutrality” in China

LIU Yali<sup>1,2</sup>, GUO Xiao<sup>2</sup>, DAI Wenting<sup>2</sup>, LIU Suixin<sup>2</sup>, LI Jianjun<sup>2\*</sup>

1. Earth Environment Innovation Research Institute of Xi'an, Xi'an 710061, China

2. Key Lab of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

**Abstract: Background, aim, and scope** Climate change and global warming, which is caused by anthropogenic carbon dioxide emissions, is a serious threat to ecological security, food security and water security, and is a major global challenge today. As the world's largest economy, China has become the world's largest emitter of carbon dioxide since 2005. The carbon emissions from China accounted for about 30 percent of the world's total emissions in 2014. In September 2020, China announced its goal to have carbon dioxide emissions peak by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060, in order to address the climate change and global warming. Research on carbon emissions is fundamental and could provide important information in taking actions to achieve the goal. We therefore review the studies of carbon emissions in China in recent years. **Materials and methods** In this paper, we summarize the literature from the following aspects: (1) the main calculation methods of carbon emissions, the current situation and challenges of carbon emissions calculation in China; (2) the analytical methods of influence factors of carbon emissions, and the research status and deficiencies of carbon emissions influence factors in China; (3) the research progress and main shortcomings of carbon emissions from industry,

收稿日期: 2022-04-28; 录用日期: 2022-07-20; 网络出版: 2022-08-11

Received Date: 2022-04-28; Accepted Date: 2022-07-20; Online first: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977332)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41977332)

通信作者: 李建军, E-mail: lj@ieecas.cn

Corresponding Author: LI Jianjun, E-mail: lj@ieecas.cn

引用格式: 刘亚莉, 郭 晓, 戴文婷, 等. 2023. “碳中和”愿景下我国碳排放现状和减排路径 [J]. 地球环境学报, 14(6): 683–700.

Citation: Liu Y L, Guo X, Dai W T, et al. 2023. Carbon emission status and mitigation path under the vision “carbon neutrality” in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(6): 683–700.

agriculture, transportation and residents consumption field in China; (4) suggestions of the main carbon mitigation paths based on the research status of carbon emissions in China. **Results** At present, systematic calculation methods, and analytical methods of influence factors in the field of carbon emissions have been formed. China has made great progress in research on carbon emissions calculation, influence factors analysis, and carbon mitigation paths, especially in the industry, agriculture, transportation, and resident consumption fields, but it still has a few challenges and problems to be resolved. **Discussion** (1) Carbon emissions calculation has formed a system with emission factor method as the mainstream method, and carbon mass balance method, model estimation method, actual measurement method and carbon satellite remote sensing monitoring method as auxiliary methods; national carbon emissions accounting has been carried out in an orderly manner, but due to the statistical deviation and lack of statistical data over the years, carbon emissions accounting results are not authoritative; guidelines for industrial carbon emissions accounting has been issued, but they have not been effectively carried out. (2) The analytical methods of influence factors of carbon emissions include factor decomposition analysis, decoupling relationship analysis and econometric model analysis. The research perspective focuses on the national (provincial and municipal), regional, and industry levels. Economic development, population growth, industrial structure, energy structure, and technological level are considered to be the main influencing factors of carbon emissions. However, there is still lacking systematic analysis of the impact of complex factors such as historical development, climate change, geographical location and population aging, and also lacking long-time series analysis on the influence factor of carbon emissions. (3) Scientists have conducted a lot of research and discussion on carbon emissions calculation, influence factors analysis and carbon mitigation paths of industry, agriculture, transportation and residents' consumption field. Among them, more research is on industry and transportation, and less is on agriculture and residents' consumption field. The bottleneck in carbon emissions calculation is caused by the inconsistency of emission factors. Computational boundary and emission source is still the dilemma of industrial carbon emissions research. **Conclusions** China has made big progress in research of carbon emissions in recent years, which has laid a foundation to achieve carbon peak and carbon neutrality, despite there are some limitations in the research. **Recommendations and perspectives** At this stage, standardized and refined carbon emissions calculation system should be established. Also, carbon emissions from industry should be reduced to a greater extent. Lastly, the carbon mitigation path should be practiced, which is based on "consummate policy and standard, reinforce government support, implement carbon emission trading and levy carbon tax, upgrade industrial structure and adjust energy structure, develop low-carbon and new energy technologies, explore CCUS (carbon capture, utilization, and storage) technology and increase carbon sink, guide and cultivate residents' low-carbon consumption tendency".

**Key words:** carbon emissions calculation; influence factors; industrial carbon emissions; carbon mitigation path; carbon peak; carbon neutrality

18 世纪 60 年代工业革命以来, 由于人类对化石能源 (煤炭、石油、天然气等) 消耗的显著增长, 以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体排放急剧增加, 使得全球平均气温上升了约 2℃ (Allen et al., 2009)。人为 CO<sub>2</sub> 排放导致的气候变暖严重威胁着生态安全、粮食安全、水资源安全等, 是当今人类面临的重大全球性挑战。为应对气候变化, 控制温室气体排放, 全球各国做出了不懈努力。1992 年在里约联合国环境与发展大会上达成《联合国

气候变化框架公约》, 提出发达国家和发展中国家在碳减排问题上“共同但有区别的责任”原则; 1997 年在日本签署《京都议定书》, 要求发达国家确立 2020 年之前减排温室气体 20% 的目标, 但全球温室气体排放并没有得到有效控制; 2015 年在各国努力下, 进一步达成《巴黎协定》, 提出控制全球温升与工业革命前相比不超过 2℃, 力争控制在 1.5℃ 的目标, 并要求各国根据自身国情提出国家自主贡献目标 (He, 2016)。

2020年9月,我国宣布CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和的目标愿景(习近平,2020)。我国作为全球超大经济体,在2005年已经超过美国成为世界第一大碳排放国,近年来我国的碳排放量已经占到世界总排放量的30%以上。我国碳中和目标的实现,将为全球实现1.5℃温升控制目标做出重大贡献。根据《中国能源大数据报告》,2019年我国基于能源消费的CO<sub>2</sub>排放量达到 $8.89 \times 10^9$  t,全年一次能源消费量达到 $4.86 \times 10^9$  tce(吨标准煤),而其中煤炭和石油消耗占比约80%,这也是我国人为CO<sub>2</sub>排放的主要来源(王庆一,2020)。因此调整能源结构、发展绿色低碳经济、控制CO<sub>2</sub>为主的温室气体排放成为近年来研究的重大课题。其中碳排放量测算是准确掌握碳排放变化趋势、有效开展各项碳减排工作的基础和前提;碳排放影响因素分析能够衡量经济、人口、能源、技术等因素对碳排放量贡献的大小,是探究行业减排潜力和路径的有效依据。因此对碳排放的测算和碳排放影响因素进行分析是国内外一直以来研究的热点。行业作为碳排放的基本单元,是开展碳减排工作的重点和难点,准确把握不同行业碳排放的现状,对行业进行碳排放量测算和影响因素分析,针对行业排放特点制定行之有效的减排政策,近年来也备受关注。本文尝试总结目前我国有关碳排放测算、碳排放影响因素分析及行业碳排放等方面的一系列研究进展,并据此对适合我国实际的碳减排路径进行思考。

## 1 碳排放测算

### 1.1 碳排放测算方法

对碳排放量进行测算是碳排放研究的基础,测算方法的选取直接影响碳排放数据的可靠性。目前使用的碳排放测算方法主要有实测法、碳质量平衡法、模型估算法、排放因子法和碳卫星遥感法。

实测法是一种主要依据排放源现场实测数据进行碳排放计算的测算方法,该方法中间环节较少、数据结果准确,适合较小区域的碳排放测算(刘明达等,2014)。但实测法对样品采集和检测仪器的要求较高,数据获取比较困难,因此在国内的研究中使用较少。

碳质量平衡法的主要原理为投入产出遵循的

物料守恒定律,即投入某系统或设备的物料质量必然等于该系统产出物质的质量(张晶,2017)。该方法是研究生产过程中排放物的产生、排放的一种科学有效的计算方法,可以准确反映碳排放发生地的实际排放量(国家环境保护总局规划与财务司,2001;张德英和张丽霞,2005)。但采用此方法时,必须详细掌握企业的生产工艺、污染治理、管理水平等情况,数据获取相对困难,比较容易出现系统误差(郝千婷等,2011)。

模型估算法是通过构建相关数学模型进行碳排放估算的一种方法。目前主要有投入产出模型、生命周期模型、ERM-AIM/能源排放模型、MARKAL/能源系统模型、系统动力学模型、Logistic模型等。由于进行区域或行业碳排放测算时构建模型难度较大,所以该方法较多用于国家层面的碳排放测算,其中投入产出模型和生命周期模型使用较多(肖宏伟,2013)。

排放因子法是由IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)提出的一种碳排放估算方法,其基本思路是依照碳排放清单列表,针对每一种排放源构建其活动水平数据与排放因子,以活动水平数据和排放因子的乘积作为该排放项目的碳排放量估算值,是目前最为普遍的温室气体排放量计算方法。

卫星遥感法是利用碳卫星监测和模拟相结合得到净碳通量数据的方法(刘良云等,2022)。该方法主要基于碳卫星对全球大气CO<sub>2</sub>浓度进行高精度监测,并通过大气传输模型模拟出大气CO<sub>2</sub>传输过程中每一时刻、每个地方的CO<sub>2</sub>含量,最后结合碳同化系统和全球化学输送模型,同化卫星观测数值与模拟数值,最终得到净碳通量数据。卫星遥感法具有客观、连续、稳定、大范围和重复观测的优点,能够对全球、国家或地区碳含量进行高精度监测,是未来碳含量测算的有效手段。

碳排放主要测算方法的适用范围、优缺点和应用现状如表1所示,目前使用较多的是排放因子法和碳质量平衡法。排放因子法作为最普适、发展最成熟的碳排放测算方法,被广泛用于国家、区域和行业等的碳排放测算,该方法的核心是根据不同能源利用情况构建符合实际的碳排放因子,需要进行广泛的抽样调查,并编制相应的排放清单,因此抽查样本的选取、能源品质的差

异等都会对排放因子产生较大的影响,从而导致测算结果的误差。碳质量平衡法可以作为排放因子法的补充,对于一些具体工业生产过程进行物料衡算,从而得到较为准确的测算结果。值得一提的是,近年来利用碳卫星进行大气 CO<sub>2</sub> 浓度的卫星遥感监测已经成为新一代国际认可的全球碳

核查方法。我国也已经在 2016 年发射第一颗碳卫星,并于 2021 年成功获取了首个全球碳通量数据集,这标志着我国已经具备全球碳收支空间定量监测能力。下一步碳卫星也将服务于人为碳排放与生态系统碳源汇的监测,为 2028 年全球碳盘点和我国碳中和目标提供数据支撑。

表 1 碳排放测算方法比较  
Tab. 1 Comparison of carbon emissions calculation methods

方法类别 Method class	基本原则 Basic principle	适用范围 Area of application	应用现状 Application status
实测法 Actual measurement method	排放源现场实测 On-site measurement of emission sources	微观 Microscopic aspect	数据获取困难,使用较少 Data acquisition difficulties, less used
碳质量平衡法 Carbon mass balance method	CO <sub>2</sub> 排放量 = (原料中的碳 - 产品中的碳 - 其他输出物中的碳) × 12 ÷ 44 CO <sub>2</sub> emissions = (C in raw materials - C in products - C in other outputs) × 12 ÷ 44	宏观、中观 Macroscopic and middle aspects	相对简便,应用范围较广 Relatively simple, wide range of application
模型估算法 Model estimation method	投入产出模型、生命周期模型、ERM-AIM/能源排放模型、MARKAL/能源系统模型、系统动力学模型、Logistic 模型 Input-output model, life cycle model, ERM-AIM/energy emission model, MARKAL/energy system model, system dynamics model, Logistic model	宏观 Macroscopic aspect	模型构建难度大,主要用于国家层面 Modeling difficulty, mainly used at the national level
排放因子法 Emission factor method	CO <sub>2</sub> 排放量 = 活动水平数据 × 排放因子 CO <sub>2</sub> emissions = activity level data × emission factor	宏观、中观、微观 Macroscopic, middle and microscopic aspects	国际广泛应用,权威性高 Widely used internationally, high authority
卫星遥感法 Satellite remote sensing method	碳卫星监测,大气传输模型模拟 Carbon satellite monitoring, atmospheric transport model simulation	宏观、中观 Macroscopic and middle aspects	技术难度较大,国际认可 High technical difficulty, international recognition

## 1.2 我国碳排放测算现状

作为世界上最大的化石能源消费国和 CO<sub>2</sub> 排放国,准确估算我国的 CO<sub>2</sub> 排放量对制定国家减排政策和全球应对气候变化行动至关重要。国内外很多研究机构对我国的碳排放数据进行了年际连续核算,图 1a 分别是我国碳核算数据库(CEADs)、世界银行(WB)数据库、美国能源信息管理局(EIA)、联合国气候变化框架公约(UNFCCC)数据库以及全球大气研究排放数据库(EDGAR)对我国近 30 a 的碳排放核算结果。整体来看,各机构对我国碳排放核算的年际趋势高度一致,在 2002 年之前,我国碳排放的增长较为缓慢,年均增速基本在 5% 以内,到 2002 年,碳排放量在 4 × 10<sup>9</sup> t 左右,约占世界总排放量的 15%;2002—2014 年我国碳排放量迅速增长,年均增速近 10%,到 2014 年,碳排放量基本达到 1 × 10<sup>10</sup> t,占世界总排放

量的比例迅速升至 30% 左右;2014 年后增速逐渐放缓,与全球碳排放增速趋同,年排放量达到 1 × 10<sup>10</sup> — 1.2 × 10<sup>10</sup> t。

我国分别于 1994、2005、2010、2012 和 2014 年开展了五次国家级的碳排放核算工作。根据《国家信息通报》,五年基于能源利用的 CO<sub>2</sub> 排放量分别为 2.8 × 10<sup>9</sup> t、5.4 × 10<sup>9</sup> t、7.62 × 10<sup>9</sup> t、8.69 × 10<sup>9</sup> t 和 8.93 × 10<sup>9</sup> t (图 1b),与中国科学院碳专项、UNFCCC 数据、CEADs 数据、EIA 数据、二氧化碳信息分析中心(CDIAC)数据及 EDGAR 报告的我国能源利用碳排放的五年核算结果相比,各机构报告的结果差距最高接近 20% (Liu et al., 2015)。主要是由于近年来我国整体能源消费结构的变化、燃料技术的改进、各行业工程工艺的提

数据设计, 并不完全适用我国目前的碳排放情况, 从而导致国际数据均出现不同程度的低估。加之我国历史统计数据的缺失, 以及各省能源消费历史统

计数据存在偏差等问题, 导致我国目前尚没有官方的具有国际权威性的年际连续碳排放核算数据, 使得我国基于碳排放的研究工作进展缓慢。

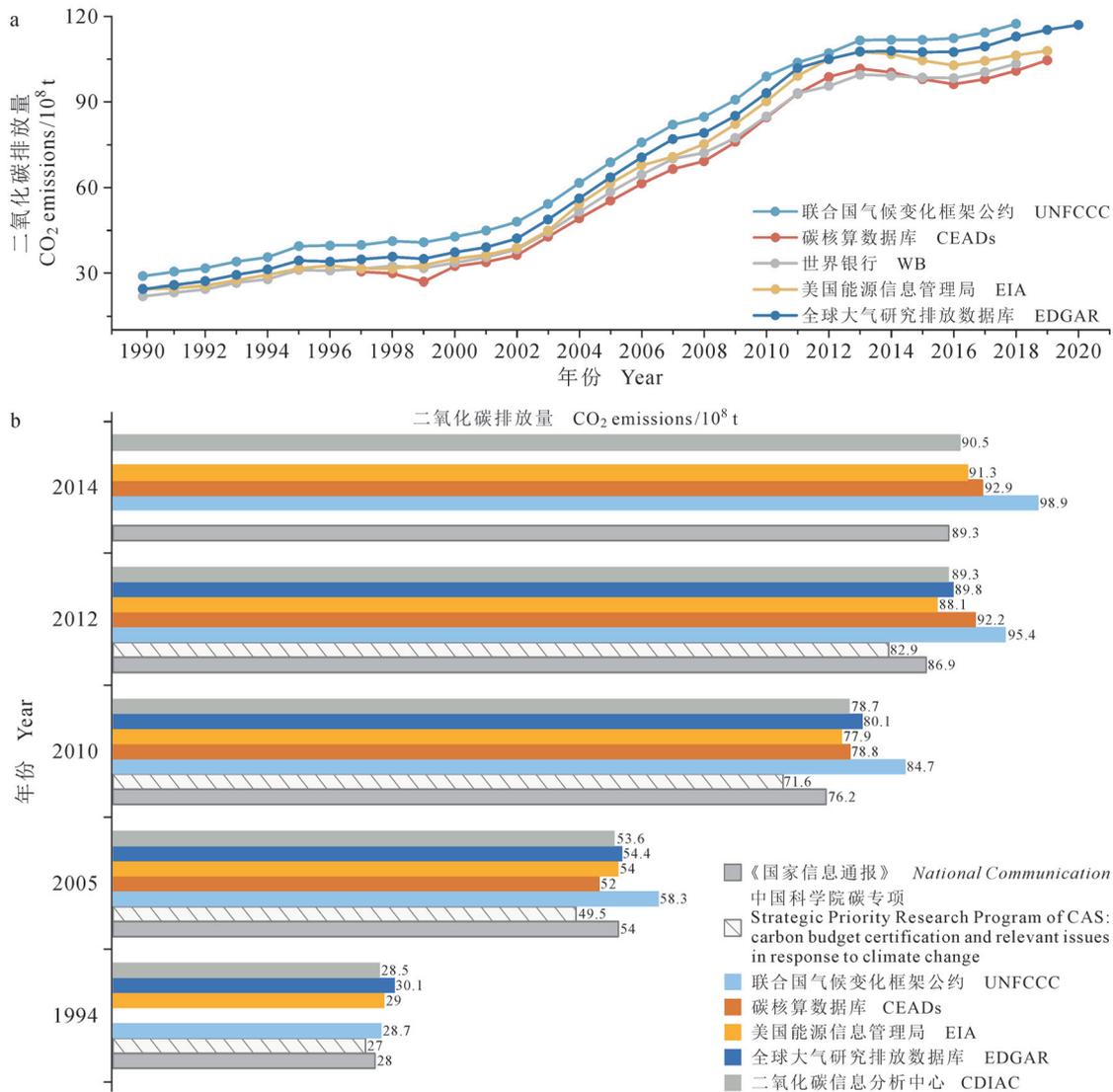


图1 我国1990—2020年碳排放核算结果(a), 能源利用碳排放核算结果数据比较(b)  
Fig. 1 Accounting results of China's carbon emissions from 1990 to 2020 (a), comparison of institutional data of carbon emissions accounting results of energy utilization in China (b)

行业碳排放测算作为碳排放核算工作的重要部分, 目前基于国际标准 ISO 14064, 国家发改委分别于2013、2014、2015年发布了共计24个行业温室气体排放核算指南。但目前对行业碳排放的测算研究大多集中在企业层面, 不同企业在碳排放因子、测算边界和测算周期等选择上尚没有统一标准, 因此测算结果的不确定性较大, 很难具备可比性和普适性。如水泥行业工艺不断改革提升, 水泥碳排放因子和水泥熟料比不断下降, 利用国际机构

的碳排放因子核算会出现明显高估, 有研究指出基于我国实际水泥熟料生产数据估算的水泥行业CO<sub>2</sub>排放比国际机构的估算结果降低了30%以上(Liu et al., 2015); 钢铁行业中不同企业工艺工序的不同, 导致排放因子的选择差异较大; 交通运输行业因其系统庞杂和移动碳源的特点, 对碳排放进行精确测算的难度很大, 且大多集中在静态研究, 很难反映动态变化; 农业碳排放测算不仅需要考察农业生产过程的碳排放, 也要考虑农作物生

长产生的碳吸收等。这些因素导致行业碳排放因子难以统一，加之各种碳排放实测技术的研发和应用工作也进展缓慢，导致全国性的行业温室气体排放核算工作仍未有效开展。现阶段我国面临的碳减排压力不断增大，构建适合我国国情的碳排放清单，规范统计口径，统一核算边界，确保碳排放核算工作全面有效开展，将是我国实现“双碳”目标的基础和首要挑战。

## 2 碳排放影响因素研究

### 2.1 碳排放影响因素分析方法

碳排放影响因素分析主要通过构建相应的模型，探讨碳排放与各类影响因素之间的作用关系，进而有效分析各类影响因素贡献的大小。碳排放影响因素分析方法一般可以分为三类：因素分解分析、脱钩角度分析和计量经济学模型分析（佟新华等，2020）。

因素分解法是探讨碳排放问题中使用最广、最切实有效的一种分析方法，主要分为结构分解法（structural decomposition analysis, SDA）和指数分解法（index decomposition analysis, IDA）。结构分解法以投入产出表为基础，通过将经济系统中某因变量的变动分解为相关自变量变动和衡量各自变量对因变量变动的贡献，是一直以来分析能源环境问题的重要工具（范凤岩和雷涯邻，2015）。指数分解法分为 Laspeyres 指数法和 Divisia 指数法，相较结构分解法更适用于分解含有时间序列数据和含有较少因素的模型，在环境经济研究中得到广泛使用。目前因素分解分析常用的有 LMDI 模型、SDA 模型和 STIRPAT 模型（Du et al., 2018; Yang et al., 2018）。

脱钩分析法主要通过脱钩指数来体现环境污染与经济发展联系的紧密程度。脱钩理论首先由 OECD（经济合作与发展组织）提出并应用于农业政策研究，20 世纪末开始被广泛用于分析碳排放和经济发展之间的关系（王天庆等，2020）。Juknys（2003）将脱钩状态划分为初级脱钩、次级脱钩和双重脱钩三种。Tapio（2005）首次提出“脱钩弹性”概念，并进一步将脱钩状态细分为弱脱钩、强脱钩、弱负脱钩、增长负脱钩、增长连接、衰退脱钩与衰退连接等八种。目前常用的脱钩模型有 EKC 模型和 Tapio 模型（Luo et al., 2017）。

计量经济学模型也可用于探讨碳排放与各类

影响因素之间的关系，近年来被广泛应用（任晓航等，2015）。常用的模型包括 VAR 模型、VECM 模型、ARDL 模型和 Granger 因果分析模型等（Chen et al., 2019）。

### 2.2 我国碳排放影响因素研究现状

碳排放量的变化通常被认为是经济、技术、人口、能源等因素的共同作用，我国目前的碳排放影响因素分析中，LMDI 分解法和 STIRPAT 模型是应用最广泛的两种模型。LMDI 方法是一种指数分解方法，其在驱动因素的分解过程中可以有效避免残余项，并且能够包容数据零值，分解结果简单易懂；STIRPAT 模型主要是利用对数恒等式来评估人口规模、技术水平和富裕程度等因素对环境压力的影响，在实际运用中也可根据所关注的重点因素对等式进行扩展和分解，应用方便灵活。

目前对我国碳排放影响因素的探讨一般基于三类研究层面。一是集中在省、市等行政区划层面。如胡艳兴等（2016）认为总人口变化量是省域碳排放量变化的主要正向影响因素，其影响程度从东北到西南逐渐降低，且总人口每变化 1%，碳排放量相应变化 0.5358%；唐赛等（2021）对我国主要经济区典型城市碳排放的研究则认为，人均收入水平和能源强度是其主要影响因素，城市人口的影响相对有限。二是集中在主要经济区等地域划分层面。京津冀和长三角等人口密集、工业和能源消费聚集的地区，技术水平和能源结构对碳排放的影响较大（李建豹等，2020；张丽峰和刘思萌，2021）；东北三省作为我国的老工业基地，仍呈现出粗放型经济增长模式，产业结构调整是提高碳排放效率的主要影响因素（姜博和马胜利，2020）；随着我国经济一体化进程的推进和中部崛起战略的实施，中部六省近年来工业发展迅速，经济发展成为影响该地区碳排放的主要因素（刘传江等，2013）。三是集中在工业、农业、交通运输等行业划分层面。工业是我国能源 CO<sub>2</sub> 排放的主要行业，研究认为工业活动和能源强度分别是导致碳排放增加和减少的主要因素（Ouyang and Lin, 2015）；农业碳排放虽然呈现比较显著的地区差异，但农业产业结构优化、农业人口整体减少等因素通常被认为会抑制农业碳排放量增长，而农业经济发展则会增加农业碳排放量（胡婉玲等，2020）；交通碳排放则与机动车保有量、人均 GDP、货运及客运周转量呈明显

的正相关关系(曾晓莹等,2020)。近年来,以碳排放控制为目标,很多研究者开始将影响因素分析与脱钩分析相结合来探讨经济增长和碳排放之间的脱钩状态,分析不同影响因素对脱钩的贡献大小。如吴茜和陈强强(2023)在甘肃省行业碳排放影响因素和脱钩努力分析中指出,能源强度效应脱钩努力最高,而人口规模效应脱钩努力最低。魏营和杨高升(2018)对镇江市6个重点工业行业的脱钩因素进行研究,得出经济规模效应是所有行业的脱钩抑制因素。

通过分析现有碳排放影响因素的研究发现:目前比较有代表性的研究结论主要包括经济驱动论、技术抑制论和阶段贡献论等,即认为经济发展是碳排放增加的主要贡献因素,技术进步是抑制碳排放增加的主要贡献因素,而且各个因素在不同时期的贡献大小不同。这些研究中因素分解的重点大多集中在经济发展、人口增长、产业结构、能源结构、能源强度、技术水平等方面,较少考虑历史发展、气候变化、地理位置,以及现阶段面临的人口老龄化等难以量化的复杂因素对碳排放的作用;而且现阶段研究的时间序列大都在10a范围内,缺少长时间序列的研究,难以得出不同因素在长期的不同经济社会形态下对碳排放影响的动态变化,以及各影响因素在长期和短期范围内对碳排放影响的差异。后续研究需要多关注一些复杂影响因素的作用,并考虑不同因素在长期范围内对碳排放影响的动态变化,这对提出针对性的减排控制路径具有积极作用。

### 3 行业碳排放现状与研究进展

行业作为碳排放的基本单元,是开展针对性碳减排工作的重点。如图2所示:工业行业是我国碳排放的主要来源,包括电力、钢铁、水泥、化工(石化化工和煤化工)和有色金属行业(铝冶炼)等;交通运输行业、居民消费和农业行业虽然排放占比不高,但与居民生活息息相关,近年来也成为了碳排放研究的热点。下文将从工业(含发电、钢铁、水泥、化工、有色金属等)、农业、交通运输业、居民消费等碳排放主要行业对我国现有研究进行评述。

#### 3.1 工业

工业行业是我国国民经济增长的支柱产业,同时也是最主要的碳排放行业,约占我国碳排放总量的70%—80%。相较发达国家在20世纪80年

代基本实现工业行业碳达峰的现状,我国的工业行业碳排放仍呈持续增长态势,这对我国实现“双碳”目标提出了巨大挑战(郭朝先,2014)。经济发展水平、能源消费结构、能源消费强度、产业结构、要素禀赋、对外开放、城镇化率等均对工业碳排放产生明显影响(郝珍珍和李健,2013)。其中经济发展水平、对外开放和要素禀赋等对碳排放具有正向冲击,而能源消费结构和产业结构等对碳排放的影响并不稳定,主要取决于地区工业发展状况(韩晶等,2015)。对我国工业行业碳排放达峰情景的预测显示,若延续当前的减排政策,只有轻工和石油等少数行业能够实现2030年达峰;只有在实施更严格的低碳发展模式下,我国工业行业才可以实现2030年全面达峰的目标;在追求经济增长的高耗能发展模式下,则到2040年左右才有可能实现碳达峰(袁晓玲等,2020)。对于能源、冶炼、电力等国民经济基础产业,需要以能源结构调整和能源效率提升为减排重点,对于轻工、医药、制造等产业则应注重产业结构优化调整和技术改造升级(田华征和马丽,2020)。工业园区作为工业发展的重要载体,贡献了全国工业产值的50%以上,CO<sub>2</sub>排放的30%以上,因其集聚性和规模性的优点,有望成为工业碳减排的先驱力量。研究显示,工业园区在2015—2050年预期可实现60%以上的减排幅度(郭扬等,2021),因此促进工业园区低碳化发展也将为工业碳减排发挥积极作用。

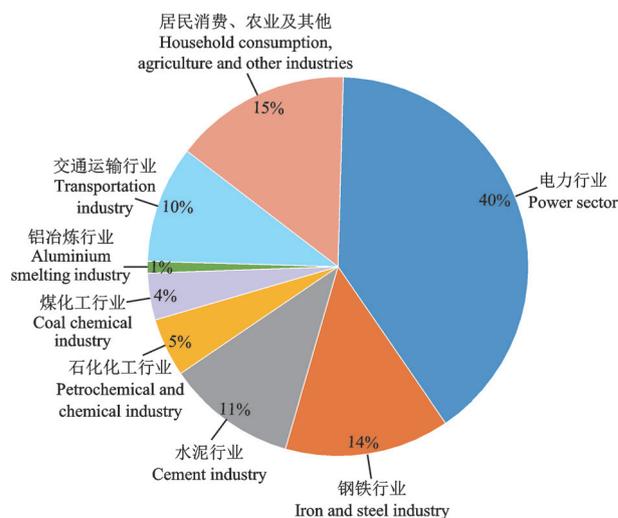


图2 我国二氧化碳排放来源(严刚等,2022)  
Fig.2 Sources of carbon dioxide emissions in China  
(Yan G et al., 2022)

### 3.1.1 电力行业

电力行业是我国最大的煤炭消费和碳排放行业,煤炭消费量占全国总量的 50% 以上,碳排放量占全国碳排放总量的 40% 以上,且碳排放至今仍处于不断增长阶段(李洪言等, 2020; 国家统计局, 2021)。人均 GDP、人口规模、产业结构、居民用电强度等被认为是电力行业碳排放增长的主要正向驱动因素,而化石能源发电结构、化石能源消耗系数、火电比重、工业用电强度等被认为是主要的负驱动因素(玉琦彤, 2021; Li et al., 2021)。其中人均 GDP 是电力行业碳排放增长的最大正向驱动因素,贡献率达到 94.29%,化石能源消耗系数则是最大负驱动因素,贡献率达到 21.72% (Li et al., 2021)。解振华等(2020)预测在不同政策情景下电力行业碳排放均可实现在 2025—2030 年达峰,若要实现 1.5℃ 的温控目标,2030 年后需要更大的减排力度才能实现 2050 年净零排放的目标,届时非化石能源总装机将达  $5.9 \times 10^9$  kW,其发电量将占总电量的 90% 以上。目前我国尚处在工业化发展阶段,GDP 的增长仍依赖能源消费的增长,因此电力行业的发展目标应是在满足电力需求的同时减少碳排放,碳排放的控制路径应主要是大力发展风电和光伏发电等低碳能源(朱法华等, 2021; Jin et al., 2021)。目前我国电力行业碳排放增长也存在着比较明显的省际差异,需要选择差异化的减排着力点,对于西南和东南等地区应注重提质增效、调控经济增速;东北地区应聚焦降低火电能耗强度,着力发展非化石电力;西北和中部地区则应侧重于降低用电强度(Liao et al., 2019, 何迎等, 2020)。

### 3.1.2 钢铁行业

我国是钢铁生产大国,根据 WSA(世界钢铁协会)的统计数据,我国 2020 年上半年的粗钢产量约  $4.99 \times 10^8$  t,占全球钢铁产量的 57.2% (高春艳等, 2021)。钢铁行业资源能源密集,能源资源消耗和工业过程中产生的碳排放约占我国碳排放总量的 14%。对钢铁行业的核算数据显示,碳排放量在 2010 年前呈快速增长趋势,随后增速逐渐放缓,2014 年前后已经进入平台期(李明煜等, 2021)。工业增加值碳强度和能源消耗强度是影响钢铁行业碳排放量的主要因素,研究认为两者每增加 1% 分别会使碳排放增加 0.686% 和 0.251% (何维达和张凯, 2013)。因此,适度缩小我国

钢铁工业的发展规模,实现粗放型增长方式向技术推动型方式的转变;减少以煤为主的能源消费结构,发展清洁能源技术,增加清洁能源的比例结构;重视突破性技术工艺的发展,提高能源消耗经济效益强度是实现全国范围内深度脱碳减排的核心。

### 3.1.3 水泥行业

我国是水泥生产大国,自 1985 年起水泥产量稳居世界第一。2020 年我国水泥产量约为  $2.4 \times 10^9$  t,约占全球总产量的 55%,同时水泥产业碳排放量达到  $1.4 \times 10^9$  t,这些碳排放主要来源于水泥生产过程中的碳酸盐分解和煤炭燃烧(付立娟等, 2021)。水泥行业碳排放量的主要影响因素有单位水泥碳排放强度和水泥熟料的产量。据估算,2009—2020 年,我国水泥熟料产量的增长导致行业碳排放从  $9.71 \times 10^8$  t 增至  $1.375 \times 10^9$  t(世界可持续发展工商理事会和国际能源署, 2010)。自 2003 年起我国水泥窑炉工艺不断改进,目前我国水泥企业全部采用新型干法生产技术,每吨水泥和水泥熟料 CO<sub>2</sub> 排放量分别降至 616.6 kg 和 865.8 kg,整体工艺已处于国际先进水平(丁美荣, 2021)。随着水泥生产工艺的不断改进,水泥行业的碳排放量自 2012 年增长逐渐放缓,2014 年左右到达峰值后处于波动趋势(李明煜等, 2021)。随着市场需求的增长,水泥行业通过现有的节能减排和原料替代技术的碳减排空间十分有限,未来应主要以能效提高、熟料替代、原材料及燃料替代为主,兼顾余热发电、CCUS 技术的减排实施路径(付立娟等, 2021)。

### 3.1.4 化工行业

化工行业是指以石油、天然气、煤炭和生物质等为原料进行化学加工的产业,化工行业碳排放虽然总量有限,但由于行业技术水平限制、高附加值产品比重偏低、精细化率不高等导致碳排放强度比较突出。以 LMDI 模型分析化工行业碳排放影响因素发现,经济增长和行业规模是导致碳排放持续增长的主要因素,而能源效率和行业结构对碳排放则有一定的抑制作用(武振华, 2018)。其中煤化工和石化化工是化工行业高耗能、高碳排放的主要贡献者。近年来煤化工规模由于我国“富煤贫油少气”的能源结构和资源禀赋而得以稳步增长,2019 年我国煤化工行业耗煤量达到  $9.68 \times 10^8$  t,CO<sub>2</sub> 排放总量达到  $5 \times 10^8$  t,吨

产品 CO<sub>2</sub> 排放量高达 3—11 t, 其中煤制氨、煤制甲醇、煤焦化和煤制烯烃等贡献了绝大多数的碳排放。金玲等(2022)分析我国煤化工行业碳达峰路径指出:通过全面控制现代煤化工发展规模、优化原料结构和用能结构、提升能效水平等可以实现我国煤化工行业碳排放量在 2025 年达到峰值,约为  $6.31 \times 10^8$  t。石化化工行业是为经济建设提供必要能源与材料的基础产业,尽管近年来一直致力于以“企业规模大型化和炼化一体化”进行产业升级,但由于炼油规模和乙烯产能的规模化增长,导致碳排放仍呈现持续增长态势(李健和李海霞,2020)。在持续控排情景下,我国石化化工行业基本可以实现 2028—2030 年达峰,通过能源清洁化改造和可再生能源替代、节能和低碳技术改造、低碳循环及高效利用等途径,到 2030 年可实现约  $2.6 \times 10^8$  t 的碳减排量(庞凌云等,2022)。

### 3.1.5 有色金属行业

有色金属行业属于能源密集型行业,主要可分为采矿、选矿、冶炼和加工工业。有色金属工业协会数据显示,2020 年我国有色金属行业的 CO<sub>2</sub> 排放总量约  $6.6 \times 10^8$  t,有色金属冶炼行业 CO<sub>2</sub> 排放量约  $5.88 \times 10^8$  t,其中铝冶炼行业的排放量接近  $5 \times 10^8$  t,是有色金属行业的碳排放大户,因此铝冶炼行业是有色金属行业实现“双碳”目标的主要着力点(刘楠楠等,2021)。我国是全球最大的电解铝和氧化铝生产国,产量分别占全球总产量的 57% 和 54%,而且铝及其合金生产的碳排放强度较高,单位产品的碳排放分别是钢和铜的 12.4 和 2.3 倍,导致铝冶炼行业减排压力非常大(Das,2012)。其中电解铝的生产会产生大量碳排放,由于工艺技术限制,我国生产单位电解铝的碳排放量约为美国的 2 倍,而单位再生铝的碳排放量仅为原铝的 4.5% 左右,因此控制电解铝产能,发展再生铝产业是减少碳排放的重要途径(丁宁等,2012)。铝冶炼工艺技术的发展,如惰性阳极技术、余热回收利用技术等,也是碳减排的重要手段(Brough and Jouhara,2020)。通过控制电解铝产能、清洁能源替代、工艺技术革新等途径,我国铝冶炼行业有望在 2030 年实现达峰,峰值碳排放量在  $5.3 \times 10^8$ — $6.4 \times 10^8$  t,其中电解铝的产量控制是铝冶炼行业峰值的关键(王丽娟等,2022a)。

## 3.2 交通运输业

交通运输业作为我国的国民经济支柱产业,是能源消费碳排放的主要碳源之一,近年来,交通运输行业碳排放依然呈现持续快速增长态势,有预测认为这种高速增长将持续到 2030 年。根据我国能源数据报告,2018 年交通部门能源消耗量  $4.96 \times 10^8$  tce,据推算其直接 CO<sub>2</sub> 排放达到  $9.8 \times 10^8$  t。其中道路运输对碳排放增长的贡献最大,达到 73.5%;汽油和柴油产生的 CO<sub>2</sub> 排放占比最高,分别达到 39.0% 和 49.6%(袁志逸等,2021)。交通碳排放也具有明显的区域特征,东部地区 CO<sub>2</sub> 排放量最高但排放强度最低,西部地区 CO<sub>2</sub> 排放强度最高且排放增长最快(Guo et al.,2014)。从交通类型来看,铁路、公路、航空及管道运输碳排放量主要受到投资规模的影响,而影响水路运输碳排放量的主要因素是运输规模(王勇等,2019)。从地区来看,在东部地区,经济活动和人口因素共同导致 CO<sub>2</sub> 排放增加,能源强度则是主要减排因素,能源结构影响不大;而在中西部地区,经济活动和能源强度均导致 CO<sub>2</sub> 排放增加,人口和能源结构对碳排放影响不大(Guo et al.,2014)。根据目前的交通碳排放现状,在全球 1.5℃ 的增温控制目标下,交通运输需要在 2050 年基本实现净零排放(Jiang et al.,2021)。优化交通运输结构是减少交通碳排放的重点,高铁运行与公路车辆行驶和航空运输相比,可分别减少 10%—60% 和 46%—73% 的温室气体排放量(Chang et al.,2019)。提升交通工具能效、发展替代燃料技术、提高汽车燃油经济性标准、促进电动汽车技术进步和市场拓展等也是实现碳减排的有效手段(Wang et al.,2017; Peng et al.,2018)。

## 3.3 农业

相较工业等行业来说,对农业碳排放的关注相对较少。但有研究表明农业活动会排放大量 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 等温室气体,可以占到全球人为温室气体排放总量的 21%—25%,在我国这一比例约为 17%(李波等,2011)。农业活动温室气体排放的主要途径有农业废弃物、肠道发酵、粪便管理、农业能源利用、稻田以及生物质燃烧几个方面,其中 CO<sub>2</sub> 排放量约占总排放的 25% 左右(Johnson et al.,2007)。近年来,由于农药和化肥等农用物质的大量使用,农业活动碳排放不断

增加,直至 2015—2016 年达到峰值并逐渐呈现降低趋势,其中“减肥减药”政策对农业碳排放的减少起到了积极作用(胡婉玲等,2020)。从时间维度来看,我国农业碳排放的主导因素经历了从农业经济结构主导到农业机械化主导再到农业经济发展水平主导的转变,现阶段农业经济发展逐渐成为农业碳排放的主要影响因素;从空间维度来看,农业经济发展水平和机械化水平对农业碳排放的主导性由西向东减弱,农业经济结构对农业碳排放的主导性东部最强,中部最弱,农业经济规模对农业碳排放的主导性西部最强,中部最弱(何艳秋和戴小文,2016;旷爱萍和胡超,2021)。由于区域农业发展条件和农业产出区域差异的不断扩大,我国农业碳排放的空间差异近年来也呈不断扩大的趋势,因此我国的农业碳减排应该实施差异化的减排政策,对于农业碳排放率较低的地区,应该注重农业产业结构优化、农业科技研发推广和低碳生态农业发展;而对于农业碳排放率高的地区,则应继续优化农业生产资料配置、提高农用物资的利用率、发展产值更高的新型农业(夏四友等,2019)。

### 3.4 居民消费

作为世界人口大国,近年来我国居民对能源消费需求迅速增长,居民消费碳排放持续快速上升,给环境带来了更大的压力。2019 年我国人均碳排放量约为 10.1 t,远超全球人均 4.45 t 的平均水平。一般来说,居民消费碳排放包含直接和间接碳排放,直接碳排放是居民在直接能源消费过程中产生的碳排放,间接碳排放则是居民消费商品在生产、加工、运输、消费过程所产生的碳排放(周嘉等,2019)。人均收入、受教育水平和城市化水平的增加是导致居民消费水平增加的主要因素,也是碳排放增长的主要驱动因素(Liu et al., 2017)。因此,我国居民消费碳排放近年来一直表现为城镇居民碳排放略高于农村居民碳排放,间接碳排放远高于直接碳排放的状态,其中城镇居民碳排放超过居民消费碳排放总和的 55%,间接碳排放占到居民消费碳排放总和的 75%以上(尹龙等,2021)。Li et al. (2015) 指出,城镇化每增加 1%,居民家庭直接和间接 CO<sub>2</sub> 排放量分别增加 2.9% 和 1.1%。因此如何协调城市化发展与居民消费碳排放之间的关系,从而控制碳排放的增长显得尤为重要。尹龙等(2021)预测我

国居民消费碳排放峰值将在 2030—2033 年出现,峰值约为  $5.31 \times 10^9$ — $6.14 \times 10^9$  t CO<sub>2</sub>, 约占全国碳排放总量的 47%—51%,人均碳排放将降至 3.67—4.22 t CO<sub>2</sub>。现阶段我国人均碳排放与人均 GDP 之间仍未实现脱钩,两者之间存在明显正相关关系,要实现居民消费碳排放尽早达峰的目标,一是要持续推进居民消费碳排放研究,尤其要重视农村地区居民消费碳排放和居民间接消费碳排放的研究。二是需要制定针对性、可操作的居民消费碳减排举措,注重引导和培养居民的低碳消费倾向,发挥居民在碳减排中的主动性。

## 4 我国碳减排主要路径

能源供应、能源消费和人为固碳三个方面的改革和发展是我国实现“双碳”目标的基础(丁仲礼,2021)。结合《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》(下文简称《工作意见》)《2030 年前碳达峰行动方案》和我国行业碳排放研究现状,将其进一步细化为“以完善政策标准与加大政府扶持为基础,以实施碳排放权交易和碳税、产业结构调整与新兴产业发展、能源结构调整与新能源技术发展为核心,以探索 CCUS 技术和增加碳汇及对居民低碳消费倾向的引导和培养为导向”的碳减排路径。

### 4.1 政策完善与政府扶持

“十四五”和“十五五”期间是实现碳达峰与碳中和目标的关键时期,前期我国已经印发《中国应对气候变化国家方案》《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书以及《2030 年前碳达峰行动方案》等相关行动方案,初步制定了温室气体核算、能源消耗限额、节约能源技术等标准。现阶段应当注重对这些政策标准的细化、补充和完善,确保各项工作顺利实施。如制定碳中和专项法律,修订可再生能源法、循环经济促进法等相关法律;完善统一地区、行业碳排放核算报告标准,制定重点行业温室气体排放标准等标准体系;健全电力、钢铁等行业能耗检测计量体系,建立生态系统碳汇监测核算体系等。政府则需要充分发挥自身碳减排规制力,在投资、金融、财税和市场化建设方面发挥引领作用。如严控煤电、钢铁、水泥等高碳项目投资,加大新能源、节能环保、CCUS 等项目的支持力度;推进绿色金融产品

和绿色低碳项目的开发和建设;实施差别化电价、居民阶梯电价、分时电价等电价政策;建设完善碳排放权交易市场等。

#### 4.2 碳排放权交易和碳税

碳排放权交易和碳税是碳减排的两种重要市场化工具,相比传统的财政补贴等政策,在节约成本、促进技术创新和调动企业积极性方面更具有优势。碳排放权交易以总量控制为基础,而碳税则以价格为基础,设计互补型碳排放管理政策组合,同时对不同行业适度重合或分开实施碳交易和碳税,对进一步激发企业减排动力、增加财政收入和有效应对多元化环境问题有重要作用(魏庆坡,2015)。2011年,我国在北京、天津、上海、重庆、广东、湖北、深圳七个省市首先开展了碳排放权交易试点,碳交易市场的减排作用开始显现,研究显示碳交易促使试点地区规模工业的碳排放量和碳强度分别下降了4.8%和5.2%,工业能源技术效率和配置效率分别提高0.03和0.08(李广明和张维洁,2017)。2021年全国统一碳交易市场开启,发电行业首先被纳入全国碳市场,后续钢铁、石化、化工、建材、有色和造纸等高耗能行业的数十个子行业也将陆续进入碳市场,碳市场交易范围将进一步扩大。未来碳市场要发挥更大的减排作用,依赖于进一步提高市场活跃度、提高金融机构参与度、开发更加多样化的碳金融产品,以及在高产能行业试点开征碳税,运用碳税与碳交易的组合模式进行减排等手段。

#### 4.3 产业结构调整与新兴产业发展

产业结构优化一是要着重关注第二产业内部行业结构和产品结构的优化,努力实现从依靠资源投入的“加工型”生产模式到依靠科技创新的“价值型”生产模式。长期以来,我国经济的快速发展很大程度依赖于重工业的发展,电力、钢铁、建材、石化、有色等高碳排放行业的能源消费占据工业能源消费的75%以上,对于这些行业要控制产能规模,对其进行产能等量或减量置换。在行业内部要淘汰落后产能,积极发展新工艺,例如:煤化工行业改变化工产品原料结构,减少煤基产品占比可显著降低碳排放;钢铁行业采用以废钢为原料的短流程电炉钢,以可再生能源电解水制氢取代焦炭作为还原剂炼钢的新工艺,可有效提高碳排放效率;铝冶炼行业利用再生铝替

代电解铝,预计可实现每吨减少CO<sub>2</sub>排放10.6t(王丽娟等,2022a);水泥行业的高效节能改造和生活垃圾等固体废物替代燃煤等措施的实施,预计到2030年可减少行业碳排放5×10<sup>7</sup>t以上(贺晋瑜等,2022)。

二是要加大科技创新,积极发展新兴产业;促进终端消费需求,鼓励第三产业发展。如新能源、新材料、节能环保等基于科技创新的新兴产业的发展,可以直接降低碳排放强度;电子信息产业如人工智能、云计算、物联网等新一代数字技术,可以通过与工业、农业、服务业等的深度融合,改变传统生产和管理方式,助力其他行业升级改造,实现整个产业机构的优化;加强“双碳”领域的人才培养,在重点行业设立“双碳”研究实验室,加大行业相关的低碳零碳负碳技术以及CCUS技术研究,可为碳减排目标提供相关科技储备。

#### 4.4 能源结构调整与新能源技术发展

能源结构的调整一是依赖于太阳能、核能、风能、氢能、地热能、海洋能、生物质能和新材料储能等非化石能源的发展,《工作意见》指出,要实现碳中和总体目标,到2025年我国非化石能源消耗比重要达到20%,2030年要达到25%,至2060年要达到80%以上。近年来,我国清洁能源电力迅速发展,截至2020年底,清洁能源发电装机总规模已经达到9.3×10<sup>8</sup>kW,占总装机比重达到42.4%,相比2012年增长了14.6%。预计到2030年我国清洁能源装机能力可继续新增2×10<sup>8</sup>kW,可满足全国30%左右的用电量(王丽娟等,2022b)。

二是要注重能源利用效率的提升,如煤炭工业的超临界、超超临界机组及热电联供技术,IGCC(integrated gasification combined cycle,整体煤气化联合循环)和燃料电池联合循环技术,煤制烯烃工艺等技术的应用;钢铁行业的荒煤气和烧结矿余热利用、烧结烟气余热回收利用、高炉渣和转炉渣余热回收利用等技术的应用(陈丽云等,2020);以及农业领域优化肥料施用、秸秆还田技术、土壤-作物系统综合管理等措施也有助于能源利用效率的提升(杨欢等,2022)。未来通过有效的能源消费强度和总量双控制度,推进电网、煤炭、油气等市场化改革手段也将助力我国能源体系的低碳发展。

#### 4.5 CCUS 技术和碳汇

除了从源头减少碳排放以外,通过增加植被覆盖面积、海洋保育和海域整治修复来增强生态系统碳汇能力;利用技术手段对 CO<sub>2</sub> 进行捕集、利用和封存的 CCUS 技术也是实现碳减排的有效路径。

碳汇包括海洋生态系统碳汇和陆地生态系统碳汇,其中陆地碳汇是我国最主要的碳汇,据测算,2010—2016 年我国陆地生态系统平均碳汇约为每年  $1.11 \times 10^9$  t 碳,约占同期人为碳排放的 45% (Wang et al., 2020)。近年来我国实施的“退耕还林”、“湿地保护与恢复”和“石漠化综合治理”等一批重大林业生态保护与修复工程,“南红北柳”、“生态岛礁”和“蓝色海湾”等一系列海洋生态环境修复工程切实提高了我国生态系统的碳汇潜力。其中提高森林覆盖率,是提高我国碳汇的主要措施,《工作意见》提出,到 2025 年我国森林覆盖率要达到 24.1%,森林蓄积量要达到  $1.8 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>,到 2030 年要达到 25% 和  $1.9 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>。未来通过持续修复、强化管理,以及加强土地集约利用、开展耕地质量提升、积极推动岩溶碳汇等开发利用,我国的生态系统碳汇能力将大大提高,预计到 2060 年我国的碳汇能力可达  $6 \times 10^9$  t CO<sub>2</sub> (Yu et al., 2021; 张全斌和周琼芳, 2022)。

CCUS 技术也是碳减排的有效路径,研究认为 CCUS 技术对实现碳中和目标的贡献度可以达到 6.5%—55.1% (张全斌和周琼芳, 2022)。对于水泥、电力、煤化工等 CO<sub>2</sub> 排放量较大的企业,单纯依靠产业结构和能源结构调整,很难达到理想的碳减排效果,CCUS 技术无疑提供了一条可行性路径。如现代煤化工行业净化排放尾气中 CO<sub>2</sub> 含量在 70% 以上,这种高浓度 CO<sub>2</sub> 的捕集,具有很大的操作性和成本优势,而捕集的 CO<sub>2</sub> 可以用来油田驱油,化肥加工,加氢制甲醇、芳烃,或进行海底、地质封存等 (刘殿栋和王钰, 2021; 赵志强等, 2021)。近年来,我国 CCUS 技术取得了显著发展。截至 2018 年底,全国已建成或运营的万吨级以上 CCUS 示范项目约 13 个,正在部署中的大规模全流程集成项目有 14 个,累计 CO<sub>2</sub> 封存量约  $2 \times 10^6$  t (刘仁厚等, 2021)。未来 CCUS 技术的推广和应用若能够依赖于政府强有力的政策激励、标准规范的制定和相关技术的突破,其贡献将逐步显现。

#### 4.6 居民低碳消费倾向培养

按消费侧排放计算,全球约三分之二的碳排放与居民活动有关,近半个世纪以来,全球主要食物人均消费量不断增长,禽肉消费量更是增加了近十倍 (王月, 2019)。食物浪费也逐渐增多,据估算,我国每年粮食浪费量达到  $1.2 \times 10^8$  t。不仅在食物方面,衣食住行等现代生活的方方面面都存在环境破坏和过度消费,会导致大量的碳排放。从居民生活入手推进节能减排,是助力我国碳中和目标行之有效的办法,如实施“光盘行动”,减少食物浪费;倡导合理膳食,减少动物性食物摄入;提倡绿色出行,鼓励使用公共交通;实施旧衣回收,减少服装浪费;实施垃圾分类,减少环境污染和处理压力;选用节能家电,减少电力浪费等。居民低碳消费倾向的培养,首先需要社会创造改变生活方式的条件,如对低碳消费的积极宣传和激励、完善的公共基础设施、便利的日常生活服务、完备的低碳消费选择等,这也是目前社会实现低碳生活的重中之重。

### 5 结语

近年来控制以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体排放越来越得到国家、社会和相关企业的重视,专家学者对碳排放问题也投入了更多的研究,在碳排放测算、碳排放影响因素分析、行业碳排放研究分析等方面均取得了很大进展,同时也存在一些不足:

(1) 碳排放测算已经形成了以排放因子法为主流,碳质量平衡法、模型估算法和实测法为辅助,联合碳卫星遥感监测的测算体系;国家碳排放核算工作已经有序开展,但因为历年统计数据存在统计偏差和缺失情况,导致我国出具的碳排放核算结果权威性不高;行业碳排放核算虽然已经发布核算指南,但仍未有效开展。(2) 碳排放影响因素分析一般基于因素分解分析、脱钩角度分析和计量经济学模型分析三种分析方法,研究视角主要集中在国家(省市)层面、地域层面和行业层面。经济发展、人口增长、产业结构、能源结构、技术水平被认为是碳排放的主要影响因素,但仍缺乏考虑历史发展、气候变化、地理位置及人口老龄化等难以量化的复杂因素对碳排放影响的系统分析和长时间序列的碳排放影响因素分析。

(3) 工业(发电、钢铁、水泥、化工、有色金属等)、农业、交通运输业、居民消费等主要行业

的碳排放测算、影响因素分析和减排路径均有大量探讨,其中工业和交通运输业的研究较多,农业和居民消费行业的研究相对较少。排放因子尚未统一、核算边界难以界定及核算源头复杂多样等导致的碳排放核算困难仍然是行业碳排放研究的困境。

基于以上研究现状和我国“双碳”目标的提出,现阶段应当规范细化碳排放核算体系,大力推动以行业为主导的碳减排,践行“以完善政策标准与加大政府扶持为基础,以产业结构调整与新兴产业发展、能源结构调整与新能源技术发展为核心,以探索CCUS技术和增加碳汇及对居民低碳消费倾向的引导和培养为导向”的碳减排路径。

### 参考文献

- 陈丽云,周继程,上官方钦,等. 2020. 某钢铁企业能源利用效率探讨[J]. *冶金能源*, 39(2): 3-7, 26. [Chen L Y, Zhou J C, Shangguan F Q, et al. 2020. Discussion on energy efficiency of a typical steel enterprise [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 39(2): 3-7, 26.]
- 丁美荣. 2021. 水泥行业碳排放现状分析与减排关键路径探讨[J]. *中国水泥*, (7): 46-49. [Ding M R. 2021. Analysis on the present situation of carbon emission in cement industry and discussion on the key path of emission reduction [J]. *China Cement*, (7): 46-49.]
- 丁宁,高峰,王志宏,等. 2012. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J]. *中国有色金属学报*, 22(10): 2908-2915. [Ding N, Gao F, Wang Z H, et al. 2012. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 22(10): 2908-2915.]
- 丁仲礼. 2021. 中国碳中和框架路线图研究[J]. *中国工业和信息化*, (8): 54-61. [Ding Z L. 2021. Study on the roadmap of carbon neutralization framework in China [J]. *China Industry & Information Technology*, (8): 54-61.]
- 范凤岩,雷涯邻. 2015. 能源碳排放影响因素研究综述[J]. *生态经济*, 31(3): 36-43. [Fan F Y, Lei Y L. 2015. Review of researches influencing factors of energy-related carbon emission [J]. *Ecological Economy*, 31(3): 36-43.]
- 付立娟,杨勇,卢静华. 2021. 水泥工业碳达峰与碳中和前景分析[J]. *中国建材科技*, 30(4): 80-84. [Fu L J, Yang Y, Lu J H. 2021. Prospect analysis of carbon peaking and carbon neutralization in cement industry [J]. *China Building Materials Science & Technology*, 30(4): 80-84.]
- 高春艳,牛建广,王斐然. 2021. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. *当代经济管理*, 43(8): 33-38. [Gao C Y, Niu J G, Wang F R. 2021. Review of carbon emission accounting methods and carbon emission factor in steel production [J]. *Contemporary Economic Management*, 43(8): 33-38.]
- 郭朝先. 2014. 中国工业碳减排潜力估算[J]. *中国人口·资源与环境*, 24(9): 13-20. [Guo C X. 2014. Estimation of industrial carbon emission reduction potential in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 24(9): 13-20.]
- 郭扬,吕一铮,严坤,等. 2021. 中国工业园区低碳发展路径研究[J]. *中国环境管理*, 13(1): 49-58. [Guo Y, Lü Y Z, Yan K, et al. 2021. Low-carbon development pathways of industrial parks in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 13(1): 49-58.]
- 国家环境保护总局规划与财务司. 2001. 环境统计概论[M]. 北京: 中国环境科学出版社. [Planning and Finance Department of State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. 2001. Introduction to environmental statistics [M]. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 国家统计局. 2021. 中国统计年鉴: 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社. [National Bureau of Statistics. 2021. China statistical yearbook: 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 韩晶,王赞,陈超凡. 2015. 中国工业碳排放绩效的区域差异及影响因素研究——基于省域数据的空间计量分析[J]. *经济社会体制比较*, (1): 113-124. [Han J, Wang Y, Chen C F. 2015. A study on regional differences of industrial carbon emissions performance and its factors in China spatial econometric analysis based on provincial data [J]. *Comparative Economic & Social Systems*, (1): 113-124.]
- 郝千婷,黄明祥,包刚. 2011. 碳排放核算方法概述与比较研究[J]. *中国环境管理*, 3(4): 51-55. [Hao Q T, Huang M X, Bao G. 2011. Study on carbon emission calculation methods overview and its comparison [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 3(4): 51-55.]
- 郝珍珍,李健. 2013. 我国碳排放增长的驱动因素及贡献度分析[J]. *自然资源学报*, 28(10): 1664-1673. [Hao Z Z, Li J. 2013. Analysis of China's carbon emission growth: 1664-1673.]

- drive factors and its contribution [J]. *Journal of Natural Resources*, 28(10): 1664–1673.]
- 何维达, 张 凯. 2013. 我国钢铁工业碳排放影响因素分解分析 [J]. *工业技术经济*, 32(1): 3–10. [He W D, Zhang K. 2013. The decomposition analysis on the influencing factors of China's steel industry carbon emission [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 32(1): 3–10.]
- 何艳秋, 戴小文. 2016. 中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究 [J]. *资源科学*, 38(9): 1780–1790. [He Y Q, Dai X W. 2016. Phase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China [J]. *Resources Science*, 38(9): 1780–1790.]
- 何 迎, 邢园通, 汲奕君, 等. 2020. 我国电力行业碳排放影响因素及区域差异研究 [J]. *安全与环境学报*, 20(6): 2343–2350. [He Y, Xing Y T, Ji Y J, et al. 2020. On influential factors and regional difference in carbon emissions from power industry at home in China [J]. *Journal of Safety and Environment*, 20(6): 2343–2350.]
- 贺晋瑜, 何 捷, 王郁涛, 等. 2022. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 35(2): 347–355. [He J Y, He J, Wang Y T, et al. 2022. Pathway of carbon emissions peak for cement industry in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 35(2): 347–355.]
- 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 2020. 中国农业碳排放特征及影响因素研究 [J]. *统计与决策*, 36(5): 56–62. [Hu W L, Zhang J X, Wang H L. 2020. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emission in China [J]. *Statistics & Decision*, 36(5): 56–62.]
- 胡艳兴, 潘竞虎, 李 真, 等. 2016. 中国省域能源消费碳排放时空异质性的 EOF 和 GWR 分析 [J]. *环境科学学报*, 36(5): 1866–1874. [Hu Y X, Pan J H, Li Z, et al. 2016. Spatial-temporal analysis of provincial carbon emissions in China from 1997 to 2012 with EOF and GWR methods [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36(5): 1866–1874.]
- 姜 博, 马胜利. 2020. 区域经济增长与碳排放影响因素研究——以东北三省为例 [J]. *企业经济*, 39(11): 122–131. [Jiang B, Ma S L. 2020. Study on the influencing factors of regional economic growth and carbon emissions—a case study of three northeast provinces [J]. *Enterprise Economy*, 39(11): 122–131.]
- 金 玲, 郝成亮, 吴立新, 等. 2022. 中国煤化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 35(2): 368–376. [Jin L, Hao C L, Wu L X, et al. 2022. Pathway of carbon emissions peak of China's coal chemical industry [J]. *Research of Environmental Sciences*, 35(2): 368–376.]
- 旷爱萍, 胡 超. 2021. 广西农业碳排放时空特征及经济关联性研究——基于投入视角 [J]. *资源开发与市场*, 37(6): 663–669. [Kuang A P, Hu C. 2021. Research on the temporal and spatial characteristics and economic relevance of Guangxi agricultural carbon emissions—based on the perspective of input [J]. *Resource Development & Market*, 37(6): 663–669.]
- 李 波, 张俊飏, 李海鹏. 2011. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解 [J]. *中国人口·资源与环境*, 21(8): 80–86. [Li B, Zhang J B, Li H P. 2011. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 21(8): 80–86.]
- 李广明, 张维洁. 2017. 中国碳交易下的工业碳排放与减排机制研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 27(10): 141–148. [Li G M, Zhang W J. 2017. Research on industrial carbon emissions and emissions reduction mechanism in China's ETS [J]. *China Population, Resources and Environment*, 27(10): 141–148.]
- 李洪言, 赵 朔, 林傲丹, 等. 2020. 2019 年全球能源供需分析——基于《BP 世界能源统计年鉴 (2020)》 [J]. *天然气与石油*, 38(6): 122–130. [Li H Y, Zhao S, Lin A D, et al. 2020. Analysis on world energy supply & demand in 2019—based on BP statistical review of world energy (2020) [J]. *Natural Gas and Oil*, 38(6): 122–130.]
- 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等. 2020. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 29(7): 1486–1496. [Li J B, Huang X J, Chuai X W, et al. 2020. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions efficiency in the Yangtze River Delta region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 29(7): 1486–1496.]
- 李 健, 李海霞. 2020. 产业转移视角下京津冀石化产业碳排放因素分解与减排潜力分析 [J]. *环境科学研究*, 33(2): 324–332. [Li J, Li H X. 2020. Analysis of carbon emission factors decomposition and emission reduction potential of Beijing-Tianjin-Hebei regional petrochemical industry from the perspective of industrial transfer [J]. *Research of Environmental Sciences*, 33(2): 324–332.]

- 李明煜,张诗卉,王 灿,等. 2021. 重点工业行业碳排放现状与减排定位分析 [J]. *中国环境管理*, 13(3): 28–39. [Li M Y, Zhang S H, Wang C, et al. 2021. The carbon emission status and emission reduction positioning of key industrial sectors [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 13(3): 28–39.]
- 刘传江,黄桂然,章 铭. 2013. 我国中部六省碳排放量影响因素分解分析 [J]. *技术经济*, 32(1): 101–105, 128. [Liu C J, Huang G R, Zhang M. 2013. Influencing factor decomposition of carbon emission of six provinces in central China [J]. *Technology Economics*, 32(1): 101–105, 128.]
- 刘殿栋,王 钰. 2021. 现代煤化工产业碳减排、碳中和方案探讨 [J]. *煤炭加工与综合利用*, (5): 67–72. [Liu D D, Wang Y. 2021. Discussion on scheme of carbon reduction and carbon neutralization in modern coal chemical industry [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, (5): 67–72.]
- 刘良云,陈良富,刘 毅,等. 2022. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战 [J]. *遥感学报*, 26(2): 243–267. [Liu L Y, Chen L F, Liu Y, et al. 2022. Satellite remote sensing for global stocktaking: methods, progress and perspectives [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(2): 243–267.]
- 刘明达,蒙古军,刘碧寒. 2014. 国内外碳排放核算方法研究进展 [J]. *热带地理*, 34(2): 248–258. [Liu M D, Meng J J, Liu B H. 2014. Progress in the studies of carbon emission estimation [J]. *Tropical Geography*, 34(2): 248–258.]
- 刘楠楠,杨晓松,楚敬龙,等. 2021. 有色金属冶炼企业碳排放核算与减排策略 [J]. *矿冶*, 30(3): 1–6. [Liu N N, Yang X S, Chu J L, et al. 2021. Carbon emission analysis and emission reduction strategy of nonferrous metal metallurgy [J]. *Mining and Metallurgy*, 30(3): 1–6.]
- 刘仁厚,王 革,黄 宁,等. 2021. 中国科技创新支撑碳达峰、碳中和的路径研究 [J]. *广西社会科学*, (8): 1–7. [Liu R H, Wang G, Huang N, et al. 2021. On path of supporting carbon peak and carbon neutralization by science and technology innovation in China [J]. *Social Sciences in Guangxi*, (8): 1–7.]
- 庞凌云,翁 慧,常 靖,等. 2022. 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 35(2): 356–367. [Pang L Y, Weng H, Chang J, et al. 2022. Pathway of carbon emission peak for China's petrochemical and chemical industries [J]. *Research of Environmental Sciences*, 35(2): 356–367.]
- 任晓航,王 震,张雨濛. 2015. 中国碳排放、清洁能源与经济增长的实证研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 25(S2): 6–9. [Ren X H, Wang Z, Zhang Y M. 2015. An empirical research based on China's carbon emissions, clean energy and economic growth [J]. *China Population, Resources and Environment*, 25(S2): 6–9.]
- 世界可持续发展工商理事会,国际能源署. 2010. 水泥技术路线图 2009—2050 年碳减排目标(下) [J]. *中国水泥*, (7): 21–28. [World Business Council for Sustainable Development, International Energy Agency. 2010. Cement technology roadmap: carbon emission reduction targets from 2009 to 2050 (part two) [J]. *China Cement*, (7): 21–28.]
- 唐 赛,付杰文,武俊丽. 2021. 中国典型城市碳排放影响因素分析 [J]. *统计与决策*, 37(23): 59–63. [Tang S, Fu J W, Wu J L. 2021. Analysis on influencing factors of carbon emissions in typical cities of China [J]. *Statistics & Decision*, 37(23): 59–63.]
- 田华征,马 丽. 2020. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析 [J]. *自然资源学报*, 35(3): 639–653. [Tian H Z, Ma L. 2020. Study on the change of China's industrial carbon emission intensity from the perspective of sector structure [J]. *Journal of Natural Resources*, 35(3): 639–653.]
- 佟新华,周红岩,陈 武,等. 2020. 工业化不同发展阶段碳排放影响因素驱动效应测度 [J]. *中国人口·资源与环境*, 30(5): 26–35. [Tong X H, Zhou H Y, Chen W, et al. 2020. Study on the measurement of carbon-driven effects from different development stages of industrialization [J]. *China Population, Resources and Environment*, 30(5): 26–35.]
- 王丽娟,邵朱强,熊 慧,等. 2022a. 中国铝冶炼行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 35(2): 377–384. [Wang L J, Shao Z Q, Xiong H, et al. 2022a. Pathway of carbon emissions peak of aluminum industry [J]. *Research of Environmental Sciences*, 35(2): 377–384.]
- 王丽娟,张 剑,王雪松,等. 2022b. 中国电力行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 35(2): 329–338. [Wang L J, Zhang J, Wang X S, et al. 2022b. Pathway of carbon emission peak in China's electric

- power industry [J]. *Research of Environmental Sciences*, 35(2): 329–338.]
- 王庆一. 2020. 2020 能源数据 [M]. 北京: 绿色创新发展中心. [Wang Q Y. 2020. Energy data 2020 [M]. Beijing: Institute for Global Decarbonization Progress.]
- 王天庆, 王晓辉, 彭书传. 2020. 碳排放影响因素以及脱钩分析研究综述 [J]. *环境保护与循环经济*, 40(9): 4–6, 28. [Wang T Q, Wang X H, Peng S C. 2020. Review on influencing factors of carbon emissions and decoupling analysis [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 40(9): 4–6, 28.]
- 王勇, 韩舒婉, 李嘉源, 等. 2019. 五大交通运输方式碳达峰的经验分解与情景预测——以东北三省为例 [J]. *资源科学*, 41(10): 1824–1836. [Wang Y, Han S W, Li J Y, et al. 2019. Empirical decomposition and forecast of peak carbon emissions of five major transportation modes: taking the three provinces in Northeast China as examples [J]. *Resources Science*, 41(10): 1824–1836.]
- 王月. 2019. 中国膳食碳排放及其与国外的比较研究 [D]. 沈阳: 中国医科大学. [Wang Y. 2019. Carbon emissions from food in China and comparison with foreign countries [D]. Shenyang: China Medical University.]
- 魏庆坡. 2015. 碳交易与碳税兼容性分析——兼论中国减排路径选择 [J]. *中国人口·资源与环境*, 25(5): 35–43. [Wei Q P. 2015. Study on the pathway of China to mitigate emissions based on the compatibility of carbon tax and ETS [J]. *China Population, Resources and Environment*, 25(5): 35–43.]
- 魏营, 杨高升. 2018. 低碳试点城市工业碳排放脱钩因素分解研究——以镇江市为例 [J]. *资源开发与市场*, 34(6): 766–773. [Wei Y, Yang G S. 2018. Decomposing the decoupling indicator between industrial economic growth and carbon emission for low-carbon pilot city—a case of Zhenjiang City [J]. *Resource Development & Market*, 34(6): 766–773.]
- 吴茜, 陈强强. 2023. 甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究 [J]. *干旱区地理*, 46(2): 274–283. [Wu X, Chen Q Q. 2023. Influencing factors and decoupling efforts of industry-related carbon emissions in Gansu Province [J]. *Arid Land Geography*, 46(2): 274–283.]
- 武振华. 2018. 我国化工行业碳排放效率、影响因素及配额分配研究 [D]. 天津: 天津大学. [Wu Z H. 2018. Carbon emission efficiency, determinants and carbon quotas allocation in China's chemical industry [D]. Tianjin: Tianjin University.]
- 习近平. 2020. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [J]. *中华人民共和国国务院公报*, (28): 5–7. [Xi J P. 2020. Statement at the general debate of the 75th session of the United Nations general assembly [J]. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, (28): 5–7.]
- 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 2019. 1997—2016 年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素 [J]. *生态学报*, 39(21): 7854–7865. [Xia S Y, Zhao Y, Xu X, et al. 2019. Spatiotemporal dynamics and driving factor analysis of agricultural carbon emissions rate in China from 1997 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(21): 7854–7865.]
- 解振华, 何建坤, 李政, 等. 2020. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. *中国人口·资源与环境*, 30(11): 1–25. [Xie Z H, He J K, Li Z, et al. 2020. Comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategy and transformation path [J]. *China Population, Resources and Environment*, 30(11): 1–25.]
- 肖宏伟. 2013. 中国碳排放测算方法研究 [J]. *阅江学刊*, 5(5): 48–57. [Xiao H W. 2013. Research on the methods of calculation of China's carbon emission [J]. *Yuejiang Academic Journal*, 5(5): 48–57.]
- 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 等. 2022. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 35(2): 309–319. [Yan G, Zheng Y X, Wang X S, et al. 2022. Pathway for carbon dioxide peaking in China based on sectoral analysis [J]. *Research of Environmental Sciences*, 35(2): 309–319.]
- 杨欢, 乔远, 王兴邦, 等. 2022. 黄淮海玉米生产能源利用效率和净生态系统碳平衡时空特征 [J]. *生态学报*, 42(15): 6184–6195. [Yang H, Qiao Y, Wang X B, et al. 2022. Spatio-temporal characteristics of energy use efficiency and net ecosystem carbon budget of maize production in Huang-Huai-Hai region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(15): 6184–6195.]
- 尹龙, 杨亚男, 章刘成. 2021. 中国居民消费碳排放峰值预测与分析 [J]. *新疆社会科学*, (4): 42–50, 168. [Yin L, Yang Y N, Zhang L C. 2021. Prediction of the peak carbon emission of Chinese residents' consumption and analysis [J]. *Social Sciences in Xinjiang*, (4): 42–50, 168.]
- 玉琦彤. 2021. 中国电力行业碳排放脱钩效应情景模拟 [J]. *环境科学与技术*, 44(6): 194–200. [Yu Q T. 2021.

- Scenario simulation of decoupling effect of carbon emission in China's power industry [J]. *Environmental Science & Technology*, 44(6): 194–200.]
- 袁晓玲, 郝继宏, 李朝鹏, 等. 2020. 中国工业部门碳排放峰值预测及减排潜力研究 [J]. *统计与信息论坛*, 35(9): 72–82. [Yuan X L, Xi J H, Li Z P, et al. 2020. A study on carbon emission peak forecast and emission reduction potential of China's industrial sector [J]. *Statistics & Information Forum*, 35(9): 72–82.]
- 袁志逸, 李振宇, 康利平, 等. 2021. 中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述 [J]. *气候变化研究进展*, 17(1): 27–35. [Yuan Z Y, Li Z Y, Kang L P, et al. 2021. A review of low-carbon measurements and transition pathway of transport sector in China [J]. *Climate Change Research*, 17(1): 27–35.]
- 曾晓莹, 邱荣祖, 林丹婷, 等. 2020. 中国交通碳排放及影响因素时空异质性 [J]. *中国环境科学*, 40(10): 4304–4313. [Zeng X Y, Qiu R Z, Lin D T, et al. 2020. Spatio-temporal heterogeneity of transportation carbon emissions and its influencing factors in China [J]. *China Environmental Science*, 40(10): 4304–4313.]
- 张德英, 张丽霞. 2005. 碳源排碳量估算办法研究进展 [J]. *内蒙古林业科技*, 31(1): 20–23. [Zhang D Y, Zhang L X. 2005. Progress in estimation method of carbon emission [J]. *Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, 31(1): 20–23.]
- 张晶. 2017. 中国碳排放的区域差异与影响因素研究 [D]. 西安: 西北工业大学. [Zhang J. 2017. Research on regional difference and influencing factors of carbon emissions in China [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.]
- 张丽峰, 刘思萌. 2021. 碳中和目标下京津冀地区碳排放影响因素研究——基于分位数回归和 VAR 模型的实证分析 [J]. *资源开发与市场*, 37(9): 1025–1031. [Zhang L F, Liu S M. 2021. Research on influencing factors of Beijing-Tianjin-Hebei carbon emissions under carbon neutral target—empirical analysis based on quantile regression and VAR model [J]. *Resource Development & Market*, 37(9): 1025–1031.]
- 张全斌, 周琼芳. 2022. “双碳”目标下中国能源 CO<sub>2</sub> 减排路径研究 [J]. *中国国土资源经济*, 35(4): 22–30. [Zhang Q B, Zhou Q F. 2022. Research on China's energy CO<sub>2</sub> emission reduction path under the goal of “carbon peak and neutrality” [J]. *Natural Resource Economics of China*, 35(4): 22–30.]
- 赵志强, 张贺, 焦畅, 等. 2021. 全球 CCUS 技术和应用现状分析 [J]. *现代化工*, 41(4): 5–10. [Zhao Z Q, Zhang H, Jiao C, et al. 2021. Review on global CCUS technology and application [J]. *Modern Chemical Industry*, 41(4): 5–10.]
- 周嘉, 时小翠, 赵靖宇, 等. 2019. 中国居民直接生活能源消费碳排放区域差异及影响因素分析 [J]. *安全与环境学报*, 19(3): 954–963. [Zhou J, Shi X C, Zhao J Y, et al. 2019. On regional difference and influential factors of carbon emissions from direct living energy consumption of Chinese residents [J]. *Journal of Safety and Environment*, 19(3): 954–963.]
- 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 2021. 中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究 [J]. *电力科技与环保*, 37(3): 9–16. [Zhu F H, Wang Y S, Xu Z, et al. 2021. Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's power industry [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 37(3): 9–16.]
- Allen M R, Frame D J, Huntingford C, et al. 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne [J]. *Nature*, 458(7242): 1163–1166.
- Brough D, Jouhara H. 2020. The aluminium industry: a review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery [J]. *International Journal of Thermofluids*, 1/2: 100007. DOI: 10.1016/j.ijft.2019.100007.
- Chang Y, Lei S H, Teng J J, et al. 2019. The energy use and environmental emissions of high-speed rail transportation in China: a bottom-up modeling [J]. *Energy*, 182: 1193–1201.
- Chen Y L, Wang Z, Zhong Z Q. 2019. CO<sub>2</sub> emissions, economic growth, renewable and non-renewable energy production and foreign trade in China [J]. *Renewable Energy*, 131: 208–216.
- Das S. 2012. Achieving carbon neutrality in the global aluminum industry [J]. *JOM*, 64(2): 285–290.
- Du G, Sun C W, Ouyang X L, et al. 2018. A decomposition analysis of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in Chinese six high-energy intensive industries [J]. *Journal of Cleaner Production*, 184: 1102–1112.
- Guo B, Geng Y, Franke B, et al. 2014. Uncovering China's transport CO<sub>2</sub> emission patterns at the regional level [J].

- Energy Policy*, 74: 134–146.
- He J K. 2016. Global low-carbon transition and China's response strategies [J]. *Advances in Climate Change Research*, 7(4): 204–212.
- Jiang K J, He C M, Zhu S L, et al. 2021. Transport scenarios for China and the role of electric vehicles under global 2°C/1.5°C targets [J]. *Energy Economics*, 103: 105172. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105172.
- Jin J L, Zhang X Y, Xu L L, et al. 2021. Impacts of carbon trading and wind power integration on carbon emission in the power dispatching process [J]. *Energy Reports*, 7: 3887–3897.
- Johnson J M F, Franzluebbers A J, Weyers S L, et al. 2007. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions [J]. *Environmental Pollution*, 150(1): 107–124.
- Juknys R. 2003. Transition period in Lithuania— do we move to sustainability? [J]. *Environmental Research, Engineering and Management*, 4(26): 4–9.
- Li R, Dong J, Pa L D. 2021. Driving forces analysis of CO<sub>2</sub> emissions from China's electric industry based on two-phase LMDI decomposition method [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(1): 015901. DOI: 10.1063/5.0027231.
- Li Y M, Zhao R, Liu T S, et al. 2015. Does urbanization lead to more direct and indirect household carbon dioxide emissions? Evidence from China during 1996—2012 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 102: 103–114.
- Liao C Y, Wang S G, Zhang Y Y, et al. 2019. Driving forces and clustering analysis of provincial-level CO<sub>2</sub> emissions from the power sector in China from 2005 to 2015 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 240: 118026. DOI: 10.1016/j.clepro.2019.118026.
- Liu L N, Qu J S, Clarke-Sather A, et al. 2017. Spatial variations and determinants of per capita household CO<sub>2</sub> emissions (PHCEs) in China [J]. *Sustainability*, 9(7): 1277. DOI: 10.3390/su9071277.
- Liu Z, Guan D B, Wei W, et al. 2015. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China [J]. *Nature*, 524(7565): 335–338.
- Luo Y S, Long X L, Wu C, et al. 2017. Decoupling CO<sub>2</sub> emissions from economic growth in agricultural sector across 30 Chinese provinces from 1997 to 2014 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 159: 220–228.
- Ouyang X L, Lin B Q. 2015. An analysis of the driving forces of energy-related carbon dioxide emissions in China's industrial sector [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45: 838–849.
- Peng T D, Ou X M, Yan X Y. 2018. Development and application of an electric vehicles life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions analysis model [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 131: 699–708.
- Tapio P. 2005. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. *Transport Policy*, 12(2): 137–151.
- Wang H L, Ou X M, Zhang X L. 2017. Mode, technology, energy consumption, and resulting CO<sub>2</sub> emissions in China's transport sector up to 2050 [J]. *Energy Policy*, 109: 719–733.
- Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data [J]. *Nature*, 586(7831): 720–723.
- Yang L X, Xia H, Zhang X L, et al. 2018. What matters for carbon emissions in regional sectors? A China study of extended STIRPAT model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 180: 595–602.
- Yu Z, You W B, Agathokleous E, et al. 2021. Forest management required for consistent carbon sink in China's forest plantations [J]. *Forest Ecosystems*, 8(1): 54. DOI: 10.1186/s40663-021-00335-7.