

分类号 _____
U D C _____

密级 _____
编号 10741



硕士学位论文

论文题目 我国碳达峰的空间差异性研究

研究生姓名: 范玄玄

指导教师姓名、职称: 王娟娟 教授

学科、专业名称: 应用经济学 区域经济学

研究方向: 欠发达地区经济开发

提交日期: 2022年5月30日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 范宏宏 签字日期： 2022.5.30

导师签名： 王娟娟 签字日期： 2022.5.30

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定，同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

- 1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
- 2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 范宏宏 签字日期： 2022.5.30

导师签名： 王娟娟 签字日期： 2022.5.30

On the Spatial Variability of Carbon Peak in China

Candidate : Fan Xuanxuan

Supervisor: Wang Juanjuan

摘要

气候治理是全球各国的共同性话题。经济社会发展消费了大量化石能源，产生的二氧化碳等温室气体严重威胁人类生存环境。国际组织和世界各国一直在致力于应对气候变化，多国以立法或者政策文件等形式促进碳减排。作为最大的发展中国家和碳排放国，中国在联合国大会等多个国际会议上作出承诺，将力争2030年前碳排放达到峰值，争取2060年前实现碳中和。国家层面也相继出台多个政策和文件，确保我国2030年前实现碳达峰目标。

我国各省份碳排放现实情况不同，学术界对于中国按时实现碳达峰目标研究较多。鉴于中国的碳达峰问题不仅事关国家自主贡献目标的履行，对于应对全球气候变化和其他国家碳减排都具有现实而深远的意义，本文依据“十四五”时期经济社会发展中绿色生态的相关指标对中国及各省份碳达峰相关因素进行现状分析的基础上，采用排放因子法核算2010—2019年中国各省份能源碳排放历史数据，对中国各省份到2030年碳排放的趋势进行了深入探究。研究发现，中国大部分省份都能提前或如期实现碳达峰，少部分省份碳达峰时间存在很大的不确定性。为了确保中国尽早实现碳达峰，本文依据各省份的碳排放实情，从优化产业结构、调整能源结构、发展节能减排技术等方面给出了切实建议。本文的研究发现揭示了中国及各省份的碳排放现状及碳达峰潜力，以自下而上的视角为我国中长期应对气候变化提供了重要参考。

关键词：碳达峰 空间差异性 排放因子法

Abstract

Climate Governance is a common topic among countries all over the world. Economic and social development consumes a lot of fossil energy, and the greenhouse gases such as carbon dioxide seriously threaten the human living environment. International organizations and countries around the world have been committed to addressing climate change, and many countries have promoted carbon emission reduction in the form of legislation or policy documents. As the largest developing country and carbon emitter, China has made commitments at the United Nations General Assembly and other international conferences to strive to peak carbon emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. At the national level, a number of policies and documents have been issued to ensure that China will achieve the carbon peak goal by 2030.

The reality of carbon emissions in China's provinces is different, and there are many academic studies on China's timely realization of the goal of carbon peak. Since China's carbon peak is not only related to the implementation of the national independent contribution goal, but also has practical and far-reaching significance for coping with global climate change and carbon emission reduction in other countries, based on the current situation analysis of the relevant factors of carbon peak in China and provinces according to the relevant indicators of green ecology in economic and social development during the 14th Five Year Plan period,

The emission factor method is used to calculate the historical data of energy carbon emissions of Chinese provinces from 2010 to 2019, and the trend of carbon emissions of Chinese provinces by 2030 is deeply explored. The study found that most provinces in China can achieve carbon peak ahead of time or on schedule, and there is great uncertainty in the time of carbon peak in a few provinces. In order to ensure that China can reach the peak of carbon emission as soon as possible, this paper gives practical suggestions from the aspects of optimizing industrial structure, adjusting energy structure and developing energy-saving and emission reduction technology according to the actual situation of carbon emission in various provinces. The findings of this paper reveal the current situation and peak potential of carbon emissions in China and its provinces, and provide an important reference for China's medium and long-term response to climate change from a bottom-up perspective.

Keywords: Carbon emissions peak ; Spatial difference; Emission factor method

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景与问题提出	1
1.1.1 国际背景	1
1.1.2 国内背景	3
1.1.3 问题提出	5
1.2 研究意义	5
1.2.1 理论意义	5
1.2.2 实践意义	6
1.3 文献综述	6
1.3.1 国外文献梳理	6
1.3.2 国内文献梳理	7
1.3.3 文献述评	8
1.4 研究方法和论文结构	9
1.4.1 研究方法	9
1.4.2 论文结构	10
2 相关概念与理论基础	11
2.1 相关概念	11
2.1.1 全球气候变化	11
2.1.2 碳排放	11
2.1.3 碳达峰	11
2.1.4 碳中和	11
2.1.5 其他	12
2.2 理论基础	12
2.2.1 可持续发展理论	12
2.2.2 稳态经济理论	14
2.2.3 外部性理论	15

2.2.4 环境库兹涅茨曲线理论	16
2.2.5 增长极理论	19
2.2.6 经济增长理论	20
3 各省份碳达峰相关因素分析	22
3.1 影响我国碳达峰的因素确定	22
3.2 各省份碳达峰相关因素概况	24
3.2.1 各省份人均 GDP	24
3.2.2 各省份森林覆盖率	27
3.2.3 各省份能源生产总量	29
3.2.4 各省份单位 GDP 能源消耗量	32
3.2.5 各省份研究与试验发展经费支出	34
3.2.6 各省份一般工业固体废物产生量	37
3.2.7 各省份废水排放总量	39
3.2.8 各省份废气中二氧化硫排放总量	42
3.3 各省份类型划分	44
3.3.1 碳达峰条件优越省份	45
3.3.2 碳达峰条件良好省份	46
3.3.3 碳达峰条件欠缺省份	47
4 各省份碳达峰预测	49
4.1 方法介绍及指标选取	49
4.2 预测结果可靠性讨论	50
4.3 结果分析	53
4.3.1 有望提前实现碳达峰的省份	54
4.3.2 按期实现碳达峰的省份	61
4.3.3 实现碳达峰存在不确定性的省份	72
5 相关政策建议	78
5.1. 关于提前实现碳达峰省份的建议	78
5.1.1 深化国际合作，发挥国内碳达峰引领作用	78
5.1.2 进一步优化产业结构，促进经济低碳化发展	78

5.1.3 发挥先进技术优势，建立现代能源体系	79
5.2. 关于如期实现碳达峰省份的建议	79
5.2.1 立足碳排放实际情况，合理规划碳达峰行动	79
5.2.2 加快产业结构调整，有效控制煤炭能源消费	80
5.2.3 依托资源禀赋优势，促进低碳经济发展	80
5.3. 关于实现碳达峰困难省份的建议	81
5.3.1 给予相应的政策支持，推动合理实现碳达峰	81
5.3.2 提高能源利用效率，打造清洁高效的产业体系	81
5.3.3 有序推进清洁能源开发，加快能源结构调整	82
参考文献	83
后记	87

1 绪论

1.1 研究背景与问题提出

1.1.1 国际背景

全球气候变暖已经成为当今人类社会面临的重大全球性挑战之一。从十八世纪第一次工业革命以来,煤炭和石油等化石燃料消耗量持续增加,全球气温也随着二氧化碳排放量的增加不断上升。IPCC 的研究数据表明,全球气温在过去的一百年上升了约 0.4℃,并且如果不对气候变化采取积极措施,预计未来一百年全球气温上升将超过 2℃,这将对人类生存产生严重威胁。加强全球气候治理,积极采取各种措施应对全球气候变暖,改善人类自身赖以生存的环境已成为世界各国的共同性话题。为了应对气候变暖,1988 年世界各国达成一致意愿,成立了联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC),成立至今一直致力于对全球气候变化的调研并多次发布评估报告,为各国政府、气象组织、学者专家研究和应对气候变化提供了全面可靠的科学报告。

为了给人类提供一个适宜生存的气候环境,联合国大会于二十世纪九十年代通过了控制气温变化的联合国气候变化框架公约(UNFCCC),这是人类历史上首个为应对二氧化碳等温室气体排放通过的国际公约,截至 2021 年 7 月,已有 197 个国家加入,对各国经济和社会发展具有重要意义。为了控制温室气体含量在一个合理的水平变化,全球首个控制温室气体排放的法案正式生效,《京都议定书》为世界各国和地区控制温室气体排放提出了严格要求。2015 年 12 月通过的《巴黎协定》为全球各国减缓气温升高提出了硬性要求,到本世纪末,各国政府要努力将全球地面平均上升温度控制在工业化前水平 1.5-2℃范围之内。截至 2021 年 7 月,加入《巴黎协定》的国家已达 184 个。

世界各国都在努力应对气候变化,全球实现碳达峰的国家已达五十多个,达峰国家多为欧美发达国家,这些国家实现碳达峰时,城市化水平超过了 70%,第二产业占比在 27%以下,并且具有成熟的高端技术产业。碳排放量体量排在全球前列的国家中,美国、英国、日本、德国、加拿大和巴西等多个国均已实现碳达

峰，中国和印度等人口和碳排放的大国也对全世界表达了控制碳排放的决心，中国更是在国际会议上作出了在 2030 前争取实现碳排放达到峰值的国际承诺。截止到 2021 年 10 月，承诺实现碳中和的国家已达 137 个，其中以立法或政策文件等书面形式作出承诺的国家有 61 个。如表 1.1 所示，在主要国家中，芬兰政府提出了全国要在 2035 年实现碳中和的目标，领先其他各国实现碳中和的计划时间表，奥地利和冰岛政府则把全国实现碳中和的时间定在了 2040 年，德国和瑞典则为 2045 年，大部分做出碳中和承诺的国家都将 2050 年定为完成目标时间，我国计划将在 2060 年前实现碳达峰。为了实现本世纪中期净零排放的目标，全球范围内各国的碳排放都需要尽快碳达峰。

表 1.1 国际碳中和进程

国家/地区	目标	
	年份	状态
芬兰	2035	政治协议达成
冰岛	2040	纳入政策议程
奥地利		政治协议达成
苏格兰	2045	已立法
瑞典		已立法
哥斯达黎加	2050	纳入政策议程
埃塞尔比亚		纳入政策议程
日本		纳入政策议程
挪威		纳入政策议程
葡萄牙		纳入政策议程
斯洛伐克		纳入政策议程
南非		纳入政策议程
韩国		纳入政策议程
瑞士		纳入政策议程
欧盟		政治协议达成
爱尔兰		政治协议达成

国家/地区	目标	
	年份	状态
加拿大	2050	政策讨论
丹麦		已立法
法国		已立法
匈牙利		已立法
德国		已立法
新西兰		已立法
英国		已立法
西班牙		立法中
中国	2060	纳入政策议程

1.1.2 国内背景

自改革开放以来，中国经济保持强劲增长，2010 年以 58786 亿美元的 GDP，取代日本成为仅次于美国的世界第二大经济体，2019 年人均 GDP 开始超过一万美元，2020 年全国 GDP 突破 100 万亿元人民币。经济高速增长的背后，是大量化石能源的消耗和对环境造成的污染，2005 年中国碳排放总量超过美国，成为全球碳排放量第一大国。从产业结构看，我国第二产业占比远高于已经实现碳达峰的发达国家，并且具有一定规模的高耗能产业。从能源消费结构看，尽管我国光伏、风电、水电、新能源等产业的发展已处于全球领先水平，但能源消费结构仍以煤炭、石油和天然气等化石能源为主，化石能源燃烧是二氧化碳排放量增加的主要来源，我国煤炭消费占比超过总量的一半，这使我国能耗强度高于世界各国平均水平。我国还处在碳排放量增长阶段，工业化水平和城市化进程距离发达国家还有很大差距，作为世界上最大的发展中国家，如何协调好经济增长与减排目标间的关系至关重要。

作为《巴黎协定》的签署国，我国在全球应对气候变化的过程中起着重要作用。2007 年，中国政府为积极应对气候变化，颁布了《中国应对气候变化国家方案》；2009 年，中国政府在哥本哈根气候大会上作出 2020 年单位 GDP 的二氧化碳排放降为 2005 年的 55%-60% 的国际承诺；2011 年，中国政府在“十二五”

规划纲要中明确了应对气候变化的目标和任务；2014年，国务院发布《国家应对气候变化规划（2014-2020年）》，规划对国内外气候变化形势进行了分析，对我国应对气候变化，加快生态文明建设和经济社会发展提出了目标要求。中国政府一直致力于为人类应对气候变化作出应有的贡献，2020年9月，我国在联合国大会上向全世界作出庄严承诺，将积极采取各种措施减缓碳排放，力争全国二氧化碳排放在2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。部分发达国家很早就已经实现碳达峰，我国承诺的碳达峰到碳中和的过渡时间远低于发达国家，越早实现碳排放达峰，越有利于为实现碳中和提供更大空间。实现碳达峰、碳中和既是我国向世界作出的庄严承诺，也是一场广泛而深刻的经济社会变革。“十四五”时期是我国完成碳达峰目标的关键阶段，规划从全国层面对2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和远景目标进行了顶层设计，对重点省份、重点领域提出了更为具体的行动方案要求。要求把新发展理念贯彻落实到碳达峰、碳中和的行动中，加强我国生态文明建设和经济社会发展全面绿色转型。

表 1.2 国家层面有关碳达峰、碳中和重大决策

时间	政策/文件
2020.12	《新时代的中国能源发展白皮书》
2021.2	《国务院关于加强建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》
2021.3	《2021年政府工作报告》
2021.3	《国务院关于落实〈政府工作报告〉重点工作分工的意见》
2021.3	《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》
2021.10	《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》
2021.10	《2030年前碳达峰行动方案》

1.1.3 问题提出

作为一个能源消费和碳排放大国，中国应提高应对气候变化的自主贡献力度，这不仅对其他发展中国家降低碳排放量具有示范作用，也是推动我国经济社会发展实现绿色低碳转型和经济可持续发展的内在要求。目前实现碳达峰的国家多为发达国家，我国作为一个人口众多、工业产业占比较高、能源结构以煤炭为主的发展中大国，如期实现 2030 年前碳达峰的目标，既是挑战，又有机遇。我国各地区经济社会发展水平和资源禀赋条件不同，地区间人口规模、经济发展、产业结构和能源资源条件等有一定差距，学术界普遍认为中国实现碳达峰、碳中和具有一定的挑战性。本文在应对气候变化的全球背景下，基于对各省份的碳达峰相关因素的现状分析，各省份碳排放达峰的难易程度与空间特征，对各省份给出如期实现碳达峰的政策建议。

1.2 研究意义

1.2.1 理论意义

应对气候变化需要全人类的共同努力，气候治理已成为各国政府加强合作的共同性话题。自十八世纪第一次工业革命时期以来，世界各国利用工业带动国家经济发展的同时，逐年增加的二氧化碳等温室气体被排放进大气之中，环境承载能力难以承受日益增多的碳排放量。二氧化碳等温室气体排放量剧增所引发的温室效应会带来一系列危害和后果，严重威胁了人类的生存发展环境。通过降低二氧化碳等温室气体排放抑制温室效应，不但有利于促进经济社会持续发展，更是人类可持续发展的内在要求。同时，碳达峰、碳中和影响着全人类的生产和生活方式，正成为企业、地区、国家经济体之间比拼竞争力的赛道。近些年来，中国政府一直在探索具有可持续性的发展方式，碳达峰、碳中和的提出要求中国建立绿色低碳、清洁高效的产业体系，这有助于推动我国“十四五”期间构建新发展格局，实现高质量发展。中国在 2030 年前实现碳达峰既是兑现对全世界作出的国际承诺，也是我国实现高质量发展的必然要求。

1.2.2 实践意义

气候治理是当今世界各国最为关注的环境治理议题。作为世界上最大的发展中国家，我国能源消费和碳排放量均位居世界第一，中国作出的碳达峰、碳中和承诺对全球应对气候变化具有重大意义。目前，关于中国能否实现碳达峰的承诺已经引起了社会各界学者们广泛的关注，国内对于碳达峰的研究，多是对全国或者某一区域的碳达峰情况进行研究，或者是从行业角度进行碳排放路径分析，缺乏对全国各地碳排放达峰路径的研究。本文充分考虑到区域差异性，从省级层面来评估和配合中国 2030 年碳达峰目标的实现。实现碳达峰目标需要落实各省份主体责任，科学评估各省份在 2030 年前实现碳达峰的难易程度，根据各地区实际情况制定合理的节能减排策略，构建共同但有区别的协同减排路径。

1.3 文献综述

1.3.1 国外文献梳理

国外学者对碳达峰的研究，多从以下几个方面展开。

关于碳排放与经济增长的研究。Grossman (1991) 等对环境污染与经济增长进行建模分析，发现两者间呈现倒 U 型趋势。Churchill (2018) 等发现环境污染与影响因素之间存在 U 型、线性、倒 N 型等多种关系。由于各地区具体情况的不同，研究中会出现不同的形状。Ozokcu 等 (2017) 等研究了碳排放与经济增长的线性关系，结果两者间的相关性不显著。Olale (2018) 等分析了国家碳排放与经济增长之间的关系，研究发现碳排放与收入之间呈现倒 U 型关系，EKC 曲线可以识别。

关于碳排放达峰的研究。Tollefson (2016) 认为中国对煤炭消费的约束、对绿色能源的政策支持和巨额投资，有助于中国提前实现碳排放达峰的目标。Elzen (2016) 等利用模型对中国碳达峰进行了预测，建议实施更加积极的产业结构调整等节能减排政策，保障 2030 年前碳排放达峰。Niu (2016) 等的模拟结果显示，中国政府需要放缓 GDP 增长目标，才能保证在 2030 前实现碳达峰。英国石油公司 (2018) 认为中国二氧化碳排放峰值将达到 100 亿吨，并且可能提前五年实现碳达峰承诺，为碳中和争取更大空间。由于我国各地区发展水平差异较大，实现碳排放达峰的路径也有很大差别。Du (2017) 等研究了上海和北京两个发达地

区的二氧化碳排放趋势,结果显示这两地区已经实现碳排放达峰。Li (2017) 等研究发现,我国各省份的碳排放影响因素和碳减排潜力存在差异,其中,东部地区单位 GDP 能源消耗强度普遍低于其他地区,产业结构优于其他地区,会更早实现碳达峰。

关于碳减排发展趋势的研究。联合国开发计划署 (UNDP) (2007) 认为发展中国家碳排放和全球碳排放总量将在 2020 年达到峰值。经济合作和发展组织 (OECD) (2008) 研究认为 2050 年全球碳排放量将比 2000 年减少四成,金砖国家减排超过三成。NICHOLAS Stern (2008) 研究发现 2050 年全球二氧化碳排放总量将降低为 1990 年的 50%。BENT S rensen (2008) 对全球人均碳排放进行了模型分析,认为在长期净零排放目标的驱使下,人均碳排放将相同。AUFFHAMMER M (2008) 等利用模型对中国各地区的碳排放趋势进行了研究,结果表明 EKC 曲线不显著。GUAN D (2008) 等对影响中国碳排放的因素进行了研究,认为投资、消费和人口是影响中国碳排放的主要因素,提高能源效率无法控制碳排放增长。

1.3.2 国内文献梳理

国内学者对碳达峰的研究,多从以下几个方面展开。

从行业角度研究碳达峰。金书琴 (2021) 等认为我国农业碳排放已接近峰值,伴随着农业现代化水平的提高,农业机械产生的二氧化碳为碳达峰带来了不确定性,建议通过发展循环农业、绿色农业来实现农业碳减排。中国既是制造业大国,同时也是碳排放大国。邵帅 (2017) 等分析了往年中国制造业碳排放的趋势及相关影响因素,结果表明投资和技术等驱动因素将对制造业碳排放未来演变产生重要影响。山东工业发展水平较好,是我国的制造业大省。李治国 (2019) 等通过对山东制造业碳排放的碳经济、能源消费和生态环境构建耦合模型,分析山东实现低碳排放的途径。

从区域角度研究碳达峰。李慧民 (2020) 等以北京近年来化石燃料燃烧产生的二氧化碳为时间序列研究其碳达峰路径,认为其实现碳排放达峰过程中的政策制定和技术改革等措施对其他省份具有借鉴意义。齐晔 (2020) 等认为我国 2010 年以来设立的低碳城市试点都能够在 2030 年前完成碳达峰目标,部分发展基础较好的城市可在“十四五”期间实现碳达峰。曹颖 (2019) 等认为位于我国东部

的经济发达省份凭借成熟的减排技术、合理的产业结构、完善的环境法规等优势，可在全国范围内率先实现碳达峰目标。城市群和都市圈聚集着大规模人口，对完成国家碳达峰目标具有重要影响。方创琳（2021）认为科技、产业、环境和机制等多方面的创新，有利于协调城市群经济发展与生态文明建设之间的关系。刘甜（2015）等以我国沿海省份工业城市为研究对象，通过构建碳排放、经济增长和能源消耗之间的脱钩模型，探讨沿海地区尽早实现碳达峰的可行路径。

从对策角度研究碳达峰。魏丽莉（2021）等通过对设立的碳交易城市试点上市公司的面板数据进行分析，认为制定合理的碳价格可以促进城市绿色技术、绿色金融、管理机制等多方面的创新。常纪文（2021）等认为立法工作对我国应对气候变化，如期实现碳达峰和碳排放目标有重要作用，提出结合国外经验和我国碳排放国情，在已建立的环境保护法基础上制定气候变化领域的专门法律。我国经济 and 生态环境较为复杂，自然灾害等不利于应对气候变化的风险时有发生，冯爱青（2021）等认为我国应完善自然灾害、生态产业和绿色技术等气候变化领域的保险体制机制。安国俊（2021）认为在我国碳达峰过程中，为碳减排提供绿色金融保障非常重要，建议政府、金融企业等主体完善相应的法律法规、明确资金重点支持的领域。

从实现路径研究碳达峰。王勇（2017）等对东北地区多种交通运输方式的面板数据构建模型并进行情景分析，结果表明投资规模和运输规模是实现交通领域碳减排的主要驱动因素。洪竞科（2021）等通过创新性的构建 RICE-LEAP 模型和多种碳排放情景，动态模拟了中国实现碳达峰、碳中和的路径。庄贵阳（2021）在我国新发展格局的背景下探讨了实现碳达峰的路径，认为大力发展可再生能源有助于我国碳减排和实现高质量发展。马丁（2016）等对中国 2030 年能否碳达峰进行了路径模拟和情景分析，认为给予高耗能产业减碳技术支持和发展新能源产业对中国 2030 年前碳达峰具有重要作用。

1.3.3 文献述评

通过对国内外文献的梳理，不难发现，中国碳达峰问题已经得到了社会各界广泛关注。国外现有文献主要是从碳排放与经济增长、碳排放达峰、碳减排发展趋势等方面展开研究；国内的研究趋势与热点主要是行业维、空间维、对策维和

实现路径等方面。其中，研究区域多是国家层面或者某一地区，而从省份层面自下而上对中国碳达峰分析的研究较少。我国各省经济发展水平与资源禀赋条件具有较大区别，省份之间存在显著的区域异质性，应当根据各省具体情况规划出既符合各省自身情况又具有实际意义的达峰路径。本文参考学者已有的研究，在对中国及各省份生态与经济发展现状分析的基础上，依据各省份碳达峰条件状况进行类型分类。利用模拟计量等方法对我国各省份 2030 年实现碳达峰的难易程度及影响因素进行预测分析，最后根据我国各省份的现实发展状况及碳排放与驱动因素之间的特征，给出合理的碳达峰路径，确保我国 2030 年前碳达峰目标的完成。

1.4 研究方法和论文结构

1.4.1 研究方法

1.4.1.1 文献资料法

通过查阅历史文献，对与碳达峰相关的研究观点进行梳理与总结，对比分析国内外研究现状，并深入了解碳排放量核算及预测的研究方法，从自下而上的视角探讨我国各省份碳排放现状及碳达峰难易程度。

1.4.1.2 碳排放核算方法

作为当今世界第一大货物出口和进口国，中国在工业经济快速发展的同时，也伴随着大量温室气体的排放。我国产生的二氧化碳主要来源于对大量化石能源的消耗，其中煤炭在我国能源消费中占比超过一半，中国如期实现碳达峰将对全球积极应对气候变化产生重要影响。碳排放量核算是一个相当复杂的过程，目前还未没有形成统一的标准。排放因子法是国内外政府、企业和学者等计算碳排放量时使用最多的方法，其他较为常用的还有实测法、质量平衡法等方法。

其中排放因子法(Emission-Factor Approach)是 IPCC 提出的一种用于估算碳排放量的科学方法，具有操作简单、适用范围广和应用成熟等优点，适用于国家和省份等宏观层面的碳排放核算。其基本思路是依照碳排放清单列表，针对每一种碳排放源构造其活动数据与排放因子，以活动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。

1.4.2 论文结构

本文将从五个部分对我们要分析的问题进行展开。第一章为绪论部分，主要介绍了关于国内外碳排放的背景和研究意义，在对已有研究进行梳理的基础上，介绍本文的基本思路、研究方法和基本框架。第二章为相关概念与理论基础，主要介绍研究碳达峰涉及的相关概念，并对论文中应用到的经济理论基础进行系统地阐述。第三章为我国各省份碳达峰相关因素分析，主要对影响碳达峰目标的影响因素权重、各省份相关情况进行分析，并对各省份进行类型分类。第四章为各省份碳达峰预测，主要介绍省份碳排放核算方法，从影响因素方面对我国各省份碳达峰趋势进行分析，并深入探讨我国各省份碳达峰呈现出的空间差异性。第五章为相关政策建议，依据各省份碳排放实际情况，从产业结构、能源结构、节能减排技术等方面为各省份如期实现碳达峰目标提供合理策略。

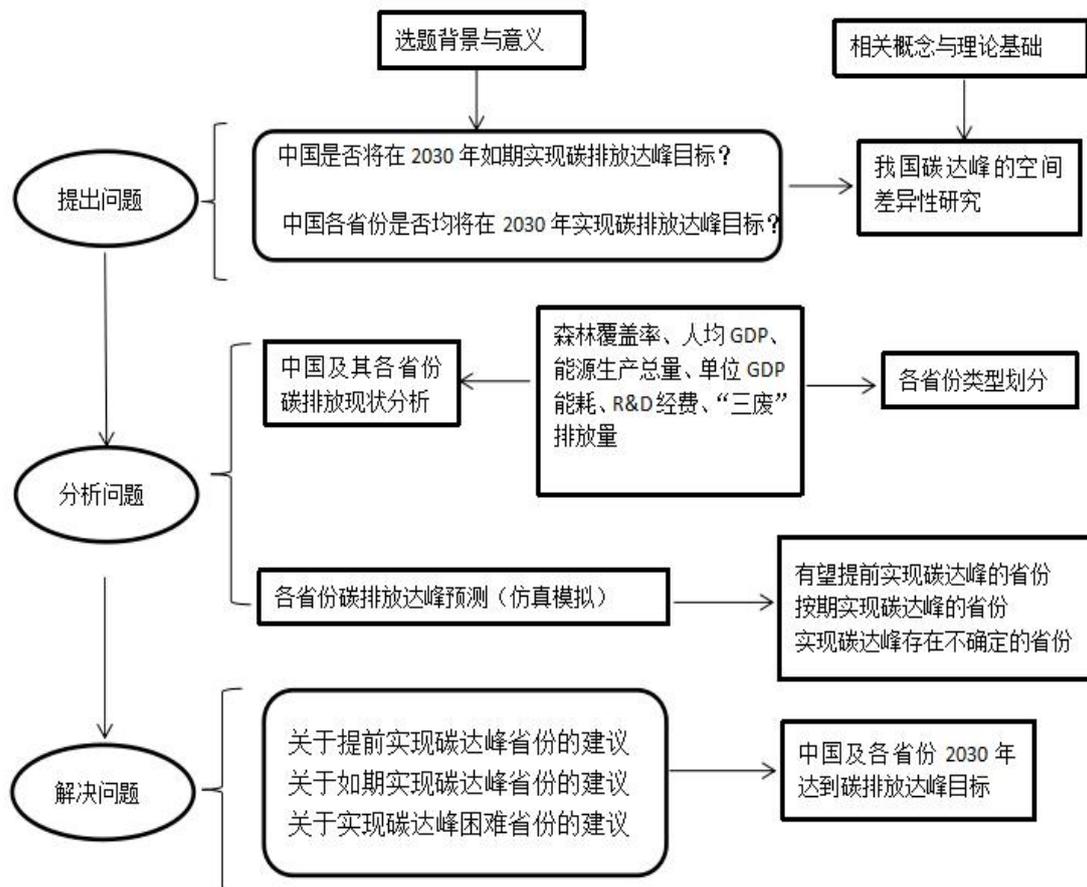


图 1.1 技术路线图

2 相关概念与理论基础

2.1 相关概念

2.1.1 全球气候变化

全球气候变化是指在全球范围内,气候短期发生的巨大变化或者长时间持续的一种气候变动。全球气候变化给不同国家和地区带来了不同的影响,已成为当今全球最需要解决的环境问题,引起气候发生变化的因素多种多样,其中人类活动对环境造成的影响是最主要的因素。应采取相关措施稳定全球气候变化,把温室气体的含量控制在合理范围,降低给人类带来的损失。

2.1.2 碳排放

碳排放是指人类利用化石能源等进行生活和生产过程以及土地开发利用等活动中向外界排放二氧化碳、甲烷等温室气体过程的总称,引发全球气候变暖最主要的原因就是碳排放,其中二氧化碳是影响最大的温室气体,因此人们常用二氧化碳排放等同于碳排放。

2.1.3 碳达峰

碳达峰是指某一地区的二氧化碳排放增量先呈上升状态,这个过程中碳排放增长率逐渐趋于平缓,并在某一个时间点增量达到最大,随后呈平稳下降状态。这个二氧化碳排放量先上升后下降的拐点就是碳达峰。拐点意味着这个国家或地区的经济增长与碳排放开始脱钩。中国在国际上作出了要在2030年前实现碳达峰的承诺。

2.1.4 碳中和

碳中和是指某一地区在一定时间产生的二氧化碳含量与利用森林碳汇、绿色能源开发、节能减排技术等措施减少的二氧化碳含量持平,继而实现二氧化碳净

零排放的过程。中国政府承诺将在 2060 年前实现碳中和目标。

2.1.5 其他

碳汇:一般是指森林植被从大气环境中吸收二氧化碳,并通过光合作用将其固定在植被或土壤中,从而减缓温室效应的过程。

碳捕集、利用与封存(CCUS):是指捕集提纯电力、建材等高耗能工业生产过程中排放的二氧化碳,并重新投入到生产中进行循环利用或封存到地下的技术。其中,碳捕集是指利用各种技术、方法和措施将化石燃料燃烧等产生的二氧化碳收集起来,以避免排放到大气中,对高耗能产业实现净零排放具有重要意义,是应对气候变化的重要举措。

碳交易:指拥有二氧化碳排放权的企业等市场主体间进行排放权交易的活动。碳交易市场是政府为控制企业二氧化碳排放量而形成的市场,如果企业碳排放量超过自身所有的碳排放配额,就需要通过市场向有余额的企业购买配额。

碳税:指对二氧化碳排放所征的税。政府通过对企业消费煤炭等化石燃料产品所排放的二氧化碳进行征税,把企业为获取收益而给外界所带来的环境污染等负外部性转化为企业的经营成本,从而促使企业积极采取措施减少二氧化碳的排放。

2.2 理论基础

2.2.1 可持续发展理论

2.2.1.1 可持续发展理论的内涵

可持续发展理论经过了一个漫长的发展历程,是在对人类自身发展过程中的环境与发展进行反思而形成的理论。可持续发展这一概念首次被提到是在 1987 年举行的世界环境与发展委员会上,在《我们共享的未来》这一报告中对其作了明确的定义。自工业革命以来,大量化石能源的消耗对人类生存环境造成了严重威胁,生态环境受到社会各界越来越多的关注,经过学者们不断完善发展可持续发展理论,产生了众多具有不同观点的思想流派。可持续发展理论涉及到政治、

经济和环境等多个领域,发达国家和欠发达国家一致认为可持续发展理论可以有效解决经济社会发展和环境之间的问题,这一理论也被融入到各国经济社会发展规划和环境政策的制定中。

关于碳排放对人类生存与发展造成的威胁,已成为当代人类可持续发展的重要话题。人类在利用自然的同时,也要做好对自然的保护,人类与自然环境和谐相处至关重要。碳减排是生态环境保护的重要内容,碳排放控制在生态能够吸收的范围是环境可持续发展的重要要求。作为世界上最大的碳排放国家,中国积极采取各种措施在 2030 年前实现碳达峰承诺,对人类可持续发展具有重大意义。

2.2.1.2 可持续发展的基本原则

公平性原则包括本代人的公平和代际间的公平两个方面。本代人的公平指某一地区的群体在生活和生产过程中对环境造成的影响不会影响到其他地区的发展,并且所有地区的群体发展机会相等。由于我们地球的资源是有限的,而资源供给难以满足人类发展需求。代际间的公平指当代人在发展中满足自身基本需求的前提下,应重视对生态环境的保护,应考虑到后代享有同等的开发利用资源的权力。

可持续原则是指人类进行经济社会发展时,要合理规划对资源能源的使用。持续性是保证人类可持续发展的重要前提,我们要合理开发利用有限的不可再生能源,提高资源的利用效率并找到合适的替代品。工业革命以来,人类在追求高速经济发展的同时,也消耗了大量能源资源,产生的温室气体对地球环境承载能力造成了一定压力。为了人类可持续发展,全球各国应优化经济发展方式,清洁高效的利用能源资源,把温室气体排放量控制在地球生态能够吸收的范围内。

共同性原则是指要实现人类可持续发展,需要世界各国和地区共同努力。积极应对气候变化是全人类的共同责任,某一地区对环境造成的污染可能会让其他地区改善环境的努力白费。在应对气候变化时,全球各国应承担起相应的碳减排责任,采取各种措施来控制碳排放,消除温室效应对人类生存环境造成的威胁。

2.2.2 稳态经济理论

2.2.2.1 稳态经济理论的来源与内涵

忽视生态成本的经济增长理论一直是经济学中的主流，其认为劳动、技术等一切生产要素都应该为经济增长服务。自十八世纪工业革命以来，世界各国在盲目追求经济增长的同时，对地球资源、环境造成了一定的压力。一些生态经济学家认为地球的环境资源、能源资源是有限的，而人类的欲望是无限的。1973年，戴利在《走向稳态经济》中对稳态经济这一理论做了系统地阐述，这意味着正式形成了现代稳态经济学。稳态经济注重的是经济发展，其认为自然环境的容量是有限的，人类进行的生产活动要和生态系统的资源与环境相协调，人口和经济规模应保持在一个与资源和环境协调下相对稳定的水平。

2.2.2.2 稳态经济理论的要求

首先其要求人口规模保持在一个较低的平衡状态，这是一种出生率与死亡率基本持平的动态平衡。欧美发达国家人口呈现零增长甚至负增长，发展中国家还处在人口快速增长的阶段，全球人口总量还在不断增加，早已超过了地球可以容纳的合理人口数量。其次是资本存量要在较低的货物吞吐量下保持动态平衡，这就需要人类改变对物质财富的过度追求，通过技术创新等方式提高能源利用效率减少消费。最后，稳态经济要求平衡状态下的人口和资本应足以保证人类可持续发展。稳态经济最终是要求人与自然和谐相处，生态经济学家认为追利的资本主义社会难以实现稳态经济，而我国的社会主义制度为建立稳态经济发展模式创造了先天条件。

改革开放以来，我国经济快速发展的背后是大量化石能源的消耗，这对我国生态环境也造成了一定的破坏。我国具有人口规模大、各地区发展存在贫富差距、能源资源消费量大等特征，这对我国实现碳达峰目标形成了一定挑战。近些年来，我国政府通过实施生育政策控制人口数量及调整人口结构，并积极采取各种手段，争取把消费控制在环境承载能力下的最优水平，注重欠发达地区的发展，以达到贫富差距缩小的目标。我国不断调整能源消费结构，加大研发与应用低碳绿色技术，以保证生产活动和生态系统的资源与环境相协调。

2.2.3 外部性理论

2.2.3.1 外部性的内涵

外部性，又称“外部效应”，是指某一经济主体的经济行为给其他经济主体和社会带来收益或造成损失的现象。外部性源于马歇尔在《经济学原理》中提到的“外部经济”，后来经过庇古、奈特、科斯等学者的研究，形成了外部性理论。外部性可以分为正外部性和负外部性两个部分。正外部性是对未参与某一经济活动的主体带来的外溢收益，如：农民种植的果树等植物，可以吸收周围居民排放的污染气体，但他们不需要支付成本。负外部性是对未参与某一经济活动的主体带来的外溢成本，如：工厂向大气中排放污染气体，危害了周围居民的健康，而此企业却没有为此付出成本。碳排放是环境经济学中典型的负外部性问题，企业在追求利益的同时，排放的二氧化碳等温室气体对环境造成破坏，在一定程度上造成了社会福利损失和社会资源的有效配置。

外部性可以用福利函数进行表示，即：

$$F_j = F_j(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}, X_{mk}) \quad j \neq k$$

这里， j 和 k 是指不同个人(或厂商)， F_j 表示 j 的福利函数， $X_i (i = 1, 2, \dots, n, m)$ 是指经济活动。其经济含义是：一个经济主体的效用不仅仅是由其自身决定的，还会受到其他经济主体行为的影响，并且这种影响并不受自身的控制。也就是说，一个经济主体的效用是由自身行为和其他经济主体的行为共同决定的。

2.2.3.2 外部性理论发展的重要里程碑

(1) 第一里程碑——“外部经济”理论

马歇尔首次在《经济学原理》中提到“外部经济”。马歇尔认为要素应该由土地、劳动、资本、“工业组织”四种要素组成。马歇尔的“工业组织”包括分工、机器的改良、有关产业的相对集中、大规模生产、以及企业管理。马歇尔在论述“工业组织”时指出，货物生产规模扩大而产生的经济包括外部经济和内部经济。企业内部分工和企业间分工都会提高生产效率，前者为内部经济，后者为外部经济。马歇尔认为某个厂商的成本受其自身和其他厂商的规模的双重影响，这为正确分析外部性的问题奠定了基础。

(2) 第二里程碑——“庇古税”理论

庇古利用现代经济学方法,首次从福利经济学角度对外部性理论进行了系统的研究。他全面接受并且充实了马歇尔提出的内部经济和外部经济的概念,对外部性的研究从马歇尔的外部因素对企业的影响扩展到企业(居民)等主体对其他企业(居民)等主体的影响。庇古提出了庇古税用于解决外部性,通过向对环境造成污染的企业征税,以增加企业生产成本的方式,抵消企业在经营过程中给环境、社会带来的影响。

(3) 第三里程碑——科斯定理

科斯所写的《社会成本问题》以“庇古税”为理论背景,他指出外部性是相互的。当不存在交易费用时,庇古税没有存在的必要;当存在交易费用时,把政策成本考虑在内,庇古税可能是低效的制度安排。科斯定理的建立以庇古理论为基础,随着环境问题越来越突出,政府逐渐把科斯定理应用到社会经济活动中,例如碳排放权交易就是其具体应用。但同时科斯定理也有一定的局限性,科斯定理在市场经济不发达的地区不能发挥作用,自愿协商需要产权明确,并且在交易费用较高的情况下难以发挥作用。

2.2.4 环境库兹涅茨曲线理论

2.2.4.1 环境库兹涅茨曲线理论的内涵

美国经济学家西蒙·库兹涅茨对经济发展与收入差距的关系进行了研究,发现两者之间的关系呈现倒“U”型,即收入的差距会随着收入的增长出现先上升后下降的趋势,这就是库兹涅茨曲线。后来学者将倒“U”型曲线用来研究经济与环境之间的关系,即形成了环境库兹涅茨曲线(EKC)。环境库兹涅茨曲线认为经济增长和环境污染之间不是简单的线性关系,而是随着经济的发展,两者之间的会呈现不同的关系。如图 2.1 所示,为环境库兹涅茨曲线,其以时间为横坐标,以环境污染程度为纵坐标。可以看出,当经济发展水平较低时,随着经济的增长,会导致环境的污染程度加深;当经济发展到某一个水平时,环境的污染程度开始随着经济的增长而降低。

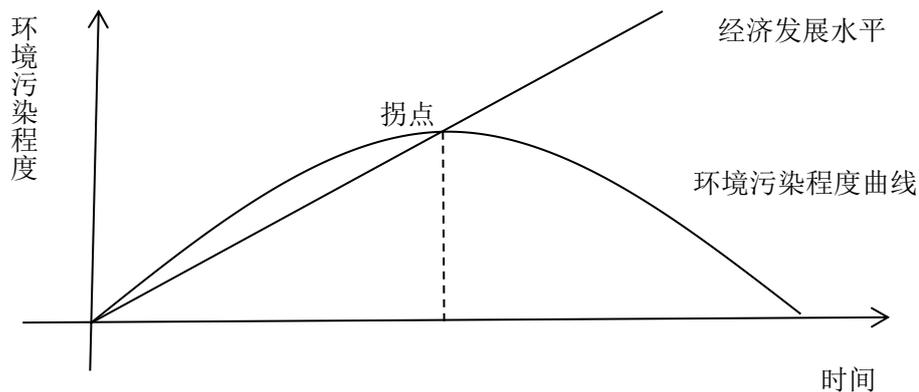


图 2.1 环境库兹涅茨曲线

2.2.4.2 环境库兹涅茨曲线产生的原因

Grossman 和 Kruger 用三种效应解释贸易投资活动等经济活动对环境质量的影响，即：规模效应、结构效应和技术效应。其中，规模效应是指国民经济的产业结构和单位产出排污量不变的前提下，污染物的排放总量会随着经济总量的增长而增加；结构效应是指在经济总量和单位产出排污量不变的前提下，各国的生产性资源会随着贸易政策的改变，向其具有比较优势的产业进行集聚。技术效应是指当经济规模一定和产业结构没有变化时，随着技术的进步，企业对环境的污染程度会降低。Copeland 和 Taylor 利用规模效应、结构效应和技术效应，对环境库兹涅茨曲线产生的原因提供了四种解释。

第一种，从结构效应进行解释。从经济增长的源泉来看，一个国家的经济增长离不开资本的积累。一般情况下，资本密集型的产业对环境的污染程度较高，人力资本密集型的产业对环境的污染程度较低。在一个国家经济发展的初期，需要发展资本密集型产业去实现经济的增长，当到经济发展到后期阶段，经济的增长主要通过发展人力资本密集型产业实现。这个转变使得环境质量随着经济的增长先出现恶化趋势，然后向不断改善过渡，因此环境质量和经济增长就呈现出了“倒U型”。中国经济发展过程中产业结构不断优化，对环境影响较大的工业占比逐年降低，对环境影响较小的服务业占比不断增大。

第二种，将环境质量视为正常商品，人们对该商品的需求会随着收入的增加而增加。在经济发展初期，人们的收入水平较低，对一般商品的消费偏好会优于

对环境质量的消费偏好，所以，在这个阶段人们可以忍受环境污染。随着经济的增长，人们的收入水平上升，会增加对环境质量的偏好，消费者减少一般商品的消费，增加对环境质量的支付。在此阶段，生产企业会迎合消费者的偏好，使用更清洁的技术和能源，进而环境的质量会得到改善。在这种解释中，技术效应起到关键的作用。

第三种，从技术效应角度进行解释。在经济发展处于低水平时，缺乏与环境保护有关的政策，对于生产企业来说，在利润面前治污成本无足轻重。在这种情况下，企业会牺牲环境换取利润的增长。但是，随着环境保护政策的实施和加强，生产企业需要升级设备和技术，减少对环境的污染。

第四种，从规模效应和技术效应角度进行解释。排污的效率会随着排污规模的扩大而提高，排污投入也会随之转化为利润。所以，即使在政府的环境标准和要求没有提高的情况下，企业也会增加投资，更新技术和设备，减少对环境的污染。在这种情况下，由规模效应引起技术效应是“倒U型”形成的主要原因。

2.2.4.3 环境库兹涅茨曲线的局限性

(1) 传统的环境库兹涅茨曲线是根据西方发达国家的经济发展经验总结出的经济增长与环境质量之间的关系，作为发展中国家的中国，环境库兹涅茨曲线不一定适用于中国的经济发展，所以我国应该立足国情，走“边发展边治理”的道路。

(2) 环境质量和经济增长之间不仅仅是一种简单的单向关系。环境库兹涅茨曲线所得出的环境质量会随着增长先恶化后改善的结论是存在前提的，即环境的恶化程度不能超过生态阈值，否则环境的恶化会不可逆。如图 2.2 所示， EKC_1 和 EKC_2 是环境恶化程度超过了生态阈值的情况，其中 EKC_1 的虚线段是不存在的。可以看出，只要拐点高于生态阈值，随着经济的增长，环境的恶化程度会加剧。

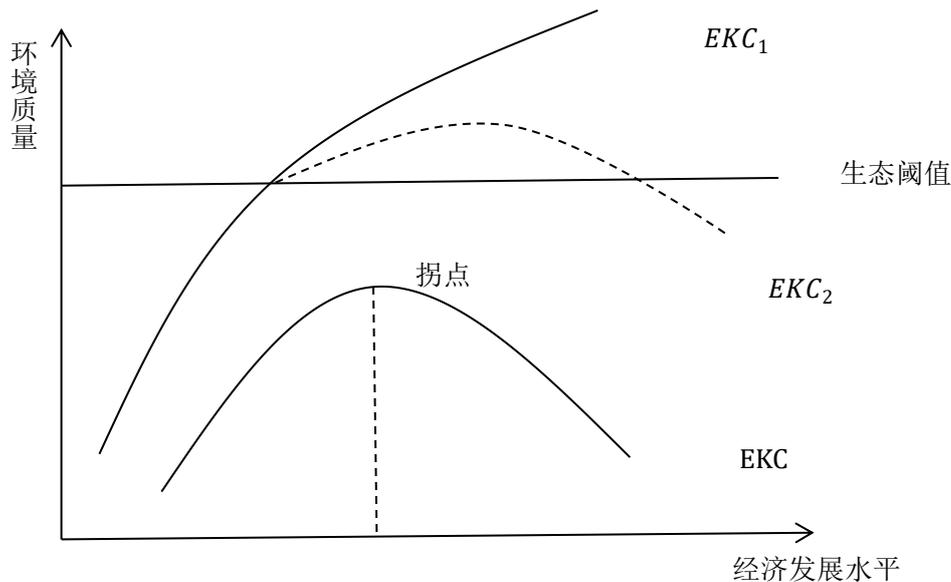


图 2.2 生态阈值与环境库兹涅茨曲线

(3) EKC 假说之所以在发达国家成立，主要在于发达国家工业化达到一定程度时，会有计划地将高污染产业转移到国外欠发达国家或地区，并通过国际贸易再获得他们需要的高污染产品。发达国家经济发展得到了增长，而环境问题则由发展中国家承担。

2.2.5 增长极理论

2.2.5.1 增长极理论的概述

增长极的概念最先是由法国经济学家费朗索瓦·佩鲁在 1950 年提出的。佩鲁认为经济增长不会在所有地方同时出现，它会以不同的程度先在某些地方出现，形成增长点或增长极后再向外扩散，最终会对整个经济产生影响。增长极理论的核心思想是，在经济发展的过程中，由于某个区域单元聚集了具有创新能力的企业或优势产业，技术、资本、人才等要素在该区域集中，具有规模效益，自身快速增长并且对相邻区域产生了辐射带动作用，拉动了邻近地区的经济共同发展。我国向世界作出了 2030 年前实现碳达峰的国际承诺，这需要我国各省份共同承担碳减排责任。由于地理位置、资源环境和交通条件等因素，我国各省份间经济社会发展存在差别，碳排放规模和碳排放强度等也有所不同，比如资本、技术等

生产要素主要向东部沿海聚集,这会使得东部沿海省份碳排放具有规模大和强度低的特点。

2.2.5.2 增长极的基本功能

极化效应是增长极的一个功能。具有比较优势的产业迅速发展,形成集聚优势,进而比较优势产业不断扩大,吸引生产要素等不断向增长极核集聚,这就是极化现象。极化现象会带来集聚经济,如企业聚集、区位聚集等。极化效应是极化的直接作用结果,极化效应主要表现为资本、技术、人力等要素从外围区向核心区集聚,推动该区域的发展,形成增长极。因为极化效应的存在,某一地区的经济活动会向少数地点集中,即使不再有先前的吸引力,只要这些地方还拥有集聚优势,它们依然会保持经济繁荣。但是,当集聚的外部成本大于集聚经济所带来的利益时,企业的发展就会受到影响,差距过大时,会导致增长极消失和经济不再繁荣。

扩散效应是增长极的另一个功能。扩散效应表现为原先向增长极集聚的生产要素逐步向外围扩散,即增长极对周围地区产生辐射带动作用,拉动其经济增长,从而缩小周边地区与中心发达地区的差距。极化效应与扩散效应会出现在不同的发展阶段,发展初期主要表现为极化效应,并呈现出加强的趋势,当发展到一定程度时,扩散效应开始强于极化效应。极化效应和扩散效应的强度与距离核心区域的远近有关。这两种效应可以用以下公式来表示:

$$L_i = L_0 \cdot e^{-\alpha i}$$

公式中, L_i 为增长极的极化或扩散程度; L_0 为强度初始值或常数; e 为自然对数的底; α 为距离衰减系数, i 为距离半径。从公式中可以看出,距离增长极越近,极化效应或者扩散效应强度越大;距离增长极越远,极化效应或者扩散效应强度越小。

2.2.6 经济增长理论

新古典经济增长理论以索罗模型为代表。索罗模型在对哈罗德-多马模型的生产技术假设进行修正的基础上,采用柯布-道格拉斯函数,让哈罗德-多马模型中的经济增长率可以自发的与人口增长率相等。在没有技术进步的情况下, G 表

示收入增长率, $G_L = \frac{\Delta L}{L}$ 表示劳动增长率, $G_K = \frac{\Delta K}{K}$ 表示资本增长率, α 表示资本对收入的贡献, $(1 - \alpha)$ 表示劳动对收入的贡献, 则有 $G = \alpha G_K + (1 - \alpha)G_L$, 这是新古典经济增长模型的基本公式。该理论认为资本增长率、劳动增长率以及边际生产力决定收入增长率。也就是说, 可以通过调节资本和劳动的比例, 实现均衡增长。新古典经济增长理论的一个缺陷是没有将技术进步作为重要因素纳入到模型中, 而新经济增长理论则将技术进步内生。罗默、卢卡斯等经济学家对新经济增长理论作出了重要贡献, 是其主要代表人物。新经济增长理论认为劳动力知识的积累和人力资本的形成会拓展技术进步, 而技术进步会支持经济进而使得经济增长。

作为世界上最大的发展中国家, 中国经济增长速度一直排在世界大国前列, 我国经济的快速增长伴随着大量二氧化碳的排放。从长期看, 碳排放约束会对经济增长产生重要影响, 工业部门是我国碳排放的主要来源, 各省份要实现碳达峰目标需控制重点领域碳排放。碳排放与经济结构、技术类型和经济增长速度等有关, 近些年, 我国政府根据国情不断调整经济增长预期目标, 经济增长方式由粗放型向集约型转变。在保持我国经济稳定发展的同时, 通过大力发展服务业、高新技术产业, 降低高耗能产业占比, 加大研发低碳环保技术等措施, 保证较高增长率下的较低碳排放。

3 各省份碳达峰相关因素分析

3.1 影响我国碳达峰的因素确定

依据“十四五”时期经济社会发展中绿色生态的相关指标，选取人均 GDP、森林覆盖率、能源生产总量、废水排放总量、废气排放总量、一般工业固体废物排放总量、单位 GDP 能耗、R&D 经费等指标来衡量中国及各省份生态环境状况和碳排放情况。考虑到港澳台和西藏数据的可得性，本文仅对中国及 30 个省份 2000—2019 的数据进行了分析。数据来源于中国及各省份统计年鉴、生态环境状况公报。

人均 GDP 是指某一地区在一定时间内（通常为一年）的国内生产总值与该地区总人口的比值。人均 GDP 是反映国家或地区在一定时期内经济发展水平和经济发展活力的指标。森林覆盖率是指某一地区森林面积与土地总面积的比值。森林覆盖率可以反映一个地区森林资源的丰富度，是衡量地区生态环境状况的重要指标。能源生产总量是指某一地区在一定时期内生产的一次能源总量。能源生产总量是衡量地区能源生产水平、规模、构成和发展速度的综合指标。单位 GDP 能耗是某一主体在一定时期能源消耗总量与国内生产总值的比值，该指标可以说明一个国家或地区经济发展对于能源的依赖程度以及对能源的利用效率水平。R&D 经费是研发与试验发展经费的简称，反映了国家或地区对科技投入的规模程度，是衡量国家或地区科技实力、创新能力和国际竞争力的重要指标。“三废”是指在生产或生活过程中排放的废水、废气和固体废弃物，是用来衡量环境污染状况的重要指标。一般工业固体废物产生量是企业在一定时期进行生产活动所产生的固体废物量。废水排放总量是指国家或地区的企业在一定时期内进行生产和生活活动向外排放的废水与污水之和。废气排放总量是指国家或地区的企业在进行生产活动过程中排放的各种废气的总量。考虑到数据的可得性和各成分变化趋势的一致性，本论文选取废气中排放的二氧化硫总量来代表废气排放总量的变化趋势。

层次分析法（AHP）综合了人们的主观判断，是一种简单实用的系统性、定性与定量相结合的方法，多用于水、大气、生态等环境领域的研究。国内外关于碳排放关键影响因素的文献较多，为依据经验对碳排放相关指标量化提供了科学参考，此方法可运用于碳达峰的影响因素权重的确定。本文运用层次分析法（AHP）

对影响碳达峰目标的影响因素进行权重分析，首先如图 3.1 所示，构造碳达峰指标体系，其次是对各影响指标两两比较构成判断矩阵，判断矩阵的一致性比例 $CR=0.03 < 0.1$ ，一致性检验符合要求。

各相关指标对碳达峰的成对比较矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 6 & 1/2 & 6 & 8 & 8 & 8 \\ 1/6 & 1 & 1 & 1/5 & 1/2 & 3 & 3 & 3 \\ 1/6 & 1 & 1 & 1/5 & 1/2 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 5 & 5 & 1 & 6 & 8 & 8 & 8 \\ 1/6 & 2 & 2 & 1/6 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ 1/8 & 1/3 & 1/3 & 1/8 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 1/8 & 1/3 & 1/3 & 1/8 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 1/8 & 1/3 & 1/3 & 1/8 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

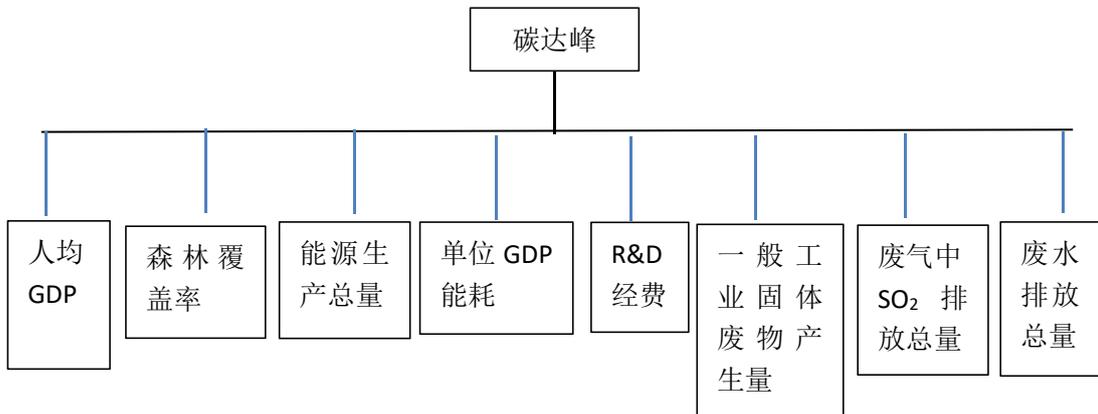


图 3.1 碳达峰相关因素指标体系

结果如表 3.1 所示，单位 GDP 能源消耗总量和人均 GDP 所占权重最高，研发与试验发展经费支出、森林覆盖率和能源生产总量所占权重次之，废水排放总量、废气中二氧化硫排放总量和一般工业固体废物产生量所占权重最低。由此可知，能源强度、经济水平和技术水平等因素对碳达峰目标的实现具有重要影响。

表 3.1 各要素对碳达峰目标的排序权重

相关指标	权重
单位 GDP 能源消耗总量	0.3590
人均 GDP	0.3163
研究与试验发展经费支出	0.0917
能源生产总量	0.0706
森林覆盖率	0.0706
废水排放总量	0.0306
废气中二氧化硫排放总量	0.0306
一般工业固体废物产生量	0.0306

3.2 各省份碳达峰相关因素概况

3.2.1 各省份人均 GDP

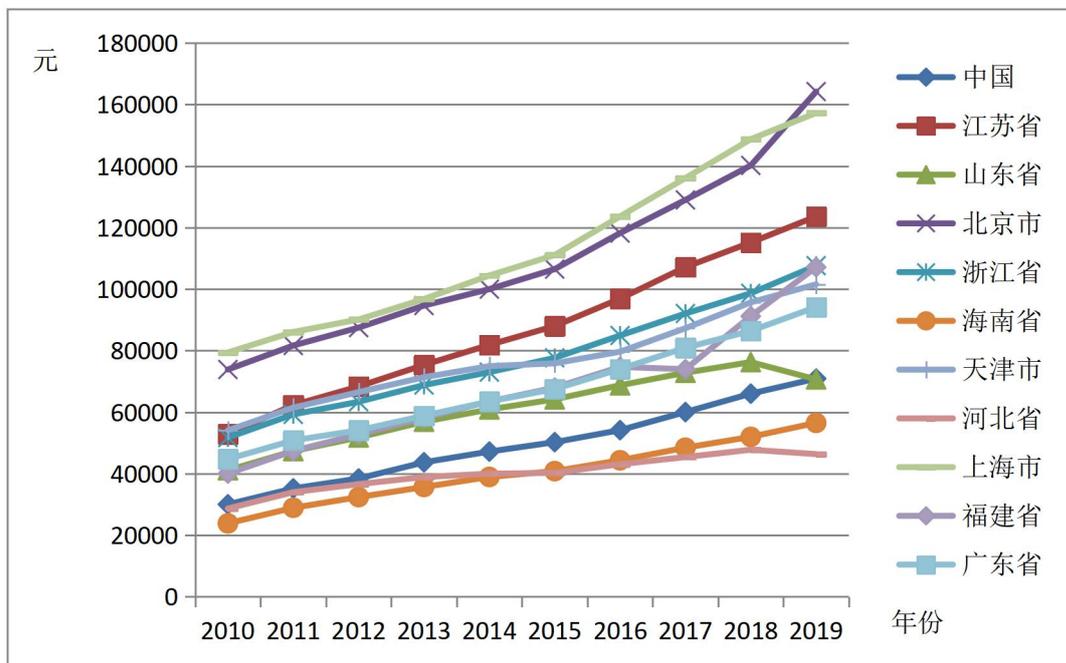


图 3.2 东部地区省份人均 GDP

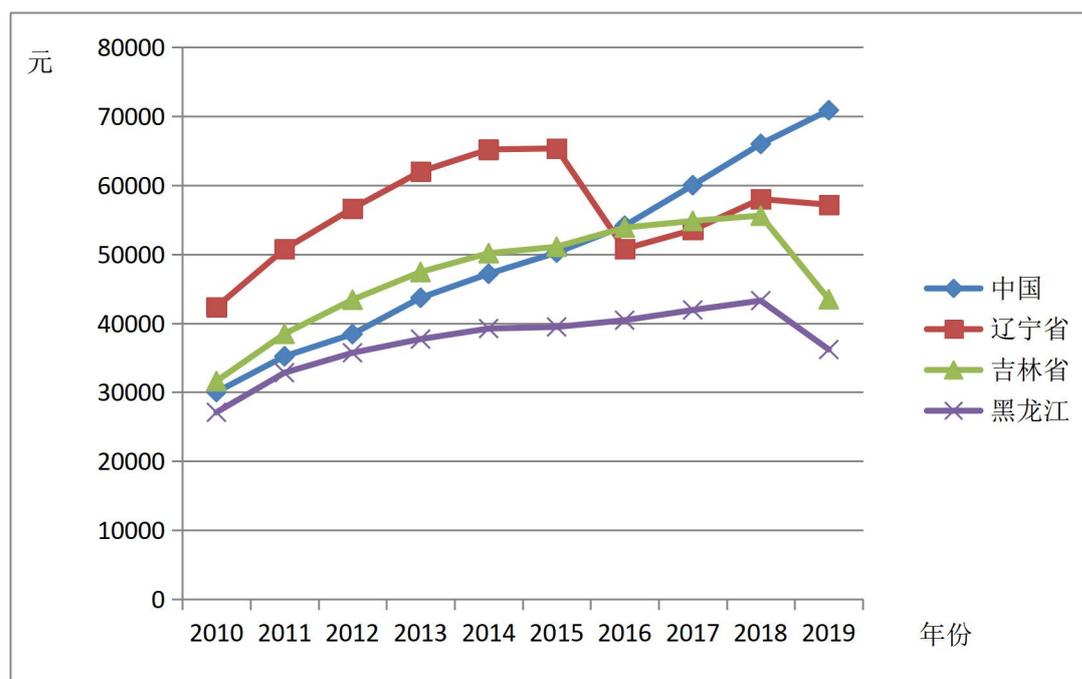


图 3.3 东北地区省份人均 GDP

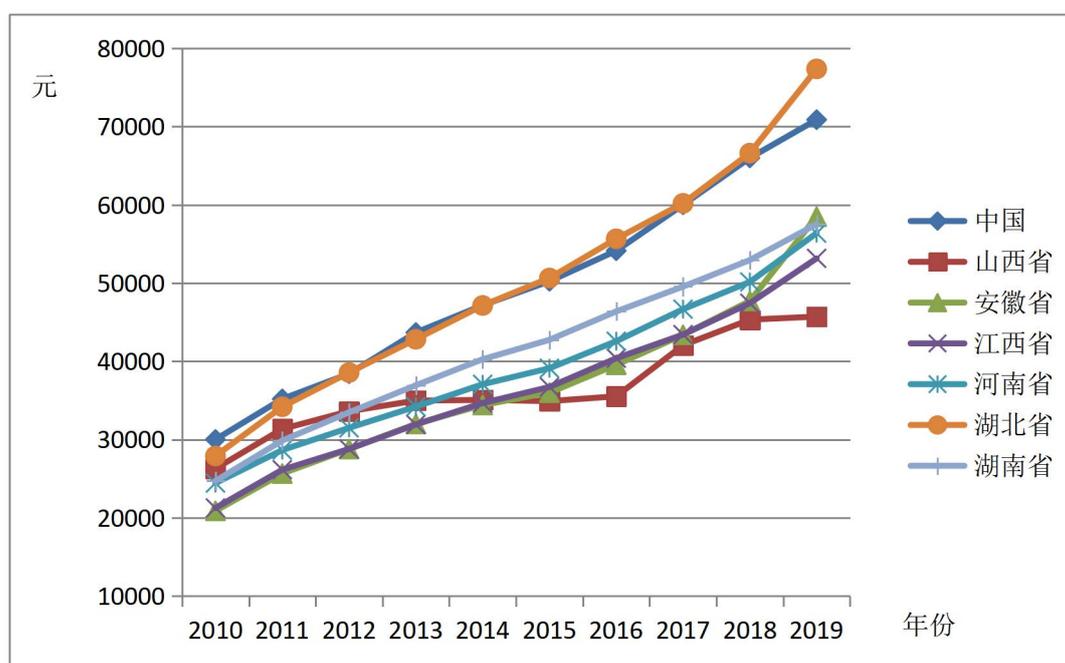


图 3.4 中部地区省份人均 GDP

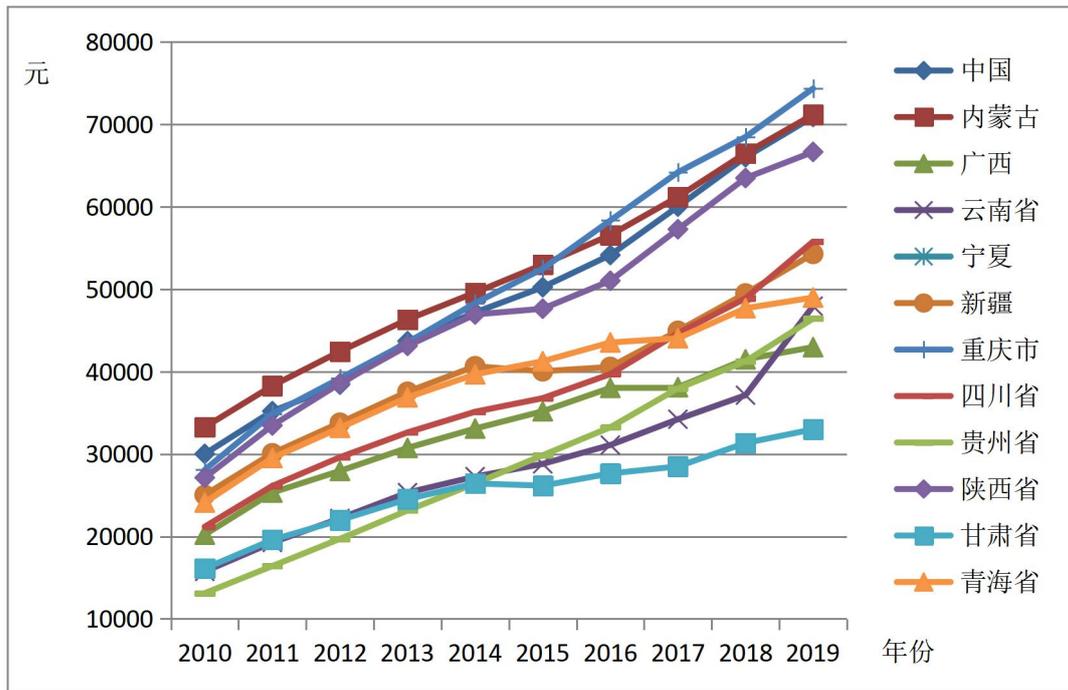


图 3.5 西部地区省份人均 GDP

如图 3.2-3.5 所示，全国和各省份人均 GDP 总体呈上升趋势，其中东部地区大部分省份人均 GDP 要高于全国平均水平，其他地区省份人均 GDP 基本持平或低于与全国人均 GDP。部分省份人均 GDP 增长率有先上升后下降的趋势，这与当前中国经济经过高速发展以后，追求平稳的高质量经济发展的国情相一致。山东、吉林等部分省份 2019 年人均 GDP 为负增长，其背后是消费、投资、第一二产业增加值等多项指标的大幅下降。总体来看，东北振兴实施以来，东北经济发展取得了阶段性的胜利。但是 2013-2016 年，辽宁人均 GDP 出现明显下滑，2015 年 GDP 增速全国倒数第一，2016 年为全国唯一 GDP 负增长的省份，经济增长乏力。这其中很大一部分原因是挤掉了过去几年经济数据中注入的水分。2017 年以后辽宁人均 GDP 增长率回升，经济发展势头良好，并逐渐追上了全国经济发展的步伐。山西是我国的能源大省，煤炭资源在全国具有举足轻重的地位。十八大以来，深化产业结构战略性调整在全国铺展开来，促进产业转型升级成为经济发展的主题。这对于过度依赖煤炭资源的山西的经济发展带来了压力，经济发展在 2013-2016 年呈现了断崖式下降。随着山西一边发展清洁煤炭，一边发展多元产业，成功实现了产业结构转型，走出了资源诅咒的困境，经济发展趋势向好。

3.2.2 各省份森林覆盖率

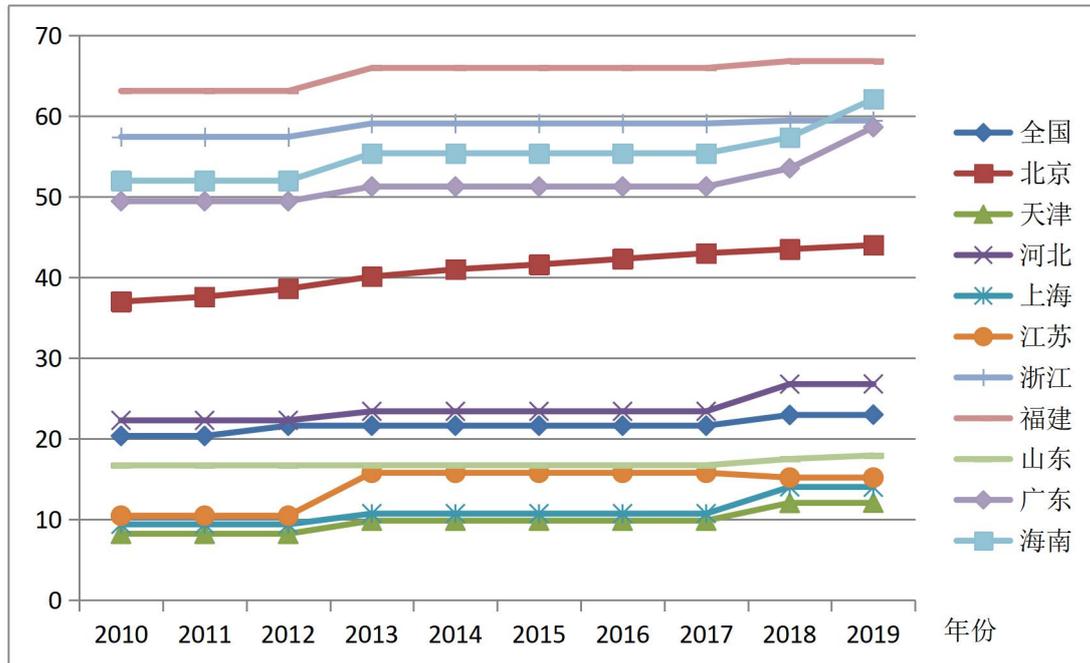


图 3.6 东部地区省份森林覆盖率

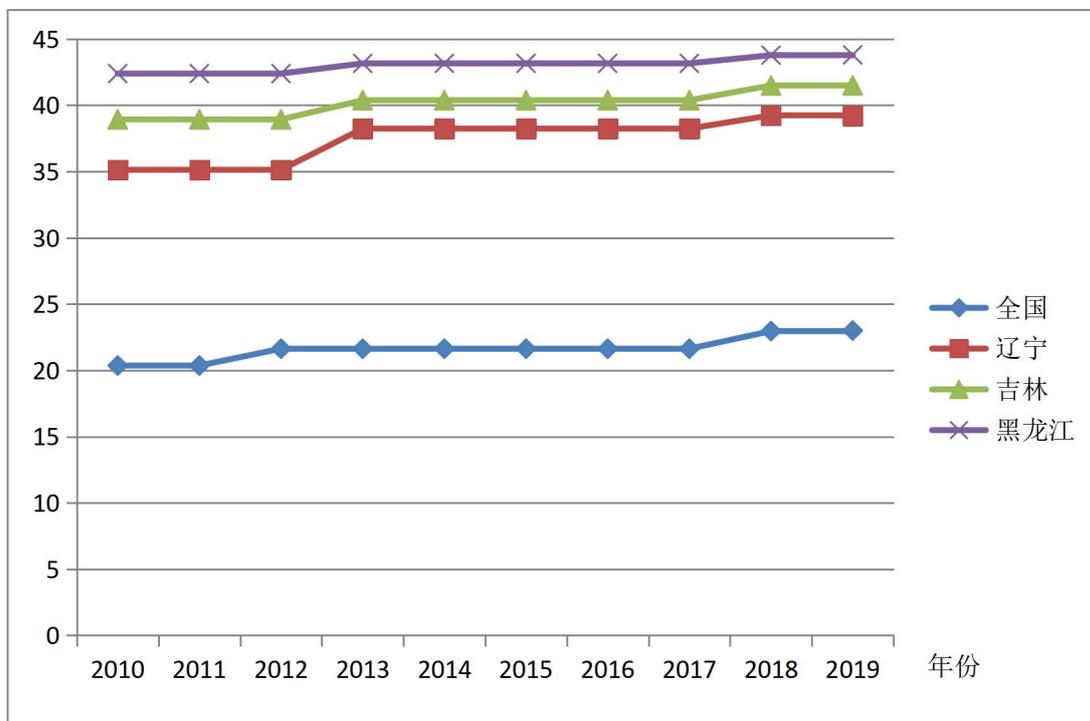


图 3.7 东北地区省份森林覆盖率

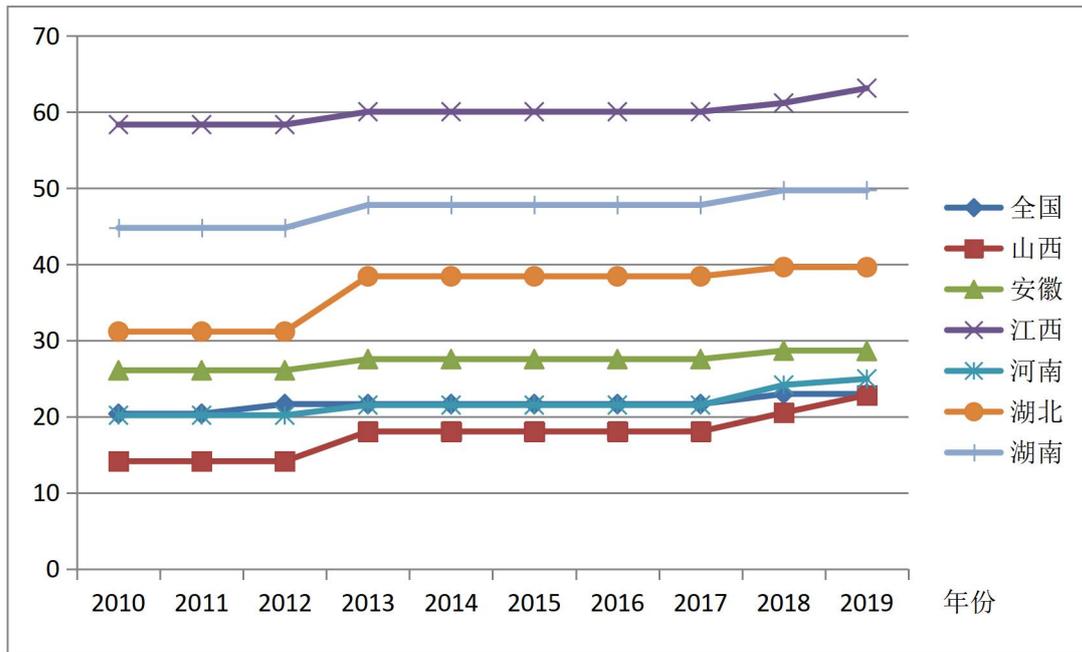


图 3.8 中部地区省份森林覆盖率

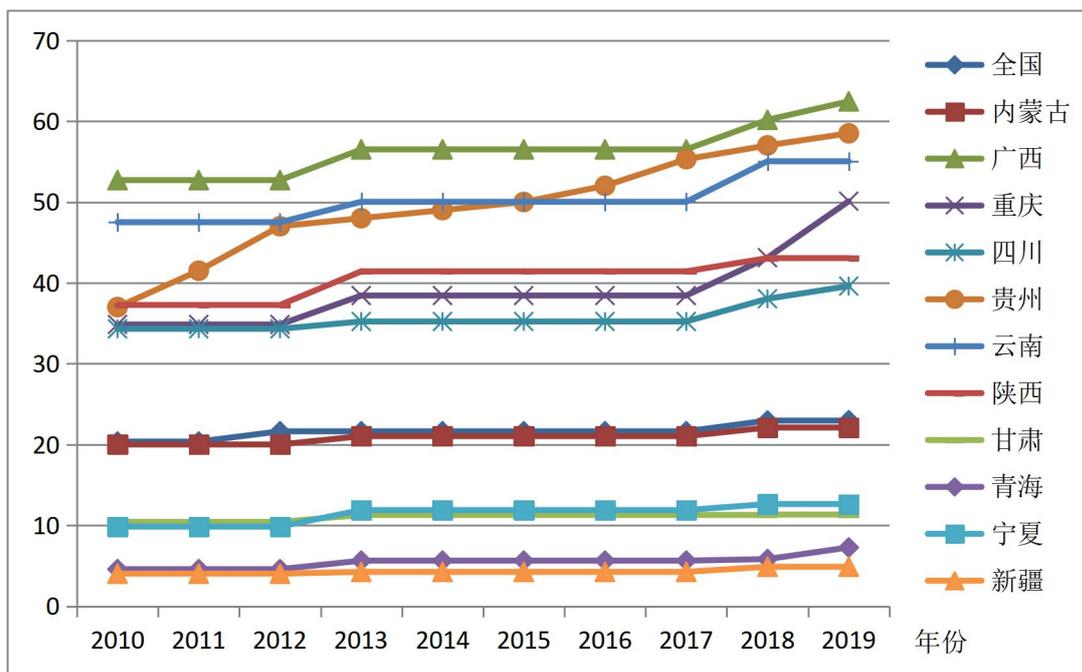


图 3.9 西部地区省份森林覆盖率

如图 3.6-3.9 所示，中国及各省份森林覆盖率逐年稳定上涨，南方多省得益于得天独厚的自然地理环境，森林覆盖率在全国处于前列，其中福建、浙江、海南、广东、江西、湖南、广西、贵州和云南等省份的森林覆盖率在 2019 年均超

过 50%，远超全国森林覆盖率。而新疆、甘肃、宁夏和青海等省份由于地处西北，自然地理环境恶劣，森林覆盖率不足 20%，在全国各省份中处于落后水平。近年来，随着我国不断推进“三北”防护林工程项目，西北地区生态环境有了很大改善。山东、上海、江苏和天津地处东部地区，其森林覆盖率与其发达的经济水平不匹配。这些省份地势比较平坦，人口密度大，经济活动较为频繁。由于城市众多，工业发展、人口居住、农业发达都需要占用土地，天然林地也就相对较少，森林覆盖率自然偏低。而山西、宁夏由于地处我国黄土高原地区，长期以来频繁的人口活动，对脆弱的生态环境造成了破坏，水土流失严重，导致森林覆盖率不高。

3.2.3 各省份能源生产总量

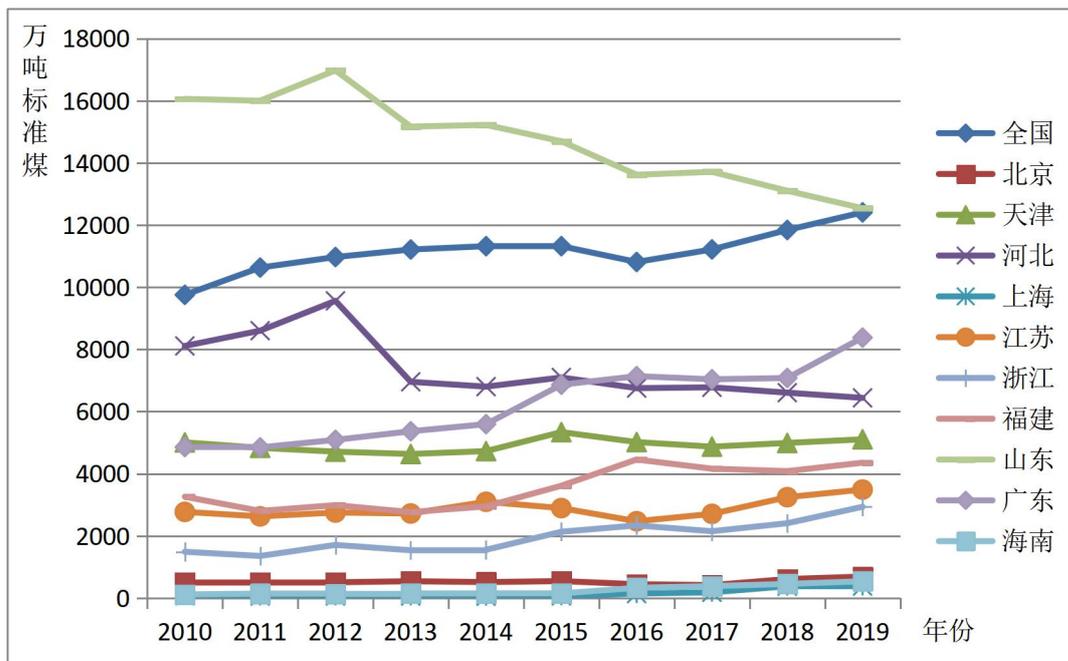


图 3.10 东部地区省份能源生产总量

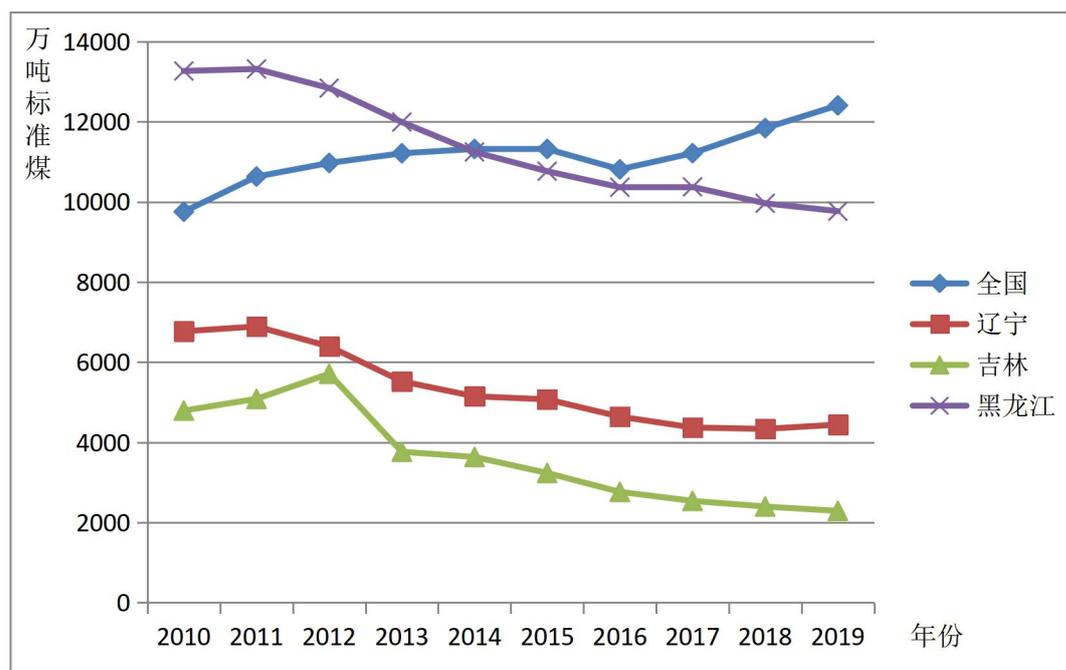


图 3.11 东北地区省份能源生产总量

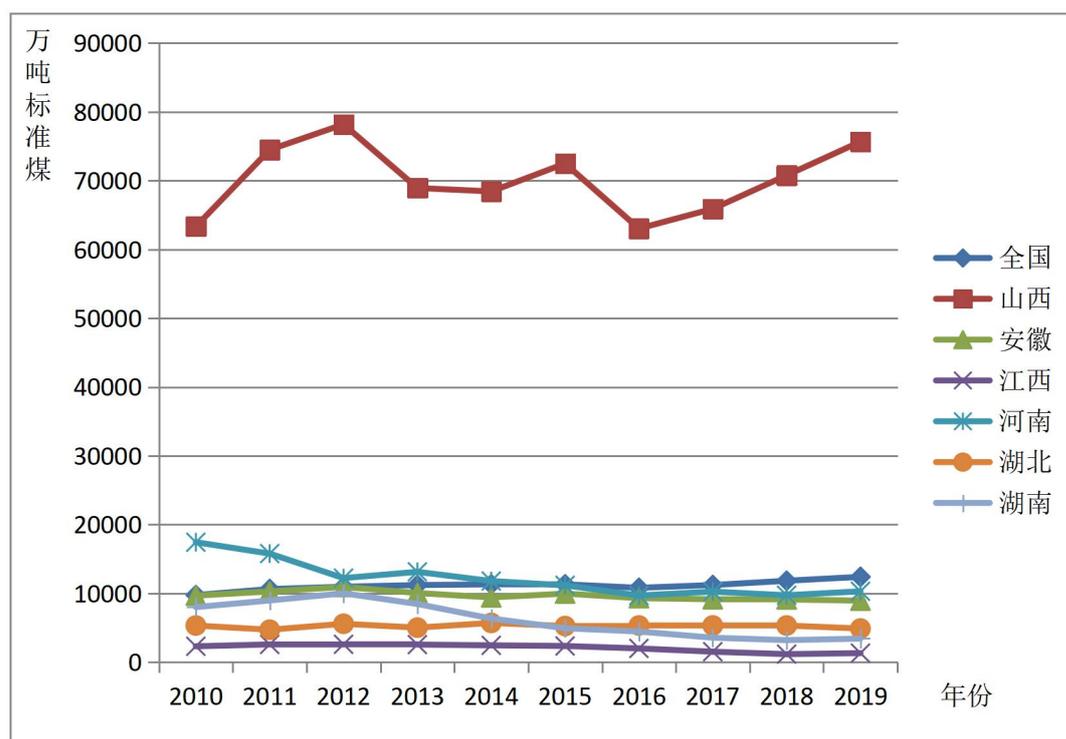


图 3.12 中部地区省份能源生产总量

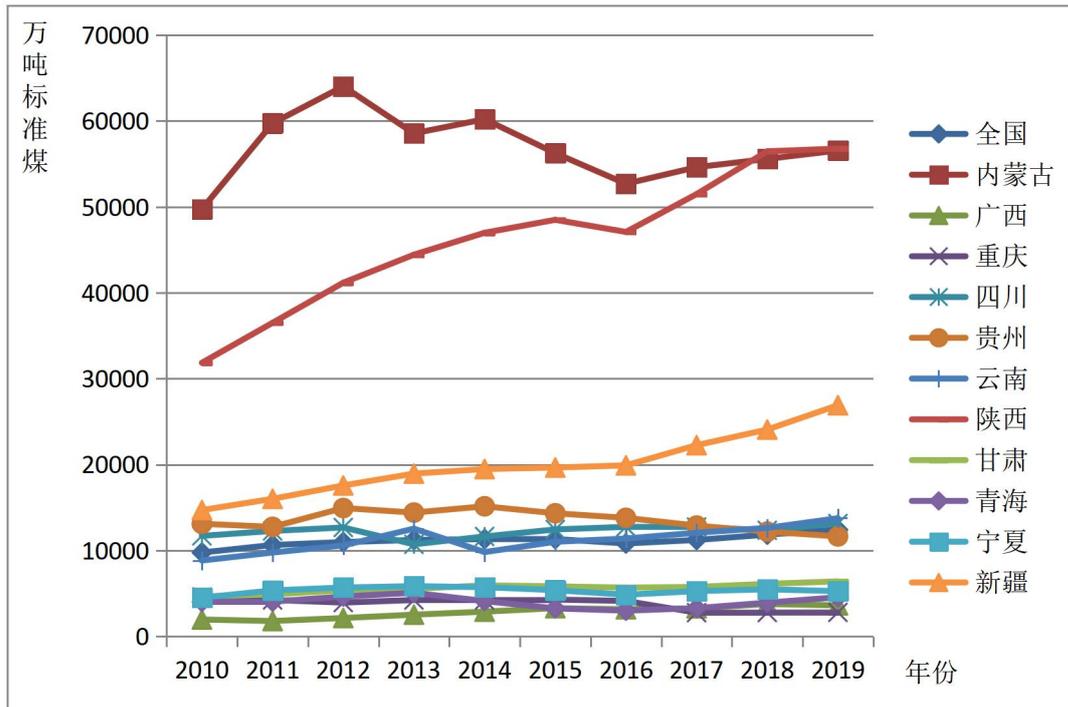


图 3.13 西部地区能源生产总量

如图 3.10-3.13 所示，山东、山西、内蒙古、陕西和新疆等省份是能源生产大省，煤炭、石油和天然气等矿产资源十分丰富。东部、中部和西南各省份能源资源相对匮乏，除山东、山西以外，能源生产总量均持平或低于全国平均水平。西北地区地广人稀，但能源资源非常丰富，包括风能和太阳能等新能源也十分丰富。“十八大”以来，国家开始着重推进产业结构转型升级，全国煤炭资源需求量减少，山东、河北、内蒙古等省份 2013 年能源生产总量开始呈现下降趋势。而陕西、新疆等省份能源资源丰富，已探明的能源资源储量在全国位于前列，能源生产总量也在逐年平稳上升，为本省份和全国经济发展提供了强有力的能源支持。其中东北地区属于我国的老工业基地，为推动我国经济发展起到了重要作用。东北三省能源资源禀赋具有“煤炭、天然气少，石油、非常规油气多”的特点，近年来能源生产总量呈现下降趋势。

3.2.4 各省份单位 GDP 能源消耗量

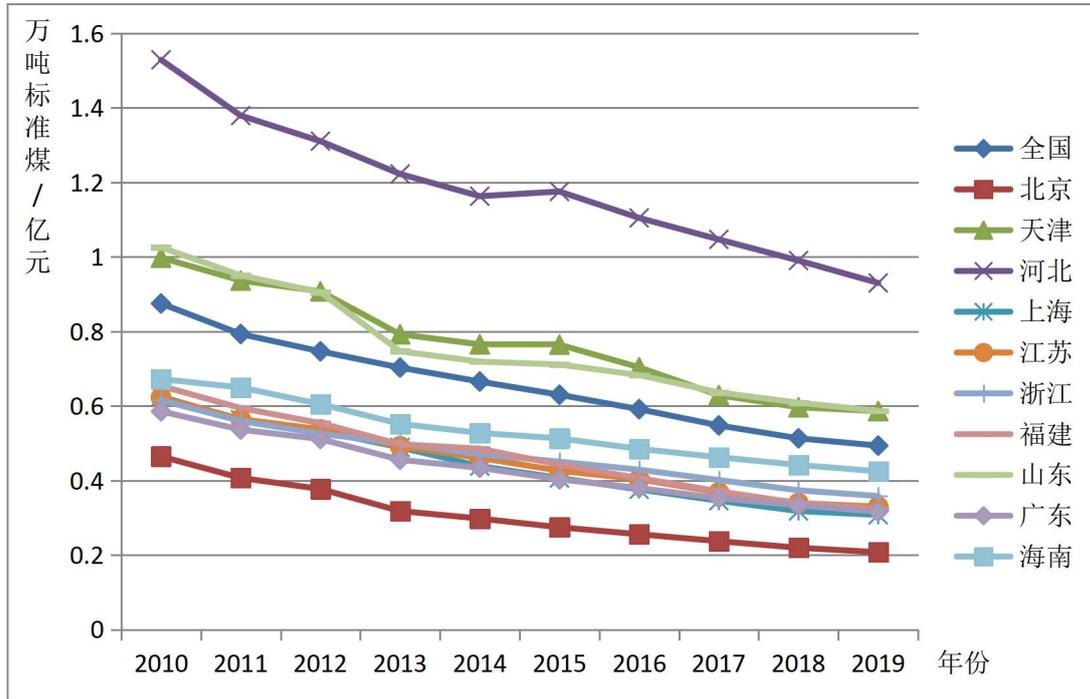


图 3.14 东部地区省份单位 GDP 能源消耗量

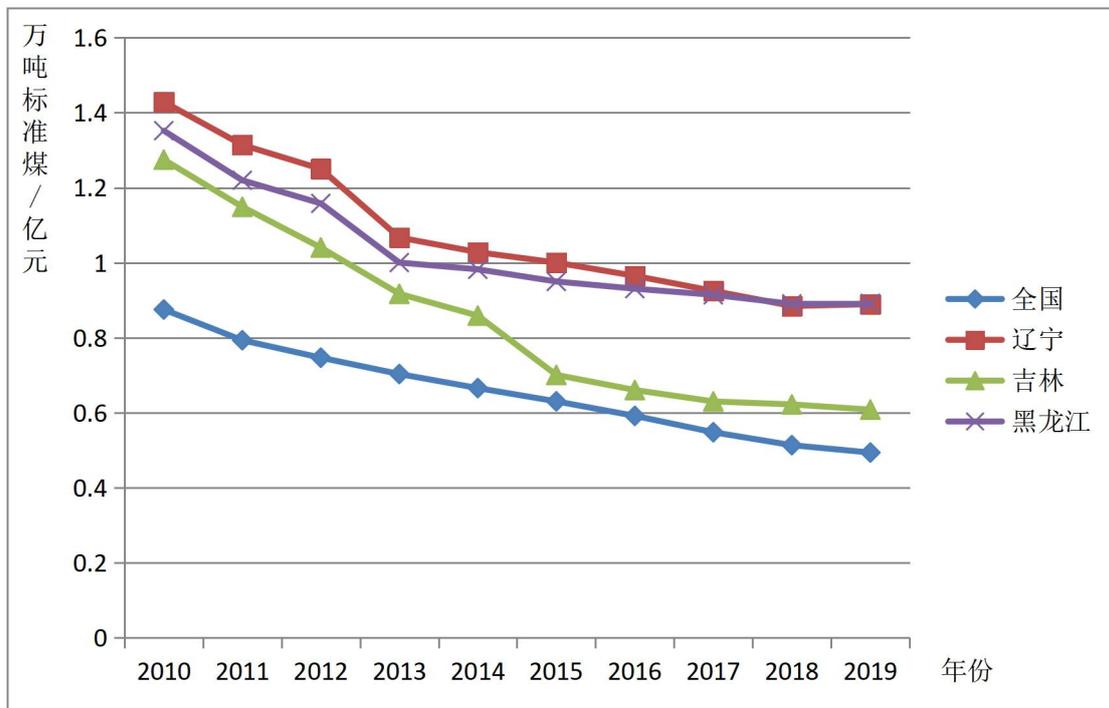


图 3.15 东北地区省份单位 GDP 能源消耗量

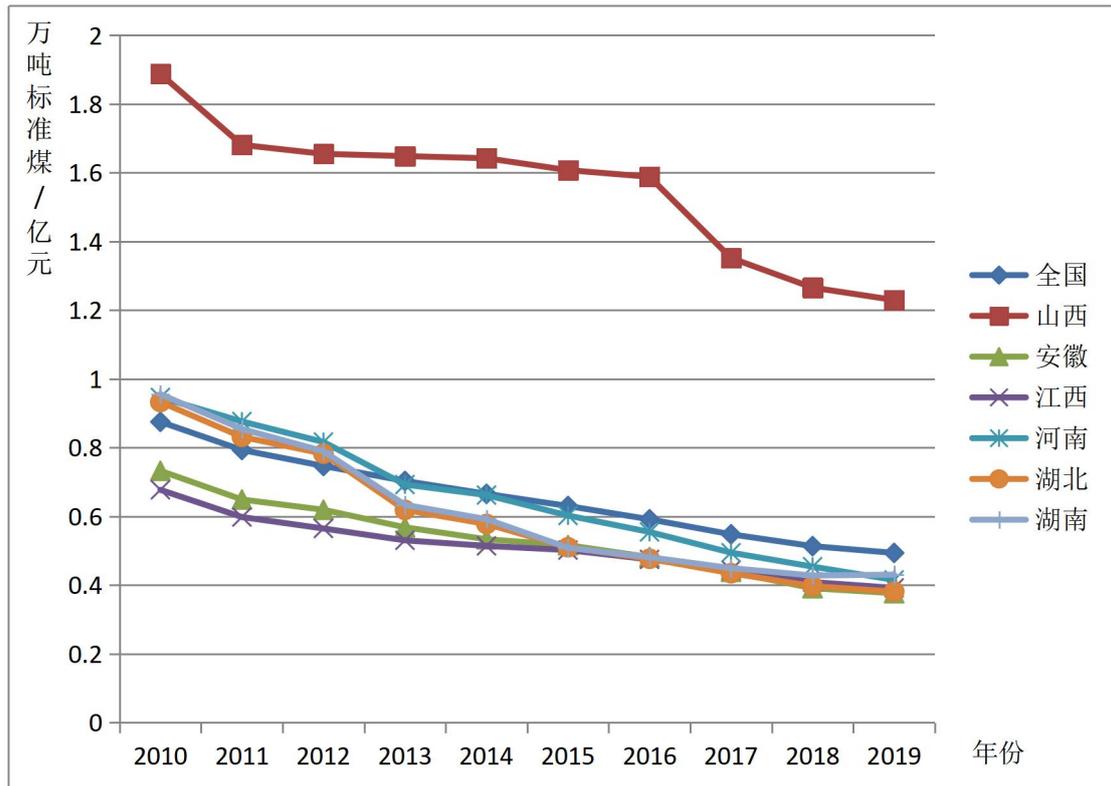


图 3.16 中部地区省份单位 GDP 能源消耗量

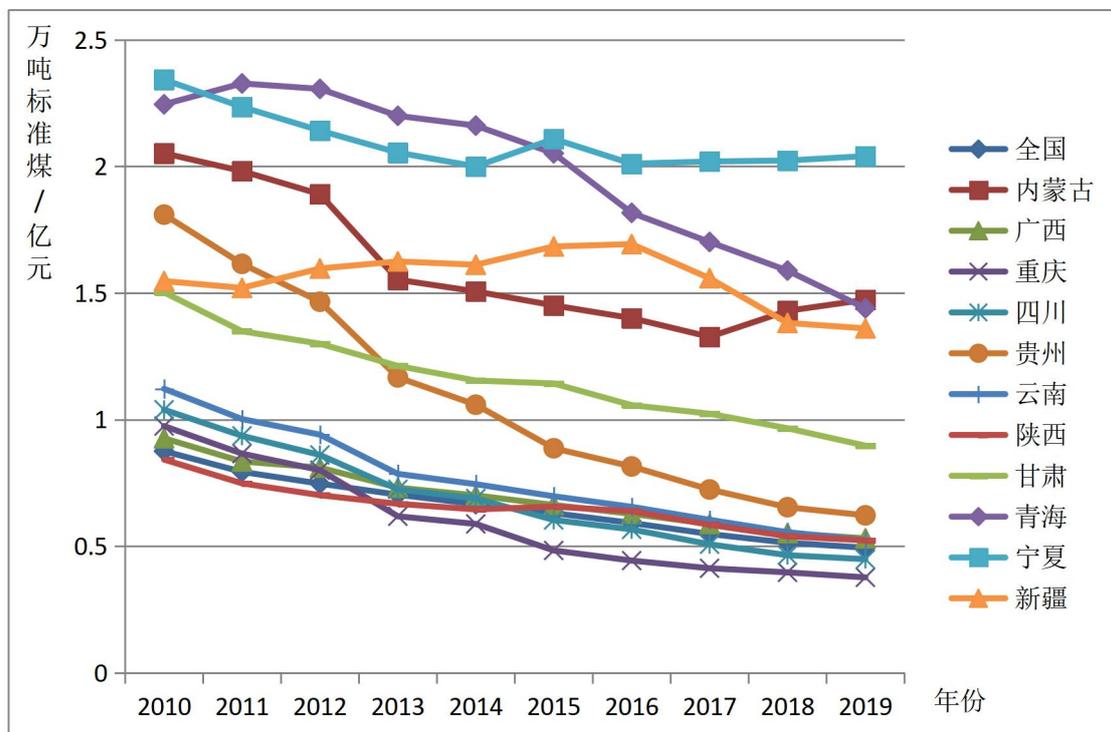


图 3.17 西部地区单位 GDP 能源消耗量

如图 3.14-3.17 所示,我国各省份单位 GDP 能源消耗总量总体呈现下降趋势。单位 GDP 能耗呈现出明显的空间差异性,西北、华北、东北等地区单位 GDP 能源消耗总量普遍较高,发达省份的单位 GDP 能源消耗总量普遍较低。其中河北、山西、宁夏、青海、新疆、内蒙古、甘肃、黑龙江、吉林和辽宁等省份单位 GDP 能源消耗总量远高于全国平均水平,这主要是由于第二产业比重较高,煤炭占能源消耗的比重较大,技术水平相对比较落后等原因造成的。东中部地区大部分省份经济发展基础较好,山西、河北、天津和山东等省份单位 GDP 能源消耗量逐年降低,但因大量的能源资源开采和第二产业偏重,整体能源利用率水平依然较低,其他各省份能源利用率均高于全国平均水平。

3.2.5 各省份研究与试验发展经费支出

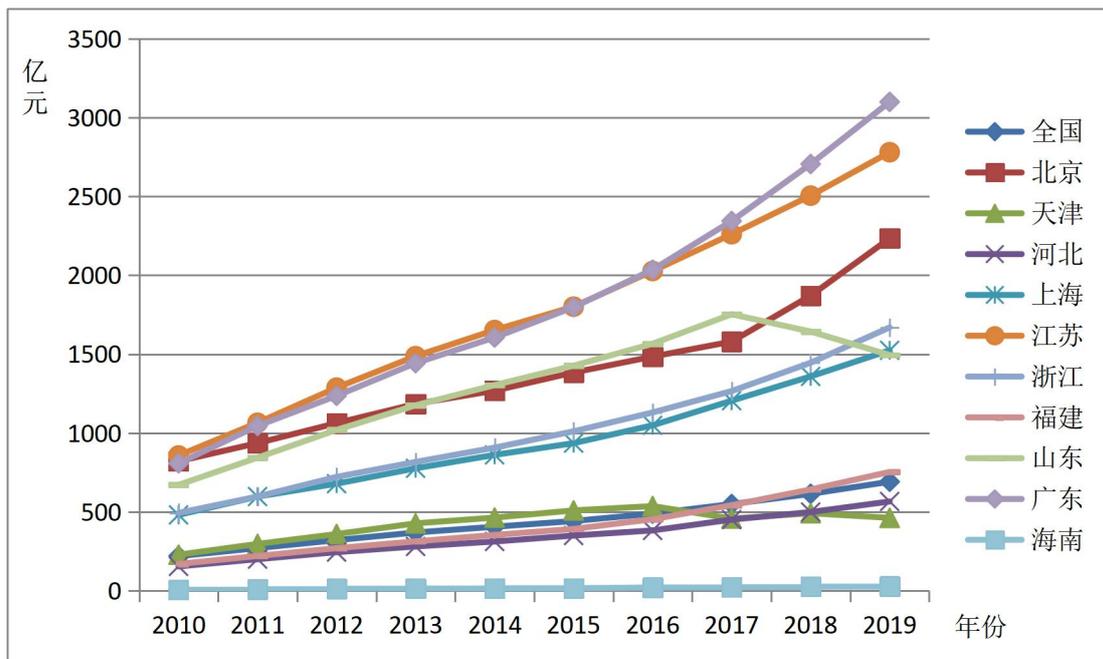


图 3.18 东部地区省份研究与试验发展经费支出

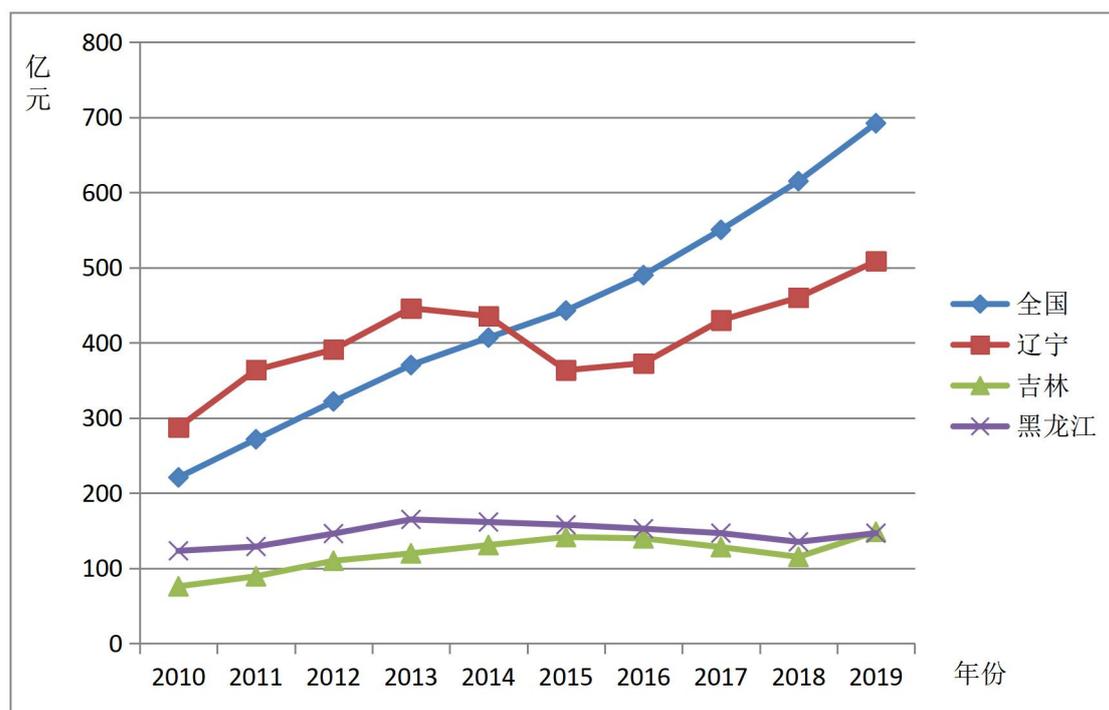


图 3.19 东北地区省份研究与试验发展经费支出

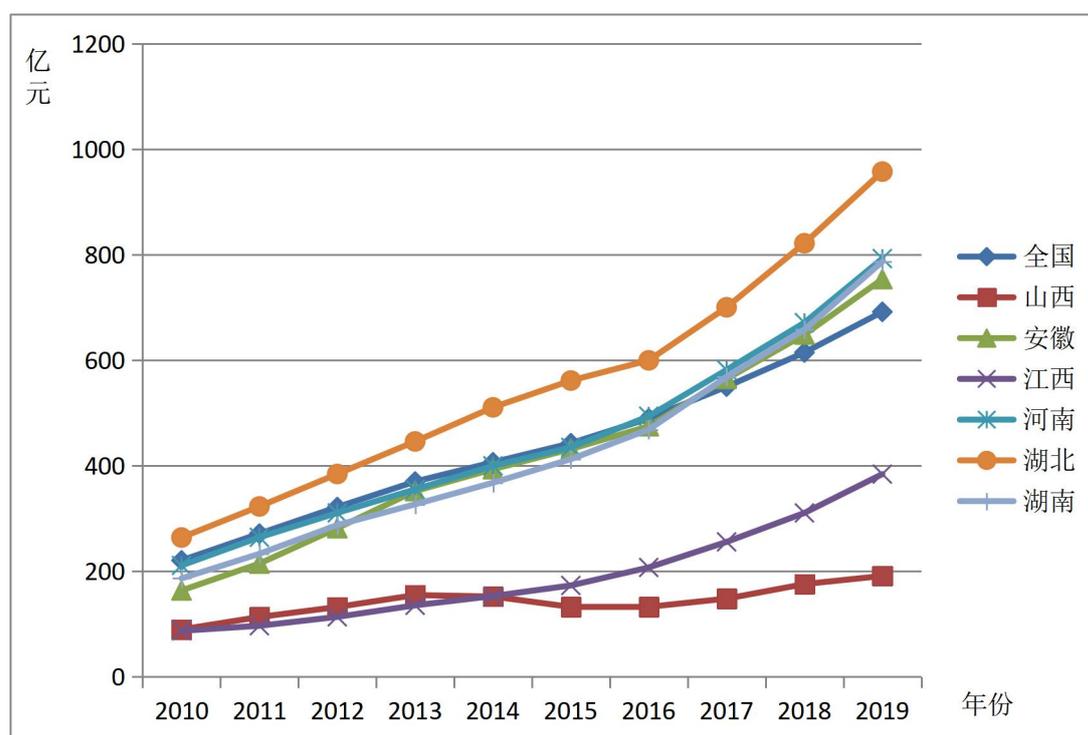


图 3.20 中部地区省份研究与试验发展经费支出

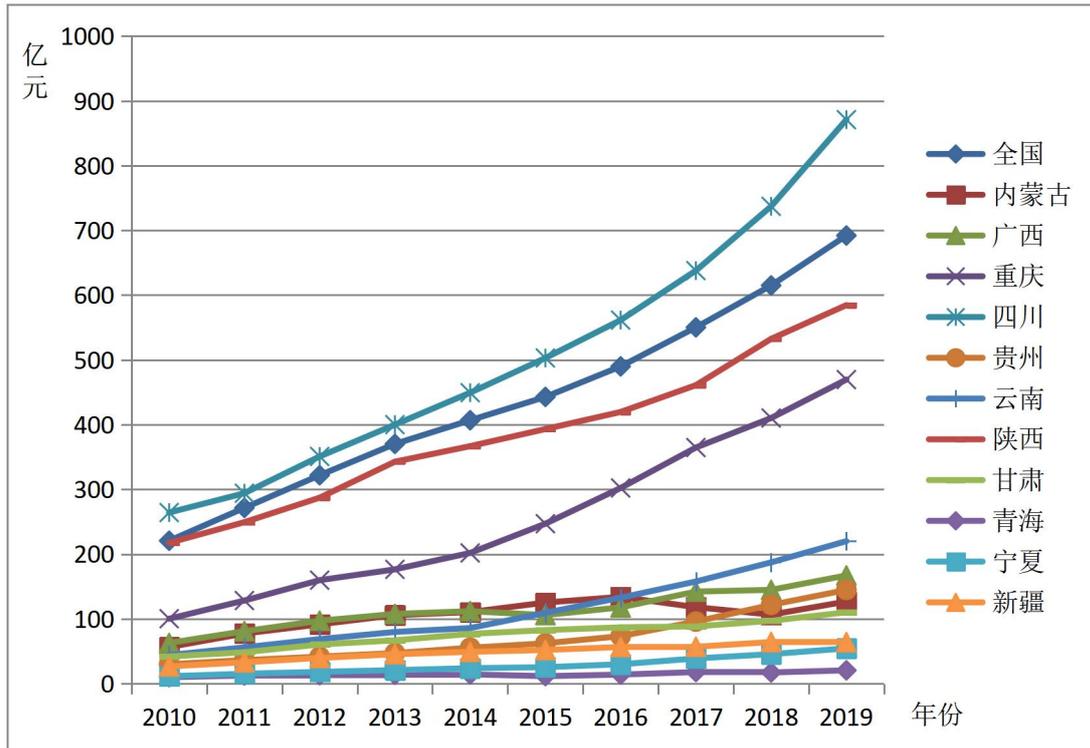


图 3.21 西部地区省份研究与试验发展经费支出

如图 3.18-3.21 所示, 全国及各省份科研经费持续保持增长态势, 研究与试验发展经费投入强度稳步增长。各地区研发经费投入分化明显, 东部地区除了经济体量较小的海南以外, 其余各省份研发经费投入较大, 东北省份中, 辽宁研发投入与全国平均水平差距较小, 2010-2014 年, 辽宁研发投入高于全国平均水平, 2014 和 2015 年研发经费投入均有一定降幅, 2015 年开始低于全国平均水平, 之后研发经费投入开始呈现上升趋势。而黑龙江和吉林研发投入较为平稳, 但与全国平均水平差距有所拉大。近年来, 湖北、湖南、安徽和河南等省份经济发展较快, 得益于这些省份对于创新的重视, 持续加大经费投入。西部地区各省份研发经费增长态势明显, 研发经费投入与地区经济发展水平密切相关, 四川、重庆和陕西等省份研发经费位列西部前列, 超过西部其他省份研发经费投入总和, 其中四川为西部地区研发经费投入唯一超过全国平均水平的省份, 但与东部地区经济发达省份相比还有一定差距。

3.2.6 各省份一般工业固体废物产生量

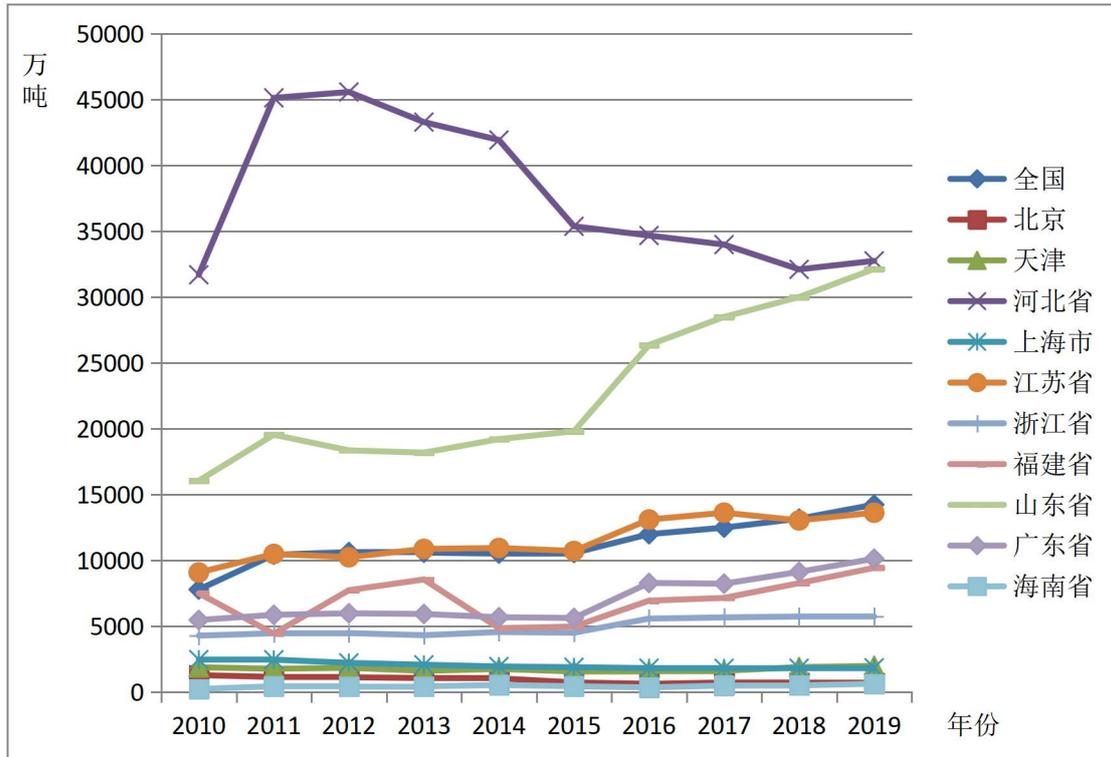


图 3.22 东部地区省份一般工业固体废物产生量

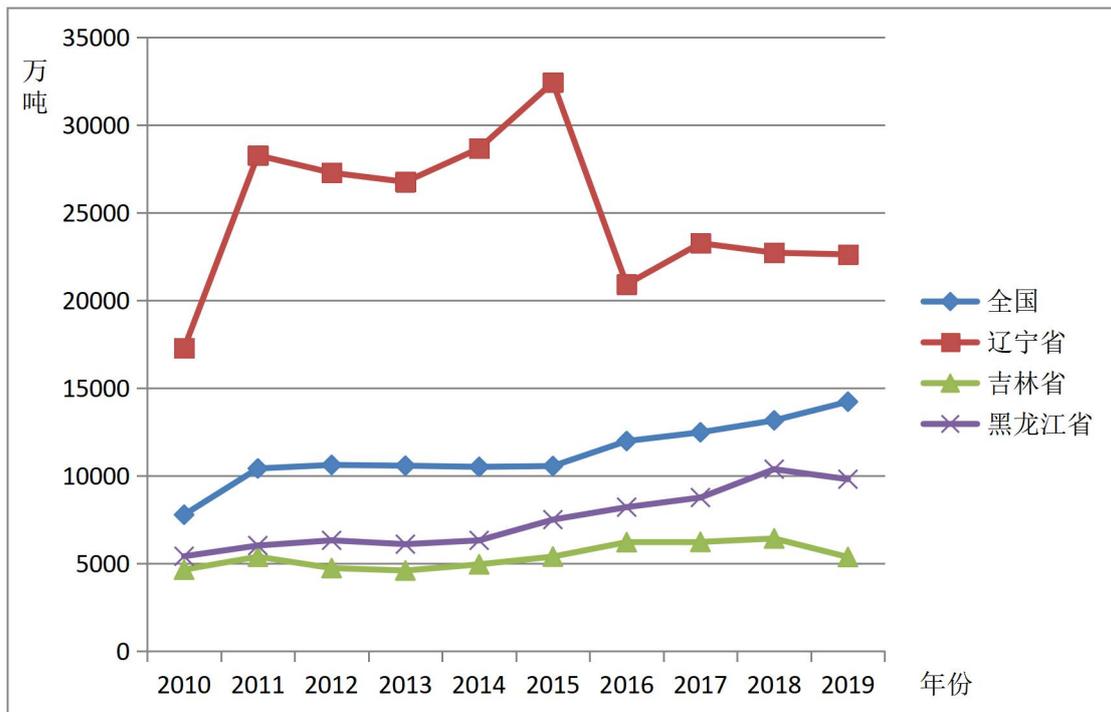


图 3.23 东北地区省份一般工业固体废物产生量

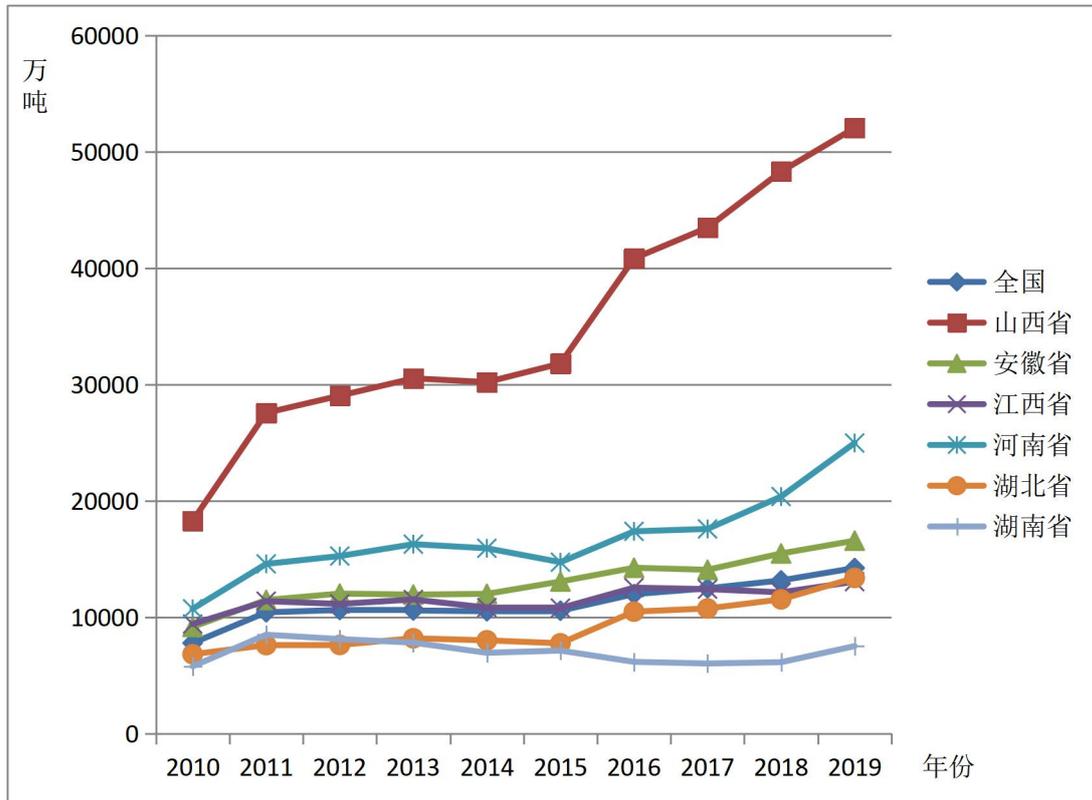


图 3.24 中部地区省份一般工业固体废物产生量

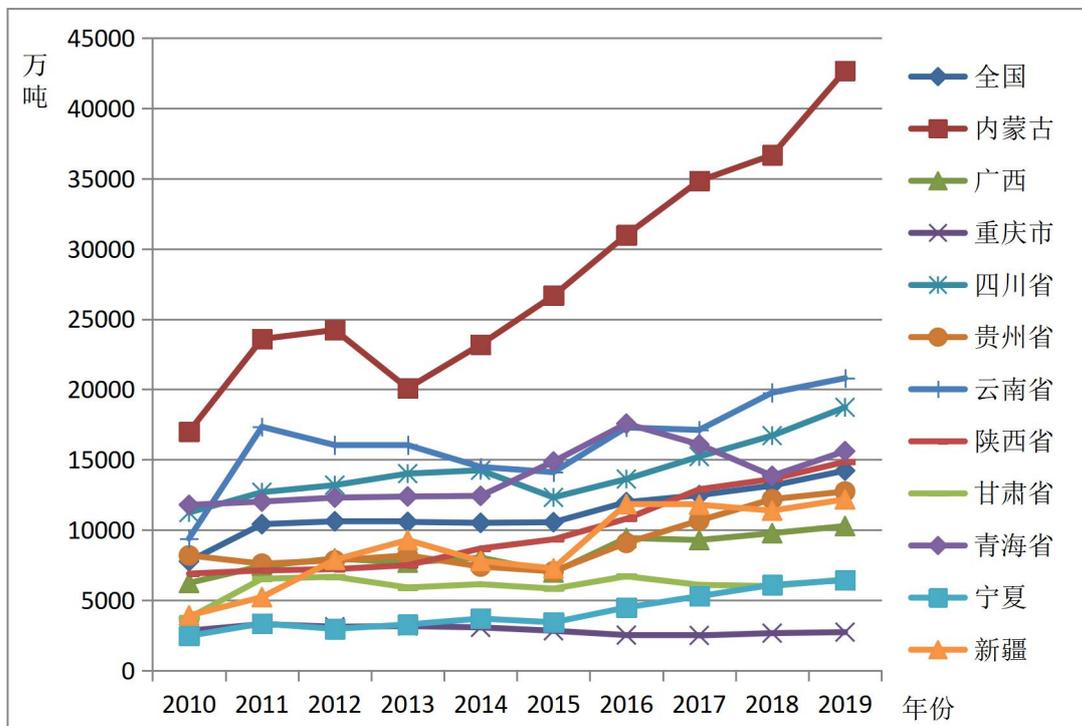


图 3.25 西部地区一般工业固体废物产生量

如图 3.22-3.25 所示,中国及各省份一般工业固体废物产生量总体呈现上升趋势,其中河北、山东、吉林、山西、河南和内蒙古等省份都是第二产业占比较高的省份,一般工业固体废物产生量超过全国平均水平。山西和内蒙古每年为全国提供了大量的煤炭资源,这也造成了这两个省份的固体废物产生量远超全国平均水平。党的十八大明确提出大力推进生态文明建设,河北省积极响应,坚决去产能,积极调整产业结构,加快产业转型升级,大力发展新兴产业,一般工业固体废物产生量在 2012 年以后稳定下降。辽宁省 2016 年一般工业固体废物产生量较 2015 年出现大量下降,之后有一定上涨并保持相对稳定。西部地区工业发展水平相对落后,多数省份一般工业固体废物产生量低于全国平均省份。

3.2.7 各省份废水排放总量

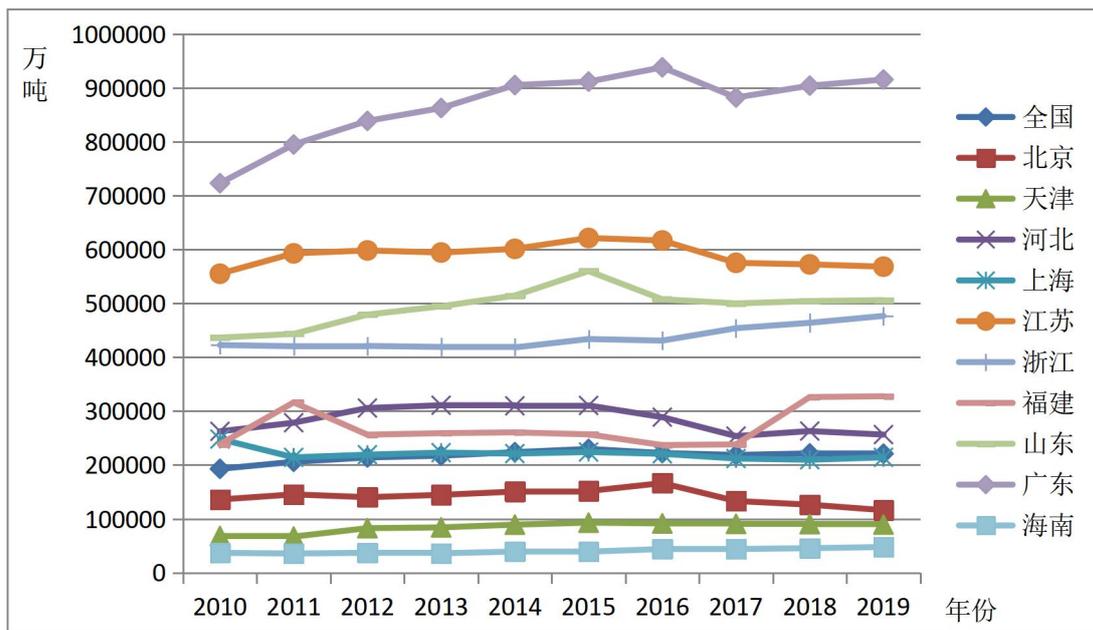


图 3.26 东部地区省份废水排放总量

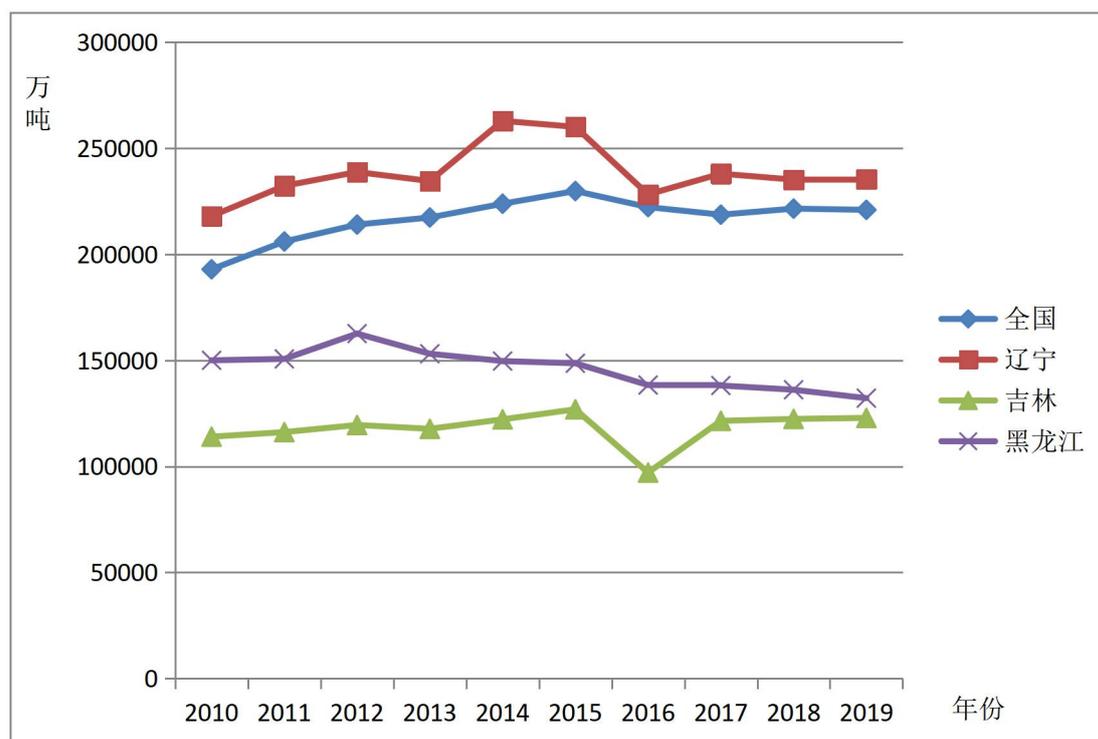


图 3.27 东北地区省份废水排放总量

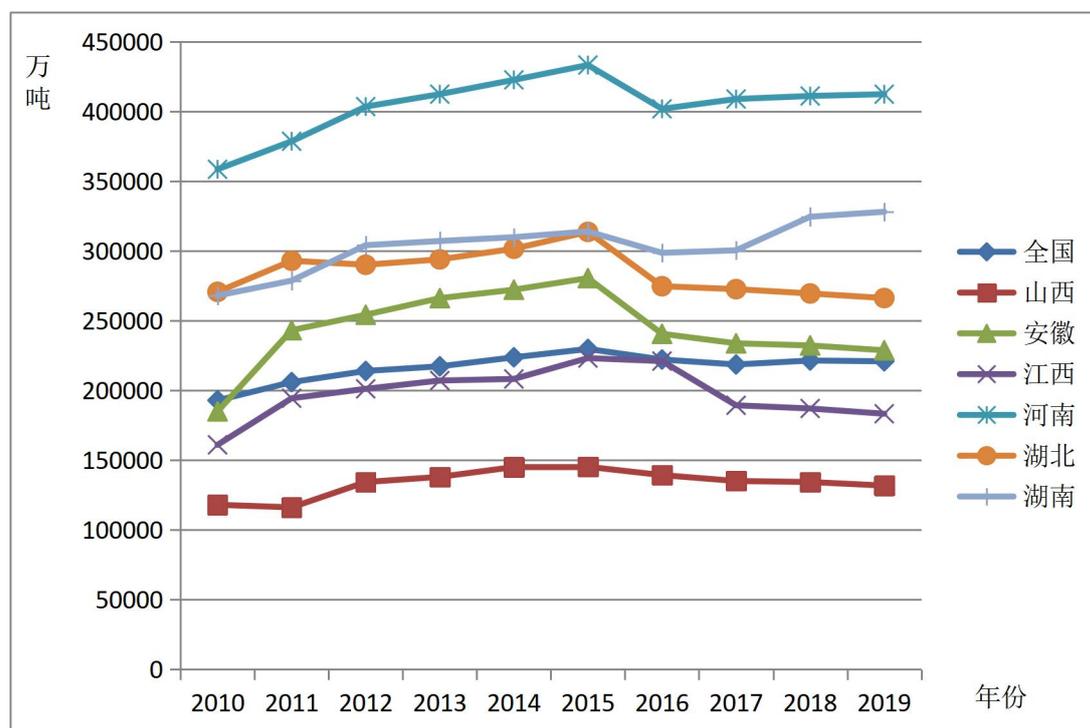


图 3.28 中部地区省份废水排放总量

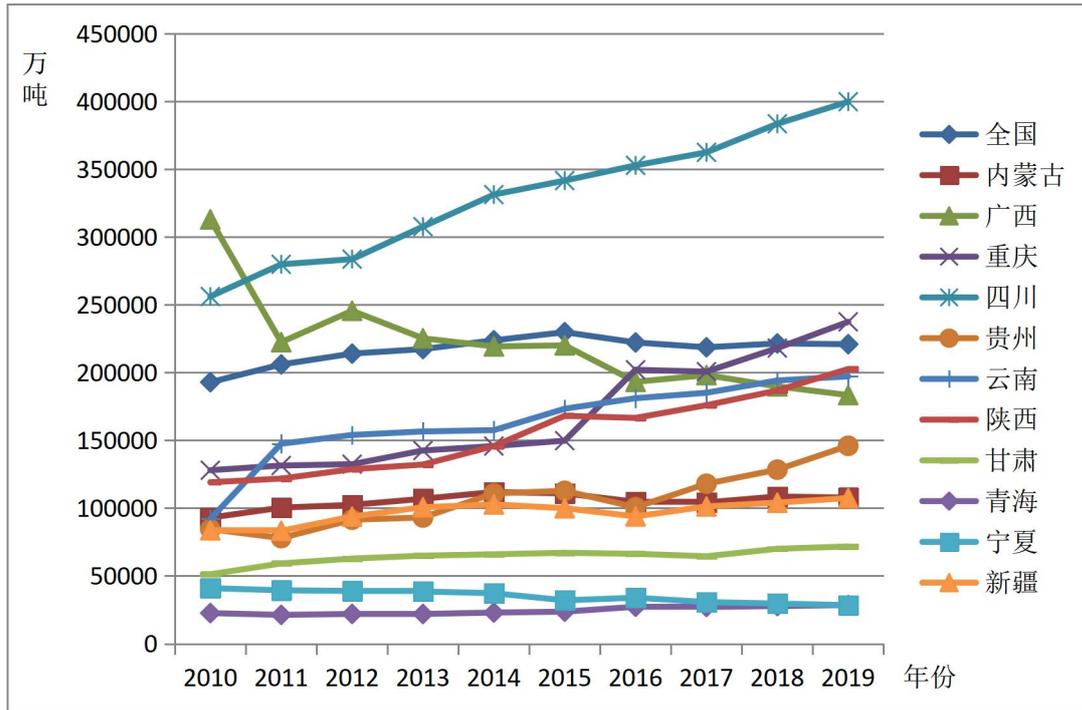


图 3.29 西部地区省份废水排放总量

如图 3.26-3.29 所示，全国及各省份废水排放总量变化不大，全国废水排放总量在 2016 年以后略有下降，但仍维持在较高水平。广东、江苏、山东、浙江、辽宁、河南、湖南、河北和四川等省份的废水排放总量均高于全国平均水平，西部大部分省份废水排放总量较低，低于全国平均水平。近些年，四川、重庆等省份废水排放重点企业有所增加，废水排放总量呈现增长趋势。2015 年国家对于生态文明建设作出全面部署，开启了生态文明建设的新篇章，山东、河北、辽宁、吉林、河南、湖北和安徽等省份创新发展理念、转变发展方式，2016 年废水排放总量较前一年出现一定的下降量。

3.2.8 各省份废气中二氧化硫排放总量

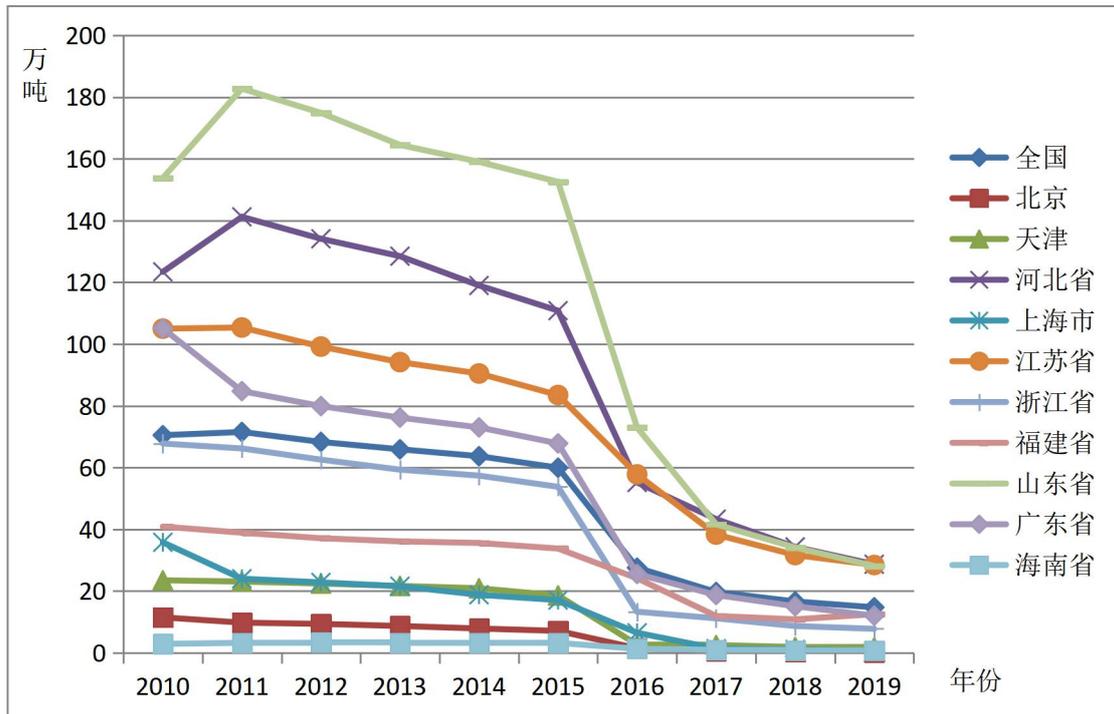


图 3.30 东部地区省份废气中二氧化硫排放总量

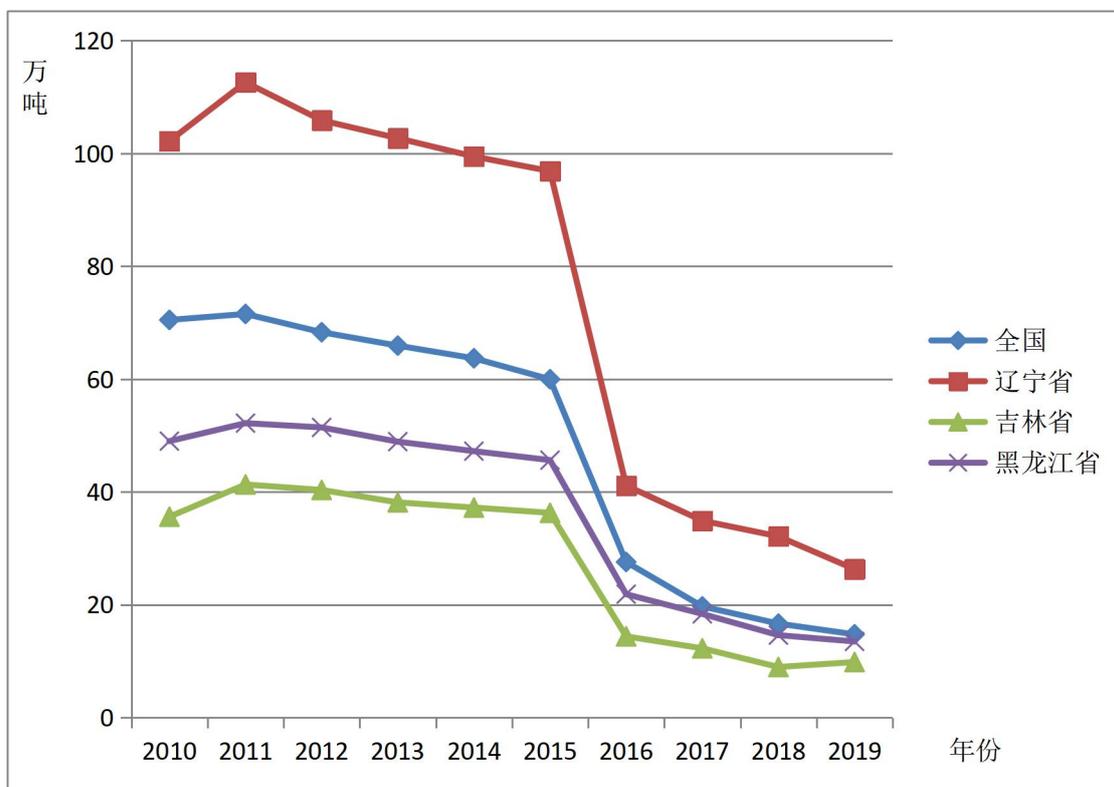


图 3.31 东北地区省份废气中二氧化硫排放总量

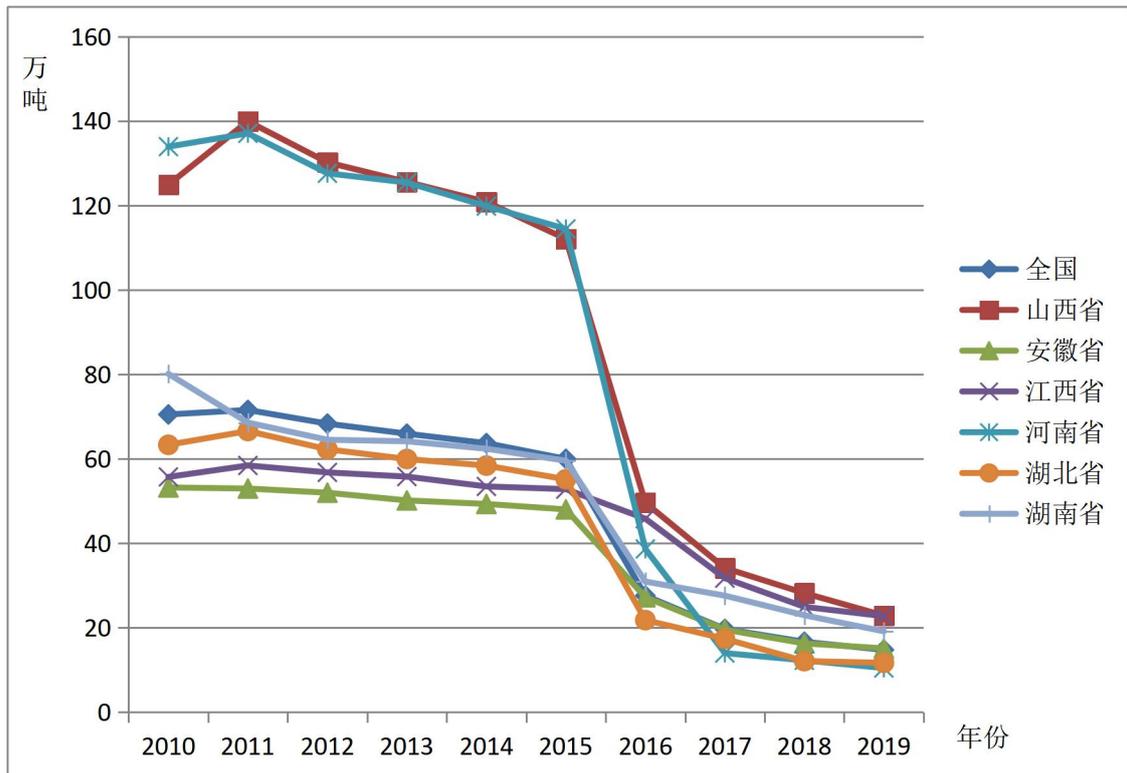


图 3.32 中部地区省份废气中二氧化硫排放总量

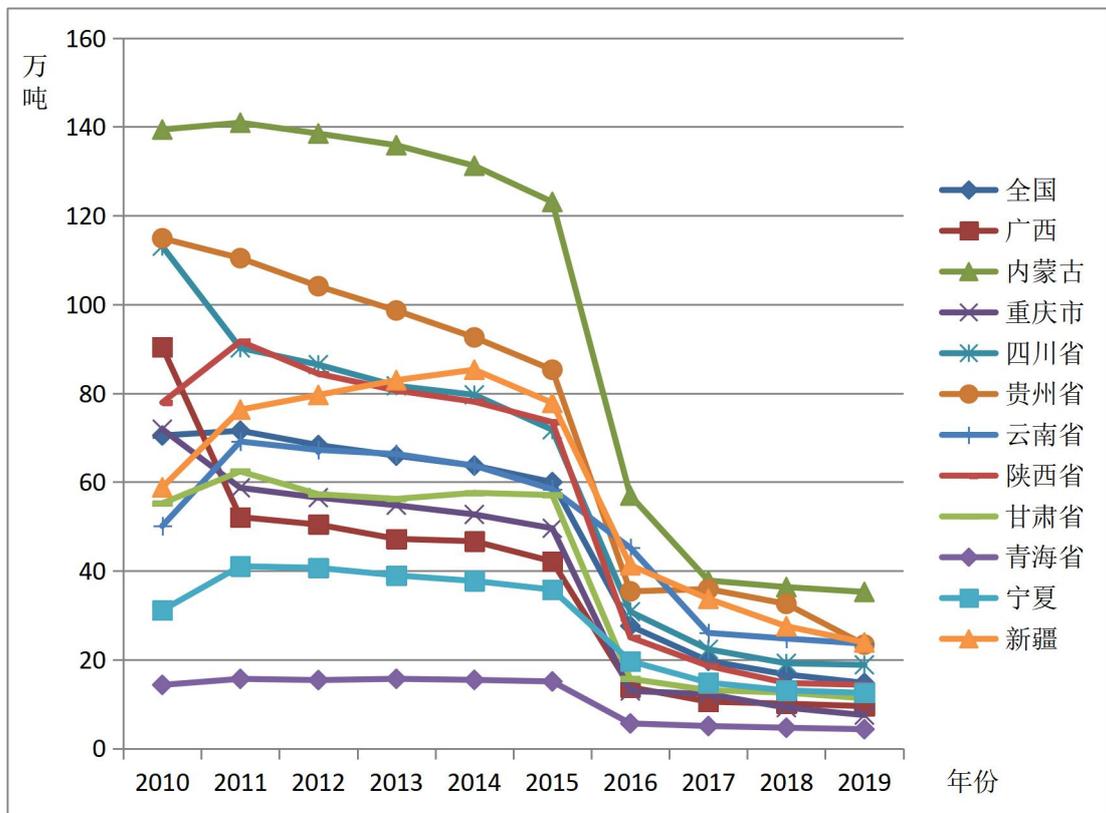


图 3.33 西部地区省份废气中二氧化硫排放总量

如图 3.30-3.33 所示,中国及各省份废气中二氧化硫排放总量总体呈现下降趋势,尤其是 2016 年废气中二氧化硫排放总量较上一年出现较大幅度的降低,这主要是由于 2015 年中央提出了创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念和着力加强供给侧结构性改革,各省份按照中央总体布局进行规划,通过有效市场提高资源配置,淘汰落后产能,优化产业结构,不断推进依靠资源、人口的粗放型发展方式向节能、高效、绿色的集约型发展方式转变,加快建设资源节约型和环境友好型社会。近些年,山东、河北、江苏、辽宁、贵州、陕西、四川和新疆等省份二氧化硫排放总量均有了大幅度的降低,为全国实现可持续发展做出了重要贡献。

3.3 各省份类型划分

从以上对各指标的分析中可以看出,我国各省份实现碳达峰的条件差别较大。碳达峰相关因素指标从小到大划分为三个层级,人均 GDP、森林覆盖率、研究与试验发展经费支出按照数值从小到大分别赋值 1、2、3。单位 GDP 能耗、能源生产总量、三废排放总量按照数值从小到大分别赋值-1、-2、-3。设定各省份实现碳达峰条件的得分公式:

$$Y = \sum_{i=1}^8 A_i * B$$

其中 i 表示人均 GDP、森林覆盖率等相关指标, A_i 为碳达峰相关因素指标的权重, B 为各省份相关指标的赋值。如图 3.34 所示,为我国各省份碳达峰条件得分的柱状图,最终依据各省份得分数值的大小,把我国省份划分为达峰条件优越、良好和欠缺三个类型。如图 3.35 所示,得分大于 0.4 的省份为碳达峰条件优越省份,主要是东部地区省份;得分在 0-0.4 之间的省份为碳达峰条件良好省份,主要是中部地区和西南地区省份;得分小于 0 的省份为碳达峰条件欠缺省份,主要是西北地区和东北地区省份。

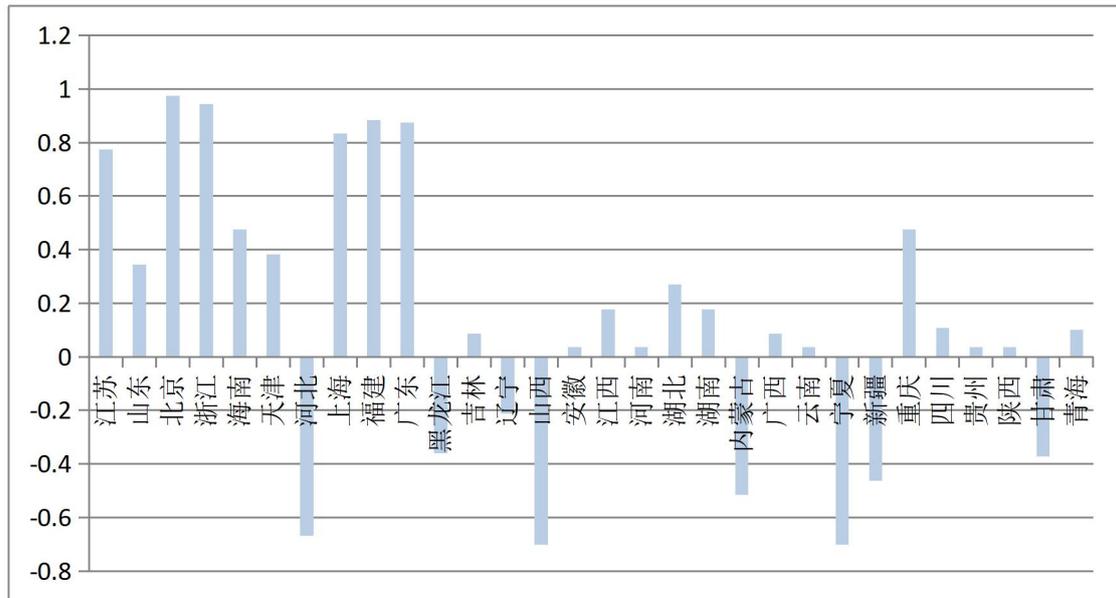


图 3.34 各省份碳达峰条件得分

省份类型划分	主要省份	主要影响因素	划分依据
碳达峰条件优越省份	北京、浙江、江苏、 广东、上海、福建、 海南、重庆	经济发展水平、研发 投入、单位 GDP 能耗	$Y > 0.4$
碳达峰条件良好省份	河南、安徽、湖北、 湖南、江西、四川、 陕西、广西、贵州、 云南、青海、山东、 天津、吉林	经济发展水平、森林 覆盖率、单位 GDP 能 耗、能源生产总量	$0 < Y < 0.4$
碳达峰条件欠缺省份	内蒙古、宁夏、新疆、 甘肃、山西、黑龙江、 辽宁、河北	能源生产总量、森林 覆盖率、研发投入、 三废排放总量	$Y < 0$

图 3.35 各省份碳达峰条件类型划分

3.3.1 碳达峰条件优越省份

北京、浙江、江苏、广东、上海、福建等省份均为我国东部省份，这些省份经济发展水平较为发达，化石能源储量与产量相对西部地区省份较为贫乏，巨大

的经济体量对能源资源产生了大量需求,是我国主要的能源进口与消费省份,累积碳排放量在全国处于前列。同时这些省份产业结构较为合理,具有比较成熟的节能减排技术,经济发展和环境的协调性好于其他省份。尤其是近些年高耗能产业向中西部转移,产业结构进一步优化,有望凭借其成熟的环境机制和先进的技术水平成为全国省份实现碳达峰的主力军。作为东部省份,海南经济体量较小,但近些年经济增速排在全国前列,拥有丰富的清洁能源资源和优越的生态环境,单位 GDP 能源消耗较低,其产业以低碳产业为主。重庆工业基础实力雄厚,凭借优越的地理位置和科创优势,其制造业和高新技术产业等不断发展壮大,是我国西部地区工业发展的领头羊。重庆研发经费投入在西部处于领先,均超过了全国平均水平,创新能力在全国排名稳中有进,为推进绿色低碳、安全高效的产业体系提供了保障,同时拥有丰富的森林资源。有望在西部省份中率先实现碳达峰、碳中和的目标。

3.3.2 碳达峰条件良好省份

近年来,河南、安徽、湖北、湖南和江西等省份均位于中部地区,经济增长速度持续高于全国平均水平,在全国经济发展中具有重要的战略地位。经济增长主要依赖工业的快速崛起,这意味着能源消耗的增长,从而导致二氧化碳排放量增加。这些省份能源消耗量大于能源生产量,依赖从外进口化石能源。近些年来,研发经费投入水平不断提高,节能减排技术有了一定发展,能源消耗效率水平不断提升,单位 GDP 能耗普遍低于全国平均水平。同时较高的森林覆盖率可以吸收一部分排放的二氧化碳。

山东、吉林和天津等省份都有深厚的工业基础,第二产业占比较高,能源消费结构比较单一,以煤炭、石油等化石能源为主,人均 GDP 能源消耗均高于全国平均水平,能源利用效率水平不高。其中山东既是我国的能源大省,又是传统工业强省,经济规模、研发投入等均在我国各省份中排在前列,从三废排放量下降趋势能够看出,山东经济发展与碳排放呈现出脱钩态势。吉林是我国重要的传统工业基地,其经济增长主要依靠消耗大量化石能源的工业产业,从而使碳排放量持续增长。同时拥有众多林区,森林覆盖率高于北方其他省份。天津经济发展基础较好,这些省份在发展产业时,不断对传统产业进行转型升级,并大力发展现

代服务业等低耗能产业。

广西、贵州、云南、青海等省份都地处我国西部地区，矿产资源和可再生能源资源比较丰富，具有很大的发展潜力。得益于交通环境的改善、良好的生态环境、优越的地理区位等因素，贵州、广西和云南近几年来经济增速稳定排在全国前列，但与东部经济发达省份相比还有一定差距。而青海经济发展稳中有进，经济增长潜力有待进一步开发，需要在大力发展经济的同时兼顾生态环境的保护。青海环境资源十分丰富，在维护国家生态安全中具有重要地位。这几个省份对于研发经费的投入量在全国处于下游水平，企业创新能力有待提高、产业结构有待调整，这也是造成地区能源利用率水平低于全国的重要原因。同时这些省份经济发展潜力较大，水能、风能等可再生能源比较丰富，森林覆盖率在我国各省份中排在前列，具有新能源基地建设和生态文明建设的天然优势。近年来，四川、陕西等省份经济迅速发展，农产品加工业、制造业、金融业等产业多面开花，经济体量不断增大，是西部地区经济发展水平较为发达的省份。四川和陕西也是我国的能源资源大省，四川以煤炭、天然气和水能为主，是水电能源资源大省，陕西作为我国的能源大省，既有丰富的煤油气等化石能源，又具有丰富的风电等新能源资源。研发经费投入在西部处于领先，均超过了全国平均水平，创新能力在全国排名稳中有进，为推进绿色低碳、安全高效的产业体系提供了保障，同时拥有丰富的森林资源。

3.3.3 碳达峰条件欠缺省份

内蒙古、宁夏、新疆和山西等省份是我国的能源生产和能源输出大省，煤炭、原油和天然气等能源资源非常丰富，支撑起了中国这个“世界工厂”的能源消耗，其大量化石能源的生产和消费带来了大量二氧化碳的排放。这些省份生态环境比较恶劣，植被覆盖率不高、水平流失严重、土地荒漠化严重、森林草原退化等都是面临的主要生态环境问题。在推进工业化和城镇化的进程中，不足全国平均水平的研发经费投入与巨大的能源生产总量不匹配，工业发展以重化工产业为主，能源资源利用效率不高，对本来就比较脆弱的生态环境造成了严重威胁。

河北以钢铁、化工、建材和汽车等产业为主，是全国的重工业基地，经济发展与生态环境保护的矛盾比较尖锐。省份单位 GDP 能源消耗较高，在东部各省份

中排在前列，研发经费在东部省份中仅高于海南，创新投入还有待提高。黑龙江和辽宁是我国的老工业基地，高耗能企业在工业中占有重要地位，并且单位 GDP 能源消耗总量远高于全国平均水平，产业结构亟待转型升级。甘肃矿产资源比较丰富，电力、石油化工等传统工业在第二产业中占有重要地位，其经济发展水平、植被覆盖率、能源利用效率和研发经费等在全国省份中排名靠后，不利于提前实现碳达峰目标。

4 各省份碳达峰预测

4.1 方法介绍及指标选取

改革开放四十余年以来，中国经济增长一直保持强劲态势。我国的能源消费结构以化石能源为主，作为一个人口消费大国和工业大国，我国碳排放主要来源于对以煤炭为主体等化石能源的大量消耗。因此，化石燃料产品燃烧所产生的二氧化碳是我国各省份碳排放核算的重点，核算碳排放前应先明确国内外对化石能源类别的划分及适合我国省份层面碳排放核算的碳排放系数。

能源类别可以划分为煤炭、石油和天然气 3 大类或者原煤、洗精煤、焦炭等多个细类。碳排放的测算方法主要有实测法、物料衡算法和排放因子法，本文选取适合省份层面碳排放核算、应用最广的排放因子法。而在碳排放系数的确定方面，国际上并没有一个统一的标准，其中影响较大的有政府间气候变化专门委员会（IPCC）、国家发改委能源研究所等。本论文能源类别选择原煤、洗精煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气等八个能源品种，采用政府间气候变化专门委员会（IPCC）的碳排放系数进行核算。

2010 年国家发改委下发《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》，从 2010 年开始，国家先后开展了多个低碳省市试点。本文选择 2010—2019 年全国三十个省份（考虑到数据可得性，不包括港澳台和西藏）消费的煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气等八种化石能源作为碳排放核算对象，计算方法如下所示：

$$C = \sum_{K=1}^8 C_K = \sum_{K=1}^8 E_K * S C_K * C F_K$$

其中，C 为碳排放总量；k 为能源品种；E 为能源消费量；SC 为标准煤折算系数；CF 为碳排放系数。各能源品种的标准煤折算系数（表 4.2）、各省份的能源消费量来自于《中国能源统计年鉴》。

表 4.1 各能源品种的标准煤折算系数和碳排放系数

能源品种	煤炭	焦煤	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
标准煤折算系数	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.330
碳排放系数	0.7559	0.8550	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483

注：折标系数中前 7 个能源品种的计量单位为千克/千克；天然气为千克/立方米；碳排放系数计量单位为千克/千克标准煤。

4.2 预测结果可靠性讨论

本文采用仿真模拟法，在对碳排放量、能源生产总量、R&D 经费和单位 GDP 能耗等指标的历史数据进行模拟预测的基础上，对各省份碳达峰时间及其重要影响因素进行分析。如表 4.2 所示，为我国各省份 2010-2019 年碳排放预测值与真实值的平均相对偏差，其可以判断各省份减排成效及碳排放预测的准确度。可以看出，大部分省份预测值与真实值的偏差较小，可以有效说明 2010-2019 年碳排放的预测值与真实值比较相近。而广东、山西和云南等部分省份平均相对偏差超过了 0.2，这是因为这些省份碳减排取得了显著成效，2010-2019 年碳排放真实值比预测值降低比较明显。

表 4.2 各省份 2010-2019 年预测值与真实值平均相对偏差

省份	平均相对偏差	省份	平均相对偏差
江苏	-0.143	安徽	0.002
浙江	0.089	黑龙江	0.166
上海	-0.044	吉林	0.166
福建	-0.107	北京	0.037

省份	平均相对偏差	省份	平均相对偏差
广东	0.248	天津	-0.116
山东	0.052	广西	-0.087
重庆	0.036	贵州	0.008
海南	-0.077	云南	0.201
青海	-0.054	甘肃	-0.084
四川	0.122	新疆	-0.150
陕西	-0.038	山西	0.200
江西	-0.012	内蒙古	0.149
湖北	0.034	宁夏	-0.064
湖南	0.022	辽宁	0.017
河南	-0.008	河北	0.086

如表 4.3 所示,为各省份 2004-2009 年和 2004-2019 年的碳排放模拟方程及其拟合优度,所有省份的拟合优度都在 0.8 以上,拟合效果较好,可以为判断各省份碳排放达峰时间提供科学参考。同时 2004-2019 年的拟合优度相较于 2004-2009 年的拟合优度趋好或趋差的省份,呈现出一定的区域特征。拟合效果变化不大或者趋好的省份主要是东部发达地区省份和部分中西部地区省份,拟合效果趋差的省份主要是西部地区和东北地区省份及部分东中部地区。总体来看,东部地区省份控制碳排放的能力最强,中部地区省份次之,最后是西部和东北地区省份。

在拟合效果趋好的省份中,浙江、上海、福建、广东、山东和重庆等省份不断加大与发达国家在减排技术、高端制造产业和减排政策等方面的交流合作,同时也是全国碳排放强度下降的重点省份。内蒙古是我国的能源生产大省和工业化偏重的省份,呼和浩特和乌海也是我国第一批国家低碳试点城市。“十二五”期间,国家给内蒙古下达了碳排放强度下降目标,对内蒙古控制碳排放具有重要影响。海南省凭借优越的区位优势和良好的生态环境,2010 年以来开展了一系列的低碳试点,致力于打造低碳化的国际旅游岛,产业发展以低碳型产业为主,碳排放控制取得了较大成果。

在拟合效果趋差的省份中，“十二五”以来，天津、河南、辽宁和吉林等省份经济发展水平取得了较大成果。其背后是对重工业和制造业等投资规模的扩张和对外贸易规模的不断壮大，这也在一定程度上加快了碳排放量的增长。广西、甘肃和新疆等西部省份不断加大基础设施建设，不断扩大对外开放，经济发展形势较好。政府层面出台一系列政策，加大招商引资力度和承接东部地区产业转移，这些省份在经济发展的同时，也伴随着化石能源消费的大量增长，对控制碳排放造成了一定压力。

表 4.3 各省份碳排放模拟方程及拟合优度

省份	时间	模拟方程	拟合优度 R^2
江苏	2004-2009 年	$Y=3841x^{0.3714}$	$R^2=0.9926$
	2004-2019 年	$Y=-155.3x^2+8938.8x+30550$	$R^2=0.9729$
浙江	2004-2009 年	$Y=3715.5x+23530$	$R^2=0.9344$
	2004-2019 年	$Y=-57.644x^2+3906.8x+23738$	$R^2=0.988$
上海	2004-2009 年	$Y=1463.2x+22907$	$R^2=0.9606$
	2004-2019 年	$y=-61.464x^2+2544.6x+20610$	$R^2=0.9676$
福建	2004-2009 年	$Y=1996.2x+8890.5$	$R^2=0.9522$
	2004-2019 年	$Y=-126.52x^2+4211x+4148.8$	$R^2=0.9509$
广东	2004-2009 年	$Y=7551.8+24763$	$R^2=0.9606$
	2004-2019 年	$Y=-339.42x^2+10076x+21416$	$R^2=0.9683$
山东	2004-2009 年	$Y=9931.7x+51104$	$R^2=0.9351$
	2004-2019 年	$Y=-176.54x^2+10470x+51411$	$R^2=0.9854$
重庆	2004-2009 年	$Y=1981.8x+12765$	$R^2=0.9473$
	2004-2019 年	$Y=-83.874x^2+2835.9x+11250$	$R^2=0.9831$
海南	2004-2009 年	$Y=891.09x+4906.6$	$R^2=0.8915$
	2004-2019 年	$Y=-62.947x^2+1822.3x+2963.2$	$R^2=0.9146$
青海	2004-2009 年	$Y=-23.946x^2+1252.5x+2797.9$	$R^2=0.9522$
	2004-2019 年	$Y=802.82x+3884$	$R^2=0.8191$
四川	2004-2009 年	$Y=4012.4x+33149$	$R^2=0.9714$
	2004-2019 年	$Y=15763\ln(x)+31427$	$R^2=0.9291$
陕西	2004-2009 年	$Y=3834.5x+16284$	$R^2=0.9611$
	2004-2019 年	$Y=-103.25x^2+5580x+12380$	$R^2=0.9902$
江西	2004-2009 年	$Y=10142e^{0.074x}$	$R^2=0.9665$
	2004-2019 年	$Y=8731.8x^{0.4113}$	$R^2=0.9256$
湖北	2004-2009 年	$Y=2243x+20777$	$R^2=0.9471$
	2004-2019 年	$Y=10286\ln(x)+19291$	$R^2=0.9111$
湖南	2004-2009 年	$Y=17261x^{0.3176}$	$R^2=0.9294$
	2004-2019 年	$Y=8300.3\ln(x)+16190$	$R^2=0.9672$
河南	2004-2009 年	$Y=39037x^{0.29}$	$R^2=0.9932$

省份	时间	模拟方程	拟合优度 R^2
	2004-2019 年	$Y=40916x^{0.2563}$	$R^2=0.9135$
安徽	2004-2009 年	$Y=2650x+14735$	$R^2=0.9608$
	2004-2019 年	$Y=-51.888x^2+3370.1x+13291$	$R^2=0.9909$
黑龙江	2004-2009 年	$Y=2282x+24602$	$R^2=0.9724$
	2004-2019 年	$Y=25980x^{0.2111}$	$R^2=0.9536$
吉林	2004-2009 年	$Y=-19.45x^2+2088.8x+14053$	$R^2=0.9704$
	2004-2019 年	$Y=16136x^{0.2565}$	$R^2=0.8929$
北京	2004-2009 年	$Y=2109.2x+14253$	$R^2=0.9855$
	2004-2019 年	$Y=28570x^{0.242}$	$R^2=0.897$
天津	2004-2009 年	$Y=12488e^{0.0679x}$	$R^2=0.9847$
	2004-2019 年	$Y=1.0226x^{0.4456}$	$R^2=0.8931$
广西	2004-2009 年	$Y=8385.3e^{0.0919x}$	$R^2=0.9723$
	2004-2019 年	$Y=8373.9\ln(x)+3714.7$	$R^2=0.86$
贵州	2004-2009 年	$Y=1295.2x+15914$	$R^2=0.962$
	2004-2019 年	$Y=-27.489x^2+1676.4x+15074$	$R^2=0.9801$
云南	2004-2009 年	$Y=1338.6x+15720$	$R^2=0.9432$
	2004-2019 年	$Y=3503.5\ln(x)+16706$	$R^2=0.8358$
甘肃	2004-2009 年	$Y=939.83x+13089$	$R^2=0.9543$
	2004-2019 年	$Y=5724.7\ln(x)+10820$	$R^2=0.8951$
新疆	2004-2009 年	$Y=22187e^{0.0916x}$	$R^2=0.9849$
	2004-2019 年	$Y=17818x^{0.5458}$	$R^2=0.8959$
山西	2004-2009 年	$Y=5969.8x+44961$	$R^2=0.9705$
	2004-2019 年	$Y=45120x^{0.299}$	$R^2=0.8422$
内蒙古	2004-2009 年	$Y=7147.4x+22012$	$R^2=0.814$
	2004-2019 年	$Y=25679x^{0.5156}$	$R^2=0.9533$
宁夏	2004-2009 年	$Y=68.703x^2+629.28x+7140.4$	$R^2=0.9988$
	2004-2019 年	$Y=5759.7x^{0.585}$	$R^2=0.9142$
辽宁	2004-2009 年	$Y=3625.2x+44031$	$R^2=0.9826$
	2004-2019 年	$Y=43085x^{0.2705}$	$R^2=0.9171$
河北	2004-2009 年	$Y=5969.8x+44961$	$R^2=0.9705$
	2004-2019 年	$Y=45849x^{0.3347}$	$R^2=0.96$

4.3 结果分析

对计算得出的全国 30 个省份能源的碳排放量进行预测，观察我国三十省份的碳排放量趋势图，可以发现大部分省份的碳排放量总量在 2030 年前呈逐年上升趋势，碳排放量增长率呈现逐年递减趋势的同时，各省份碳排放量存在较大差异，碳排放量增长率变缓的程度也有所不同。碳排放量呈现出明显的空间差异性，

其中东部经济发达省份和内陆工业大省、能源大省的碳排放量位居全国前列。经济较发达省份碳排放量增长率低于经济发展落后省份，碳排放增长率呈现出从东部向西部递增的趋势。由于地区经济发展水平、产业结构、人口规模和能源资源等条件不同，各省份在 2030 年前实现碳达峰的难易程度也呈现出显著的空间差异性。

4.3.1 有望提前实现碳达峰的省份

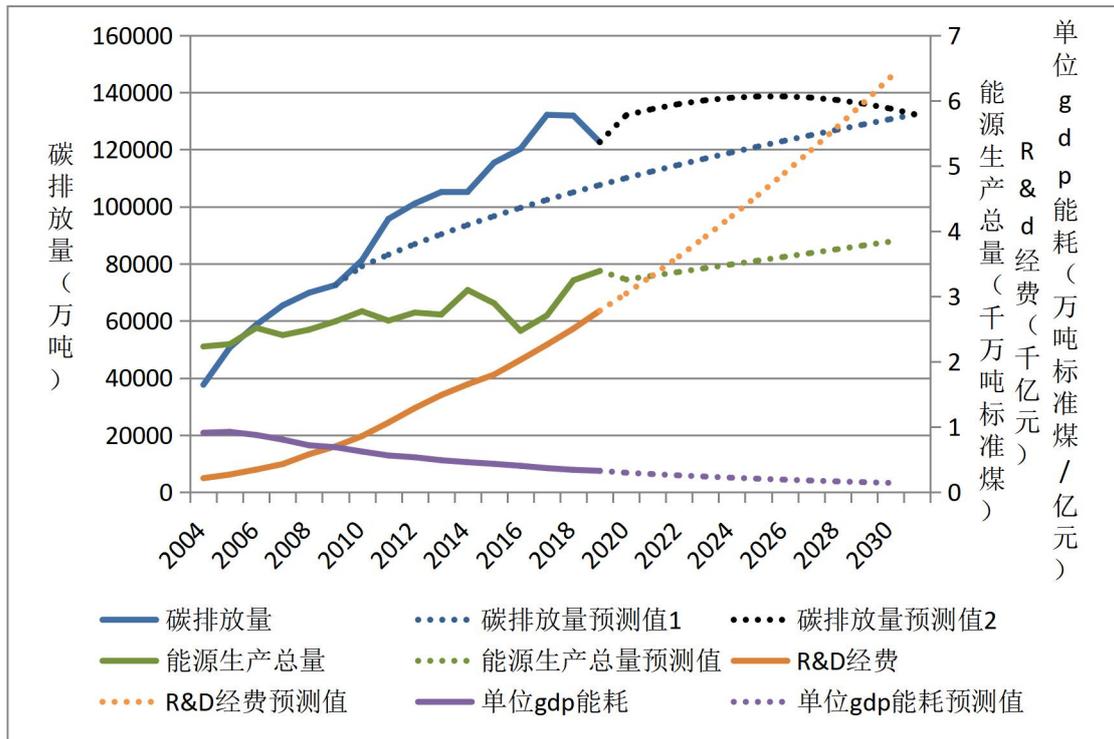


图 4.1 江苏省碳达峰情况

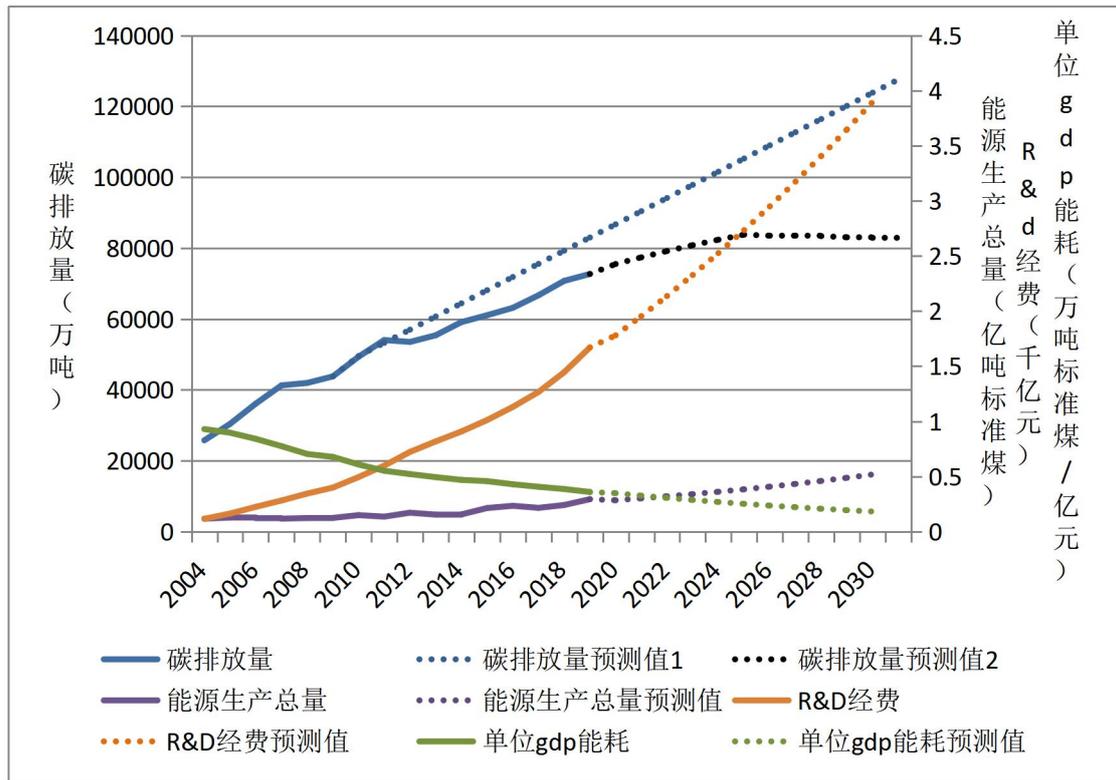


图 4.2 浙江省碳达峰情况

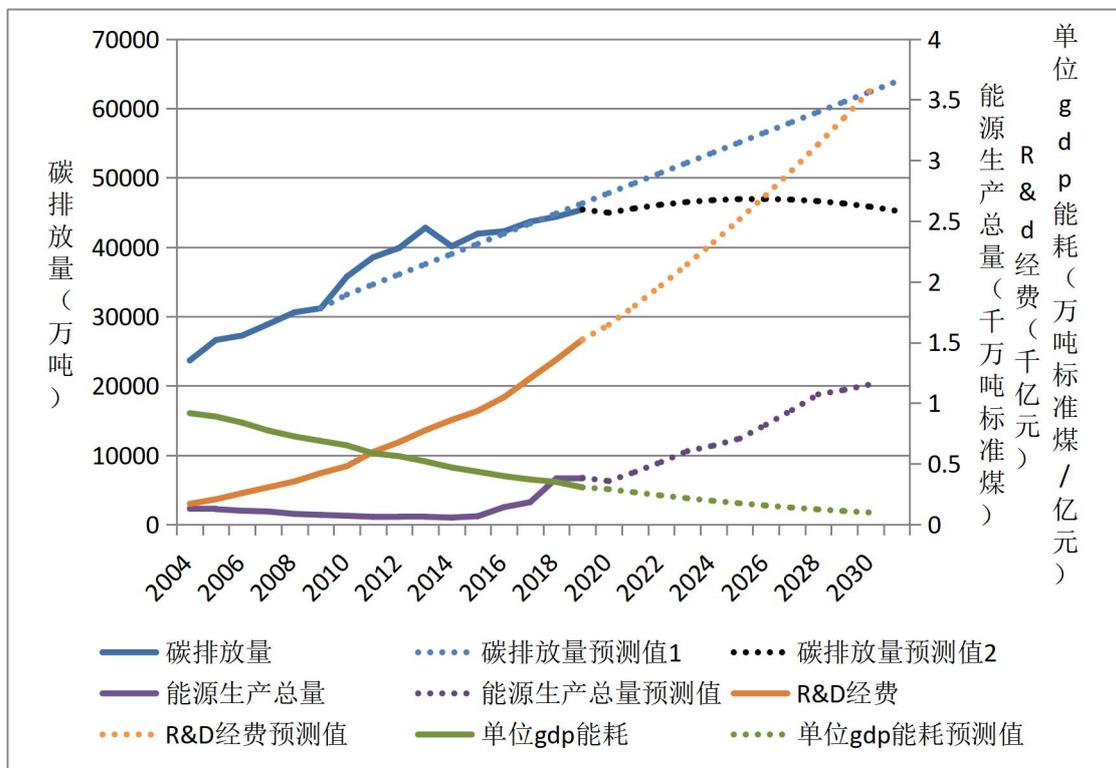


图 4.3 上海市碳达峰情况

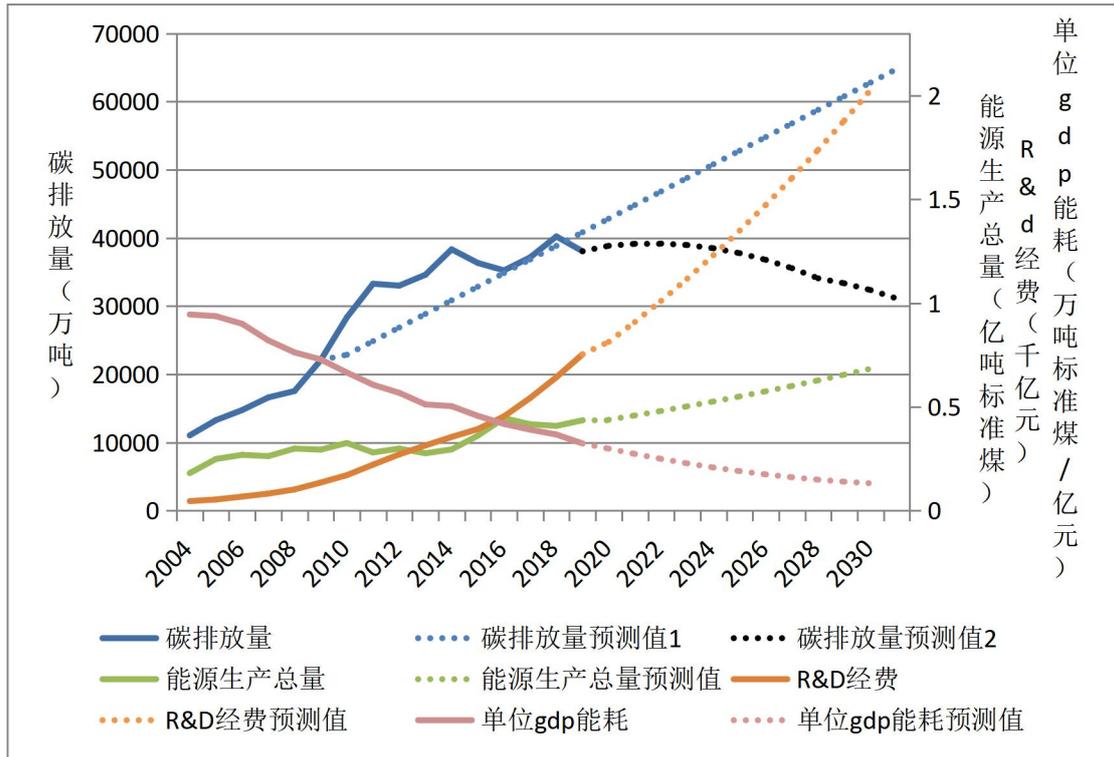


图 4.4 福建省碳达峰情况

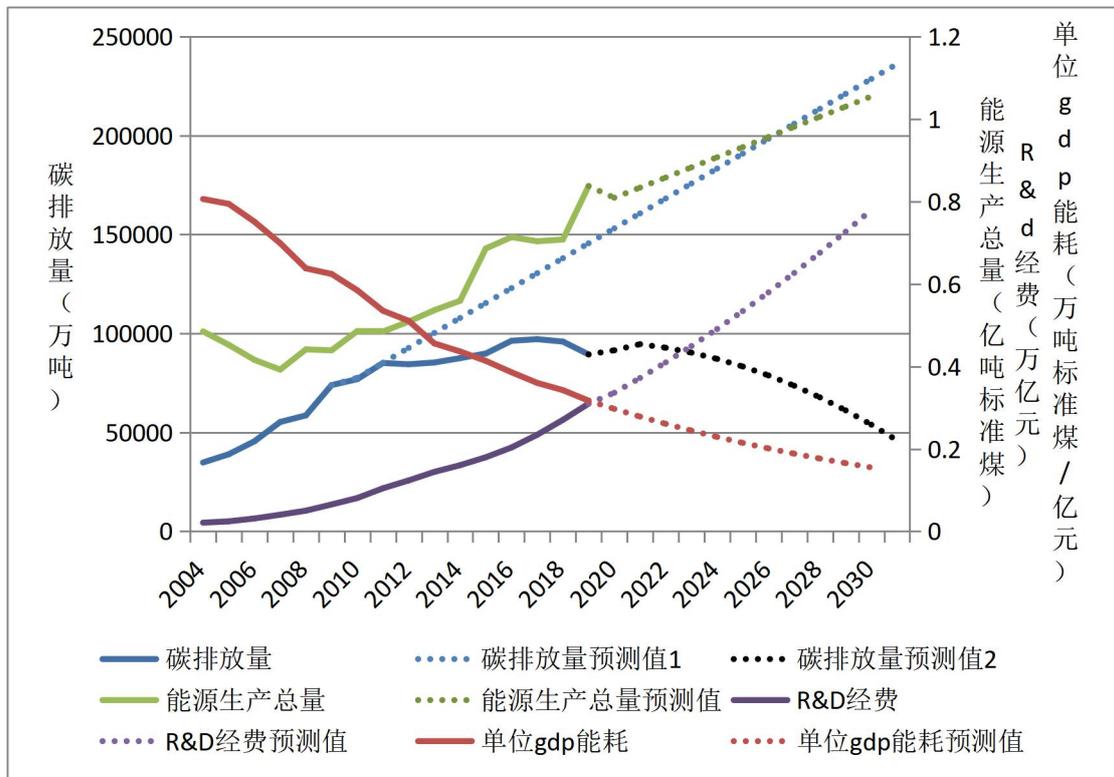


图 4.5 广东省碳达峰情况

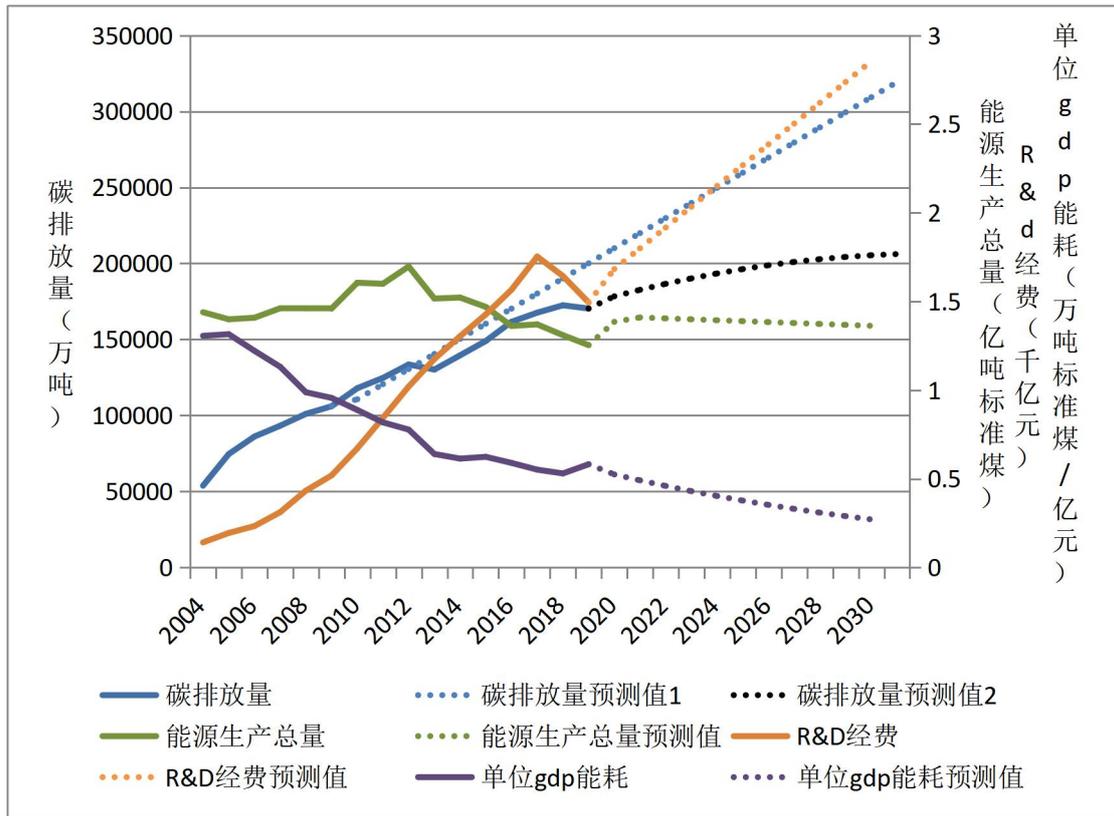


图 4.6 山东省碳达峰情况

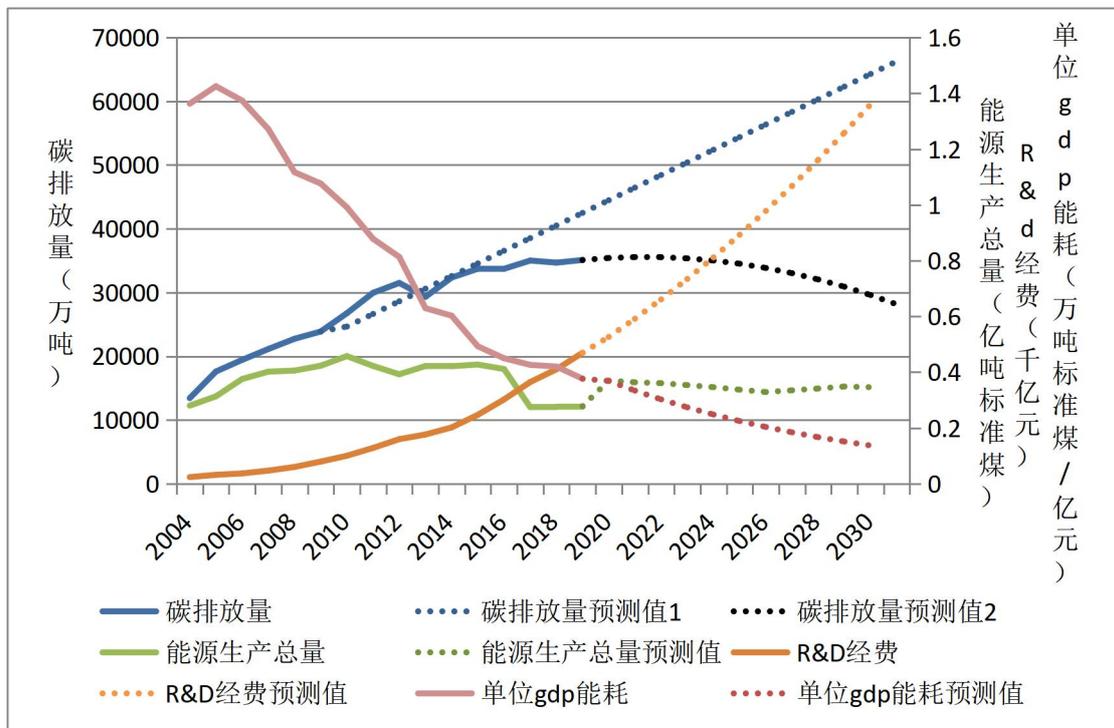


图 4.7 重庆市碳达峰情况

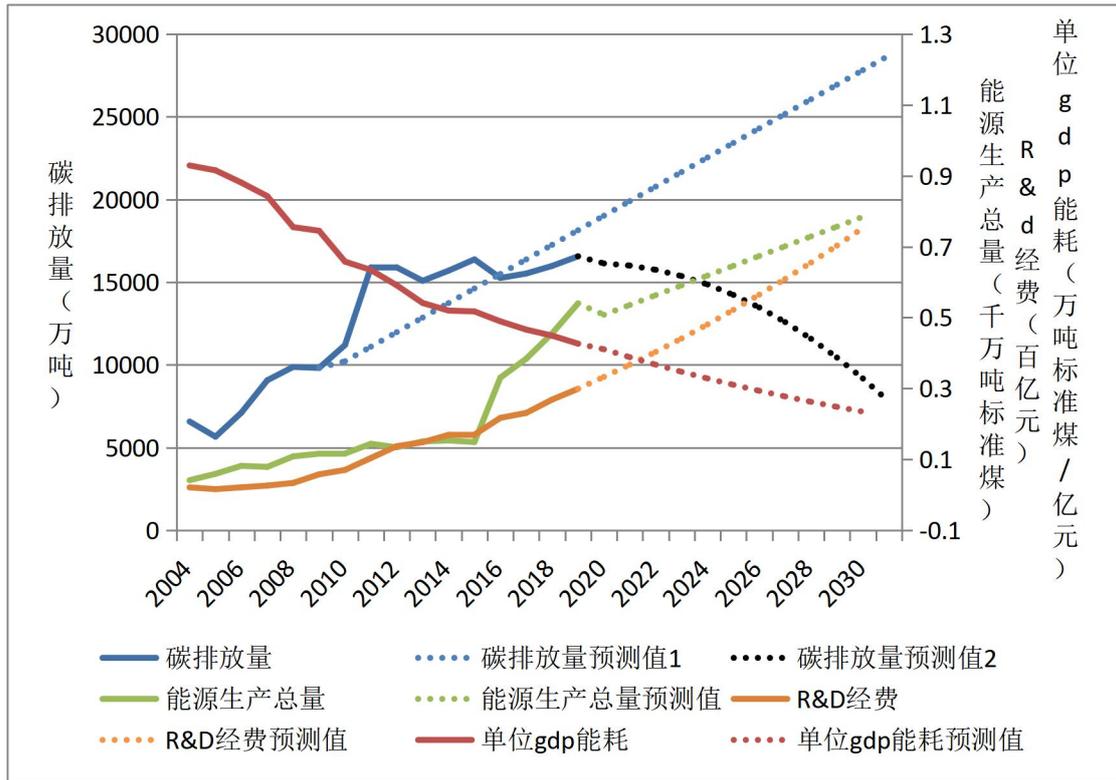
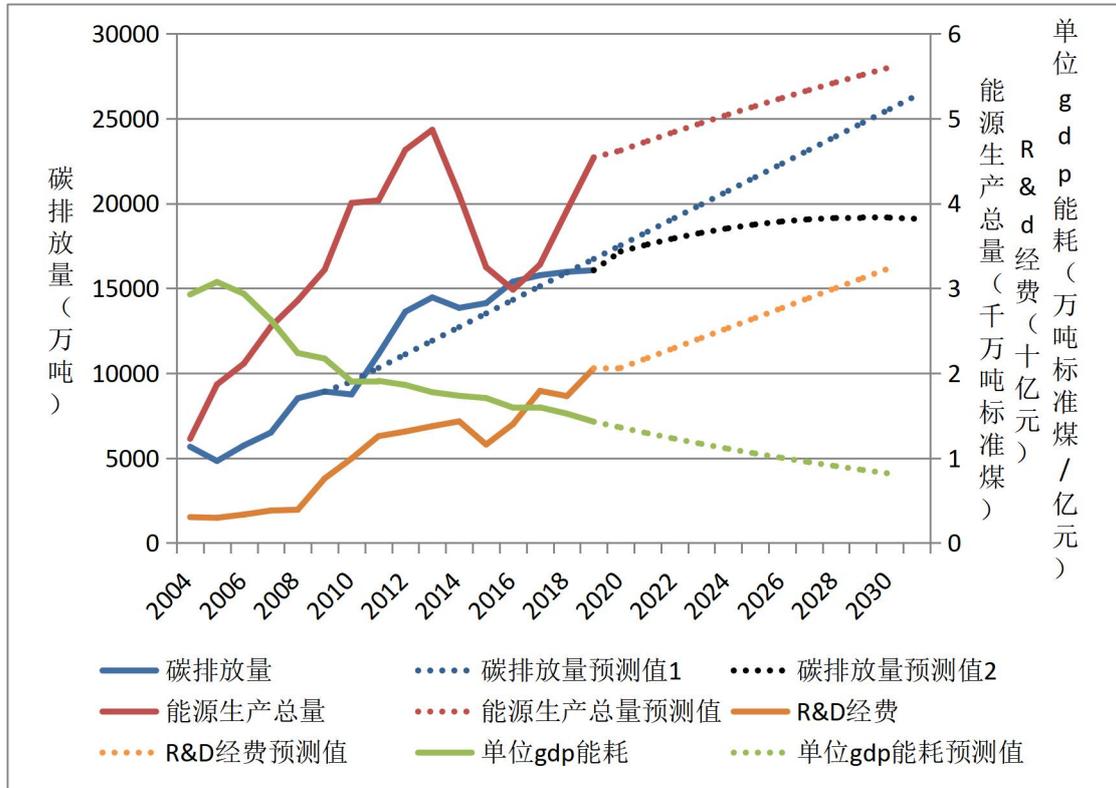


图 4.8 海南省碳达峰情况



4.9 青海省碳达峰情况

有希望 2030 年之前实现碳达峰目标的省份多为东部沿海地区省份。江苏、上海、浙江、福建、广东、重庆和山东等省份经济发展基础较好，有可能率先实现碳达峰，这些省份基本进入后工业化阶段，重工企业大量向外部转移，先进制造业和现代服务业占比较高，在减排控碳方面具有较高起点，碳减排技术排在全国前列。这些省份在“十三五”期间就打下了提前实现碳达峰的基础，煤炭消费总量占一次能源的比重不断下降，非化石能源比重不断上升，并且碳减排相关的政策、资金、人才、科技、对外合作等方面具有明显优势。凭借全国一流的科研水平，可以发挥人才优势、科创优势，促进碳交易为代表的绿色金融发展。

江苏、浙江、山东和广东等省份是我国的经济大省和工业大省，同时碳排放总量也排在全国前列。江苏综合实力一直排在全国前列，既是我国的经济大省，又是碳排放大省。如图 4.1 所示，江苏 2010-2019 的碳排放实际值要高于预测值，这是因为近些年江苏在稳步发展经济，推进城镇化的进程中对化石能源产生了更多的需求，但研发投入位居全国各省份前列，为企业低碳发展提供了有力支持，能源利用效率处在全国领先水平。江苏碳排放量增长率呈现下降趋势，碳排放量会在十四五末期达到峰值。浙江虽然面积不大，但经济体量排在全国前列。如图 4.2 所示，2010 年以后的碳排放实际值要低于预测值，并且碳排放增加值逐年递减趋势明显，有望在十四五期间实现经济增长与碳排放脱钩。浙江是我国的制造业大省和工业产品出口大省，对稳定我国经济增长具有重要作用。浙江经济规模的增长所依赖的化石能源主要来自于省外，同时省内可再生能源和新能源的发展规模不断扩大，节能减排技术在全国处于领先水平，单位 GDP 能耗远远低于全国平均水平。如图 4.6 所示，山东能源生产总量虽然规模较大，但总体比较平稳，并且从 2012 年开始具有下降的趋势，而研发投入不断增加，在全国各省份中排名靠前。近年来，该省份不断推进能源绿色转型，大力发展清洁能源，从源头减排降碳效果明显。随着产业结构不断优化、工艺设备改造升级、非化石能源比重提高、能源利用效率稳步提升。山东碳排放强度明显下降，将在十五五期间完成碳排放达峰的目标。广东位于我国东南沿海，是我国对外开放的前沿阵地。经过四十余年的改革开放，广东如今已成为我国的工业强省和经济强省。如图 4.5 所示，2010-2019 年碳排放实际值远低于预测值，并且碳排放增长率在 2010 年开始下降比较明显，这与 2010 年广东成为我国低碳试点省份的情形相符合。广

东研发投入在我国各省份中位居首位,具有很强的基础研究和科技创新能力,并且化石能源占比不断下降,非化石能源比重不断上升。广东将在十四五初期实现碳达峰,达峰时间大大领先于全国整体和多数省份预计达峰时间。山东经济体量位居全国前三,既是农业大省,也是传统工业强省和能源生产大省。山东是以钢铁、建材、水泥等重化工制造业为主的地区,碳排放量远高于全国平均水平,其碳减排力度对全国整体碳排放目标具有重要影响。

上海、福建和重庆经济发展基础较好,碳排放总量与全国平均水平比较相近。上海是世界金融中心之一,产业结构和欧美发达城市相似,现代服务业占比较高,第二产业以高新技术产业为主。如图 4.3 所示,2010-2019 年碳排放实际值增长率先高于预测值的增长率,随后开始低于预测值增长率。碳排放量在 2015 年左右开始趋于平缓,并将在十四五末期达到峰值。上海的碳排放量在全国处于中等水平,但研发投入、创新水平和能源利用效率在全国处于领先水平。福建地处我国东部沿海地区,地理位置优越,生态环境和经济发展基础较好。如图 4.4 所示,2010-2018 年碳排放实际值要高于预测值,这是因为福建经济增速一直领先于全国平均水平,经济增长的同时也产生了大量的二氧化碳。由于福建绿色产业和战略性新兴产业不断发展壮大,产业结构和能源结构不断优化,单位 GDP 能耗一直处于较低水平,并且还在持续降低,福建预计将在十四五期间实现碳排放达到峰值,之后碳排放逐渐降低。重庆在西部省份中经济发展水平较好,是我国重要的制造业基地和西部的金融中心,地处长江经济带和西部陆海新通道的中心交汇区,对外开放的交通条件发达。如图 4.7 所示,重庆市能源生产总量在全国处于较低水平,并且保持相对平稳。而研发投入呈逐年递增,一定程度上促进了制造业的低碳化发展,能源利用效率也处在相对较高的水平。碳排放实际值在 2010 年以后逐渐低于预测值,将在十四五初期实现碳排放达峰,是西部地区省份碳达峰具有重要的示范作用。

海南、青海等省份经济体量较小,还处于经济发展阶段,碳排放总量在我国各省份中排在末尾,同时拥有丰富的清洁能源和得天独厚的生态环境这些省份森林覆盖率排在全国前列,拥有森林碳汇资源禀赋优势,是欠发达地区中将提前实现碳达峰的省份。海南是我国的海洋大省,拥有良好的生态环境和丰富的可再生能源,产业以旅游业、高新技术产业和现代服务业等低碳产业为主。海南被我国

赋予国家生态文明试验区的战略定位，通过实施新能源汽车、可再生能源基地等一批重大项目，不断推进生态环境保护和绿色低碳发展。如图 4.8 所示，虽然 2010-2019 年碳排放实际值开始阶段高于预测值，但增长率趋于平缓，并在十四五初期变为负值。海南能源生产总量在全国倒数，且能源结构以天然气、风能和太阳能等清洁能源为主，凭借优越的资源优势，新能源和可再生能源产业出具一定规模，碳排在十四五初期便可达到峰值。青海作为我国的欠发达省份，拥有良好的生态环境、丰富的风能、水能和太阳能等清洁能源，在我国的生态安全、国土安全、能源安全等方面具有重要的战略地位。如图 4.9 所示，青海的能源生产总量具有一定的上升趋势，研发投入总量低于其他各省，同时碳排放强度也在全国各省中排在前列。在一定程度上反映了青海省的低碳技术比较落后，不利于控制碳排放。但同时青海规模以上工业数量较少，碳排放量在全国三十省份中排在末尾。青海具有得天独厚的发展清洁能源的自然条件，碳排放量增加值逐年减少，将在十五五期间实现碳排放达峰。

4.3.2 按期实现碳达峰的省份

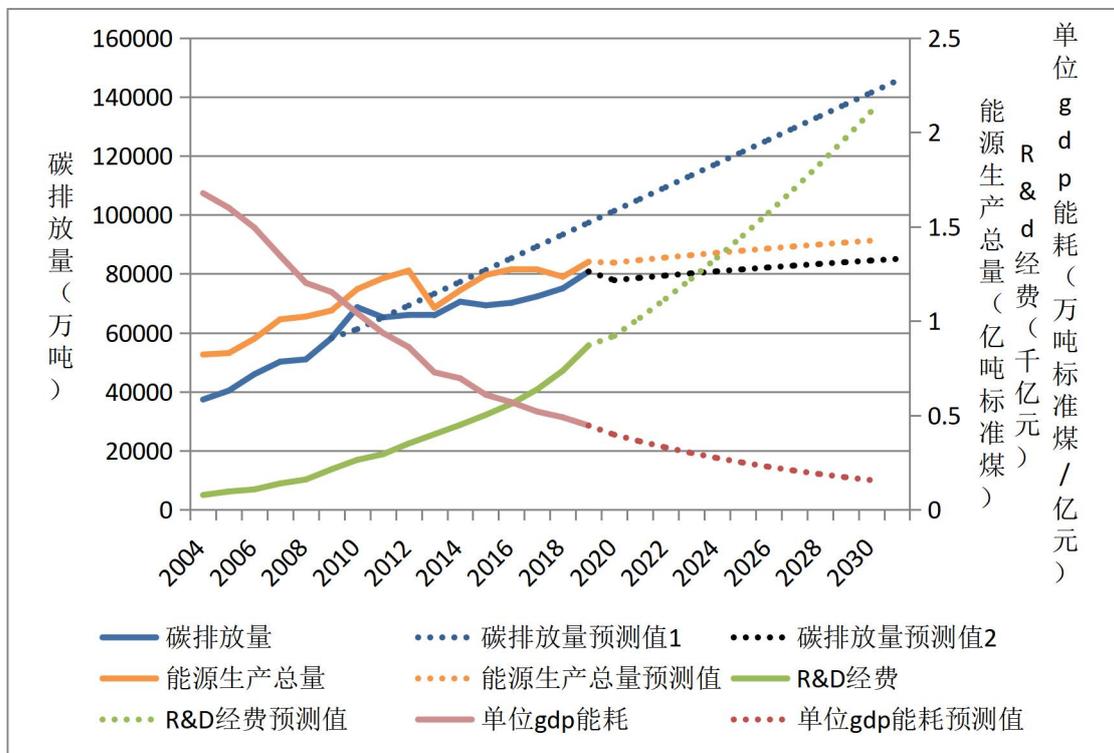


图 4.10 四川省碳达峰情况

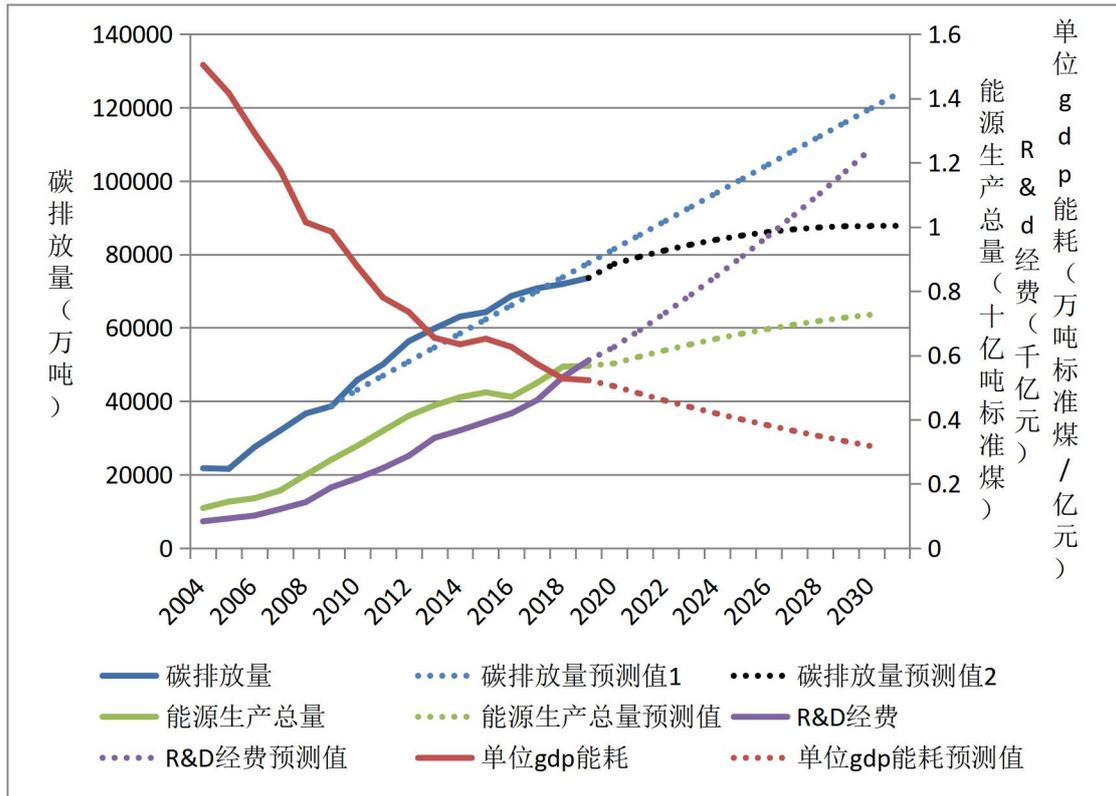


图 4.11 陕西省碳达峰情况

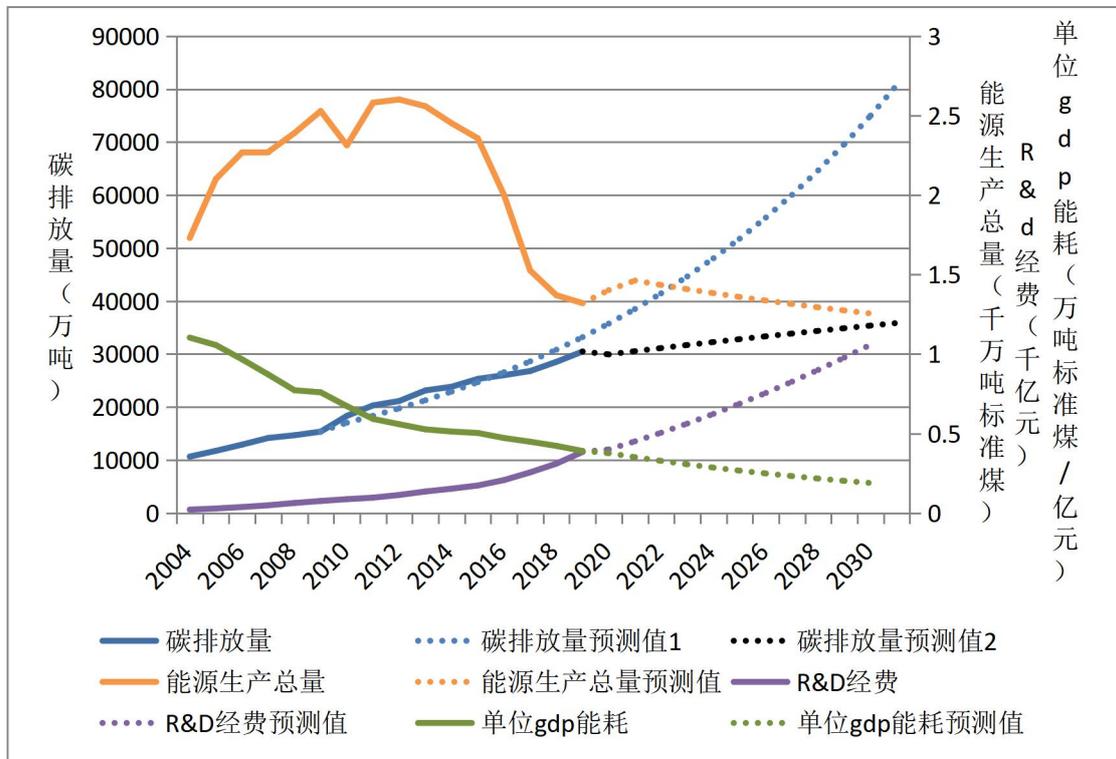


图 4.12 江西省碳达峰情况

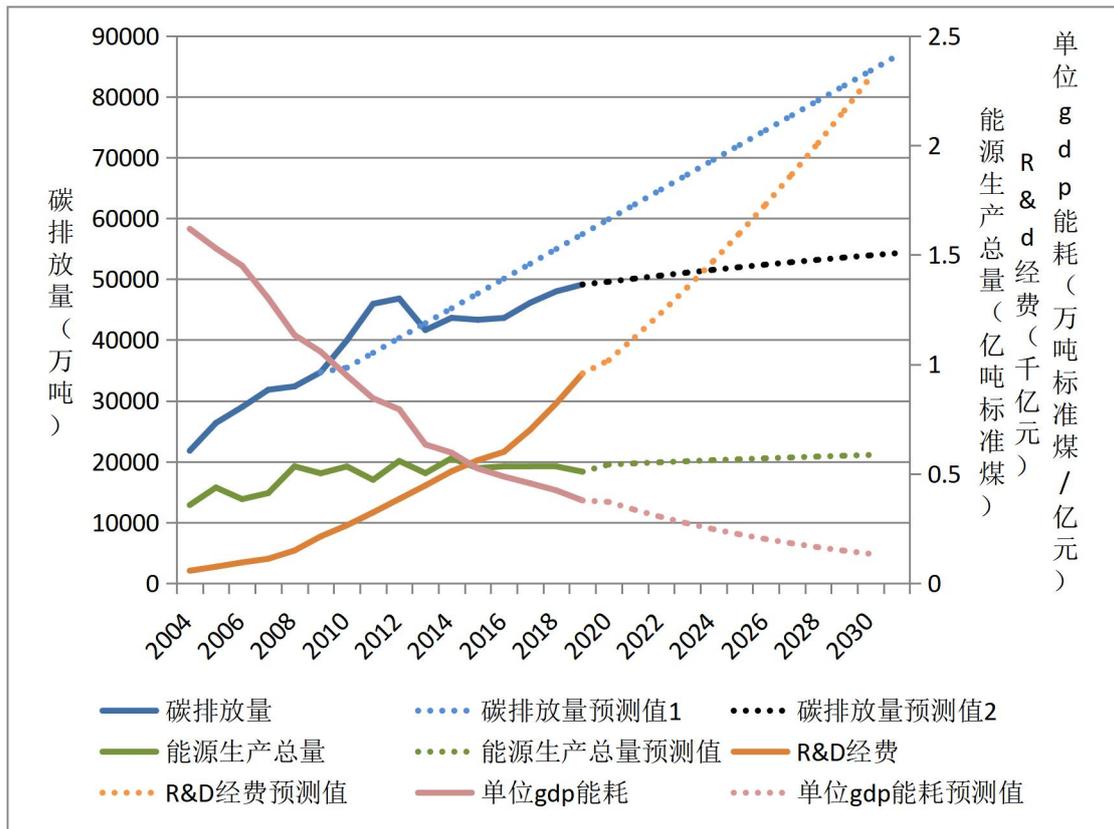


图 4.13 湖北省碳达峰情况

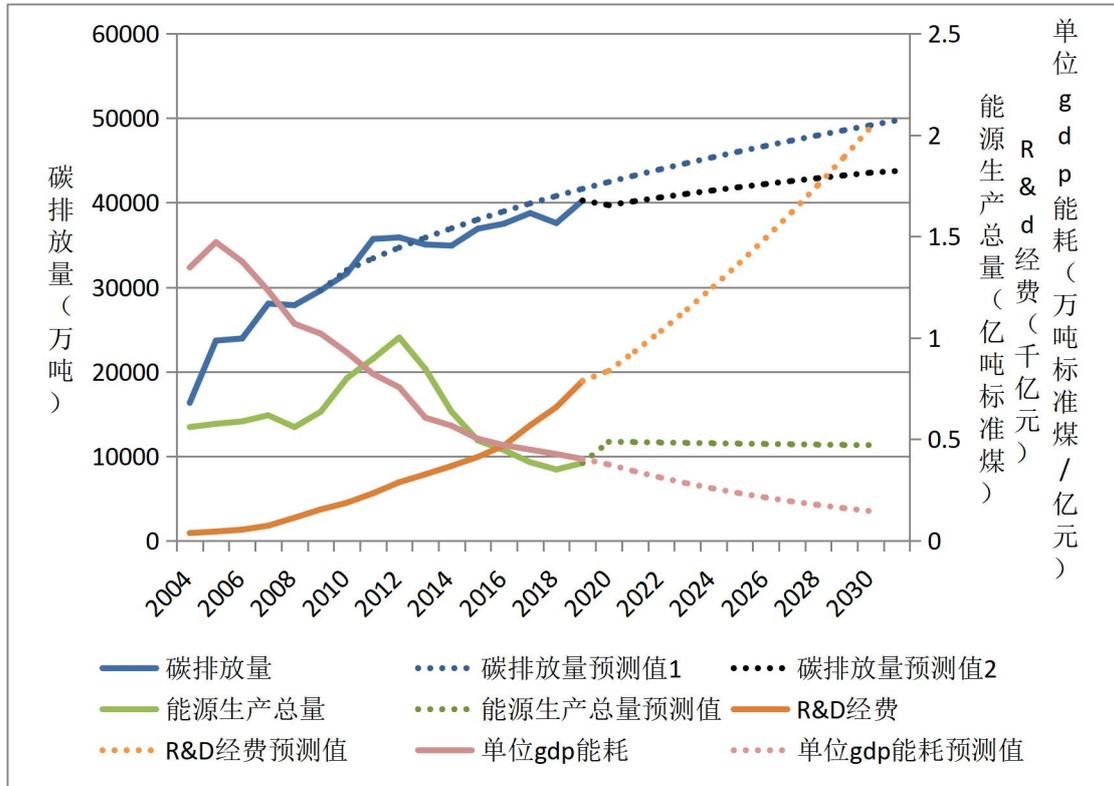


图 4.14 湖南省碳达峰情况

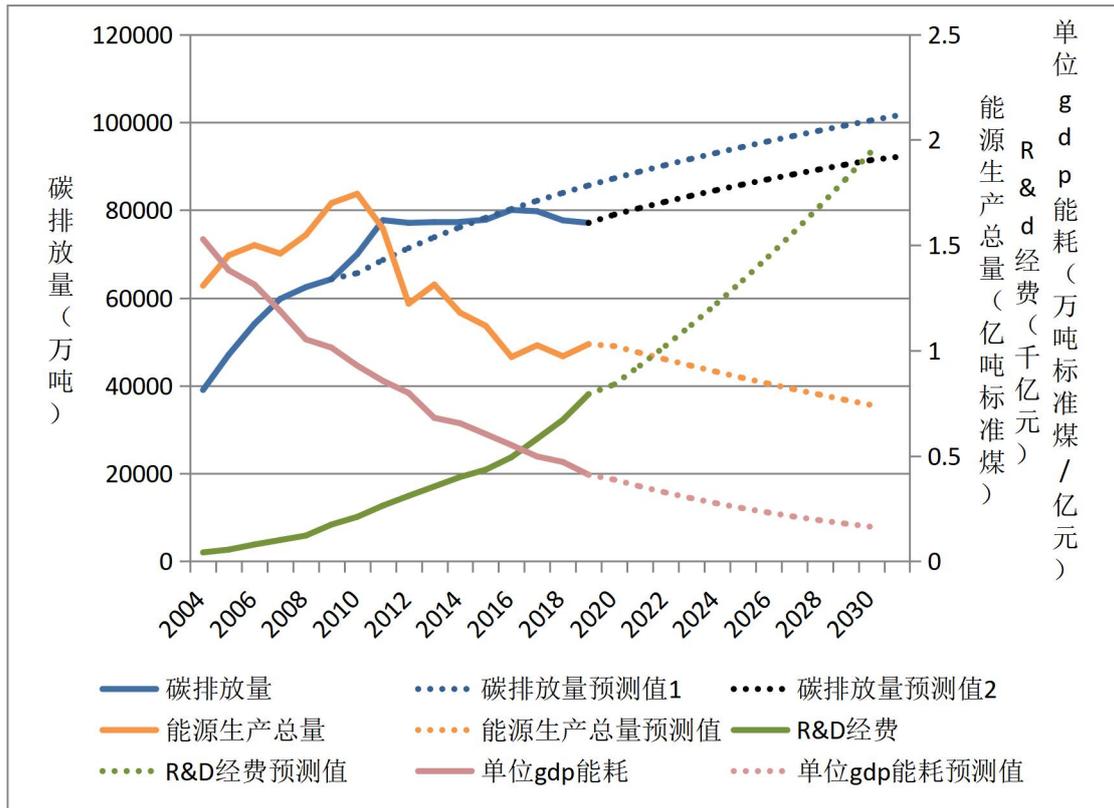


图 4.15 河南省碳达峰情况

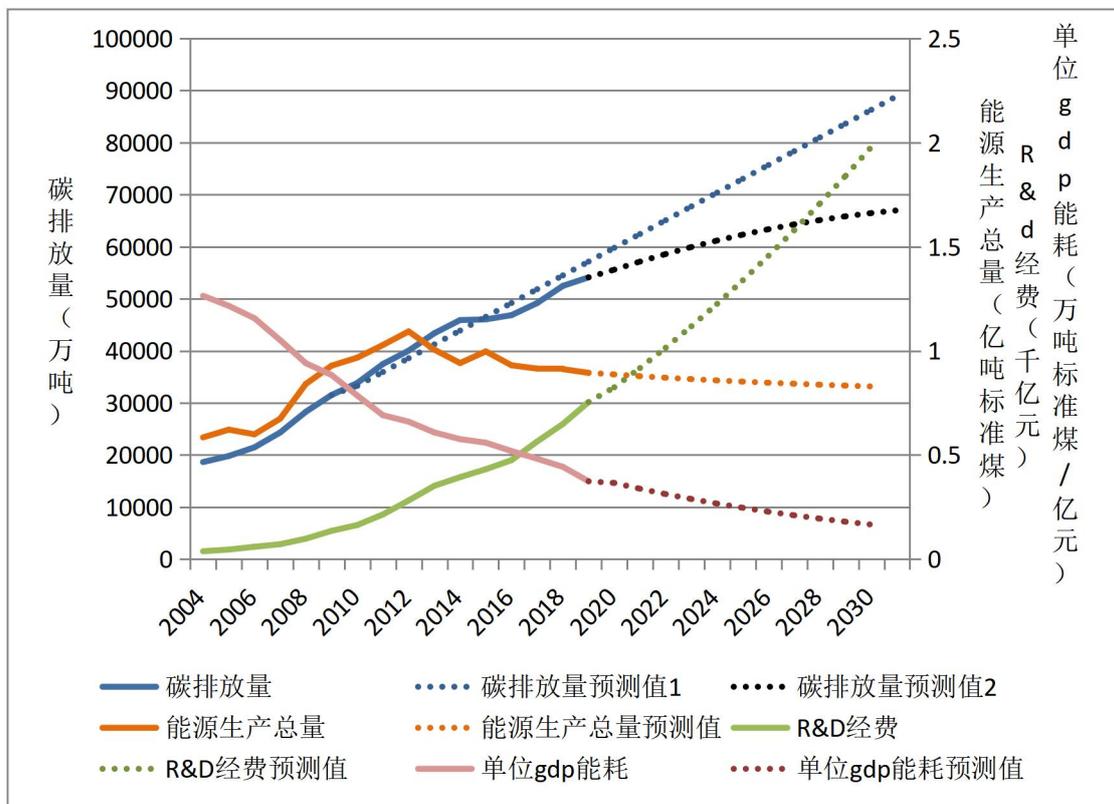


图 4.16 安徽省碳达峰情况

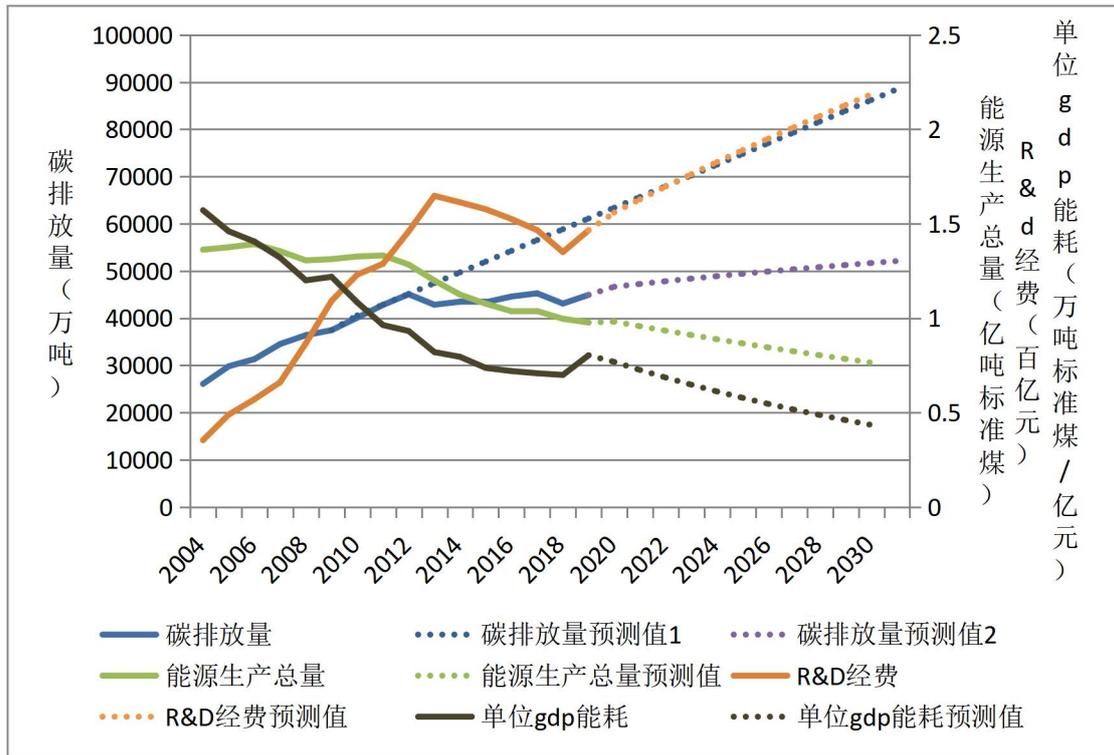


图 4.17 黑龙江省碳达峰情况

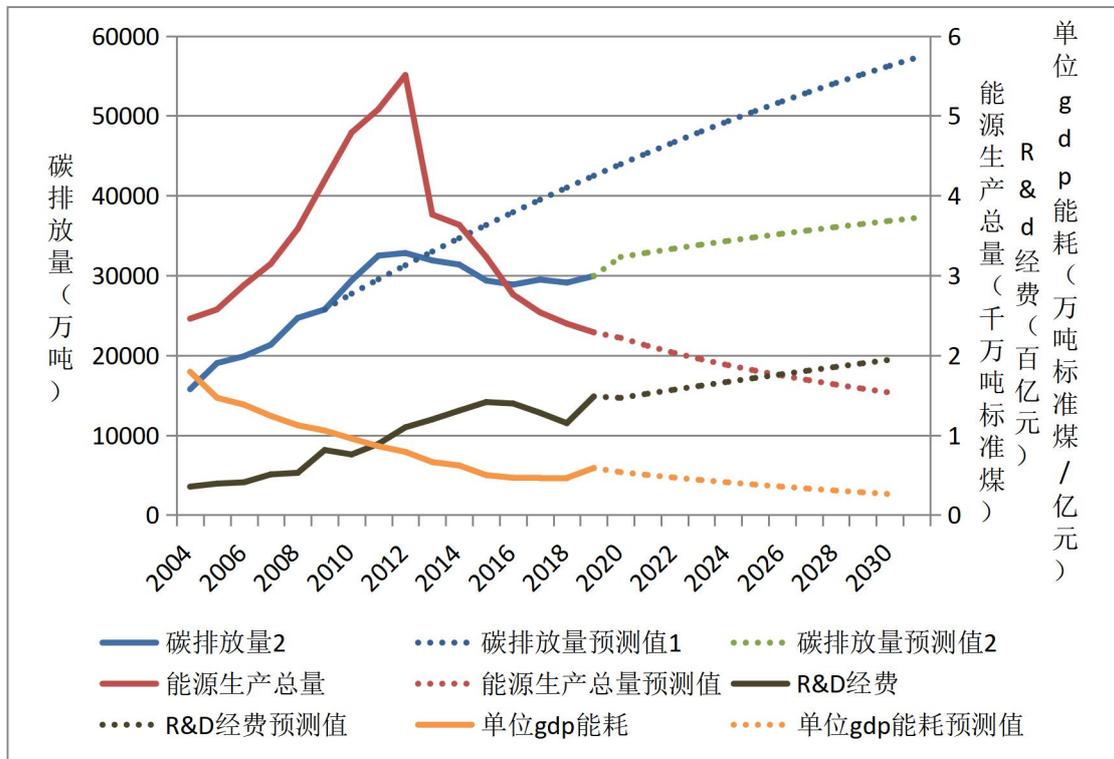


图 4.18 吉林省碳达峰情况

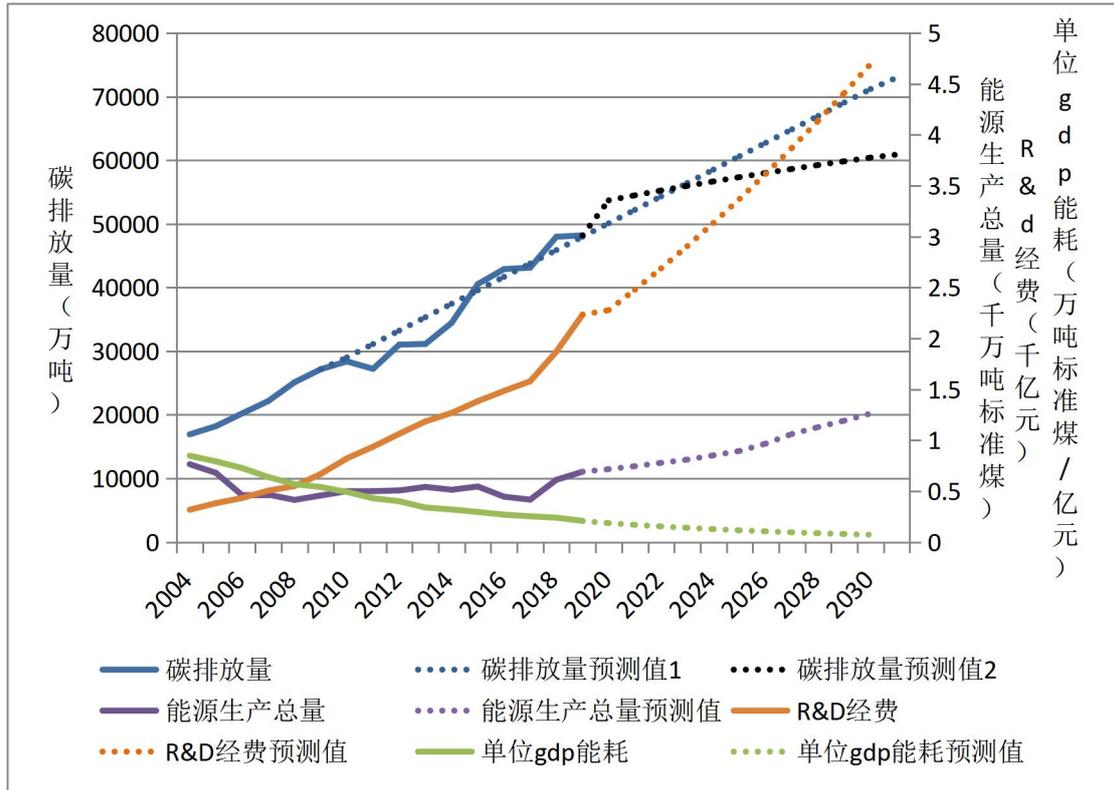


图 4.19 北京市碳达峰情况

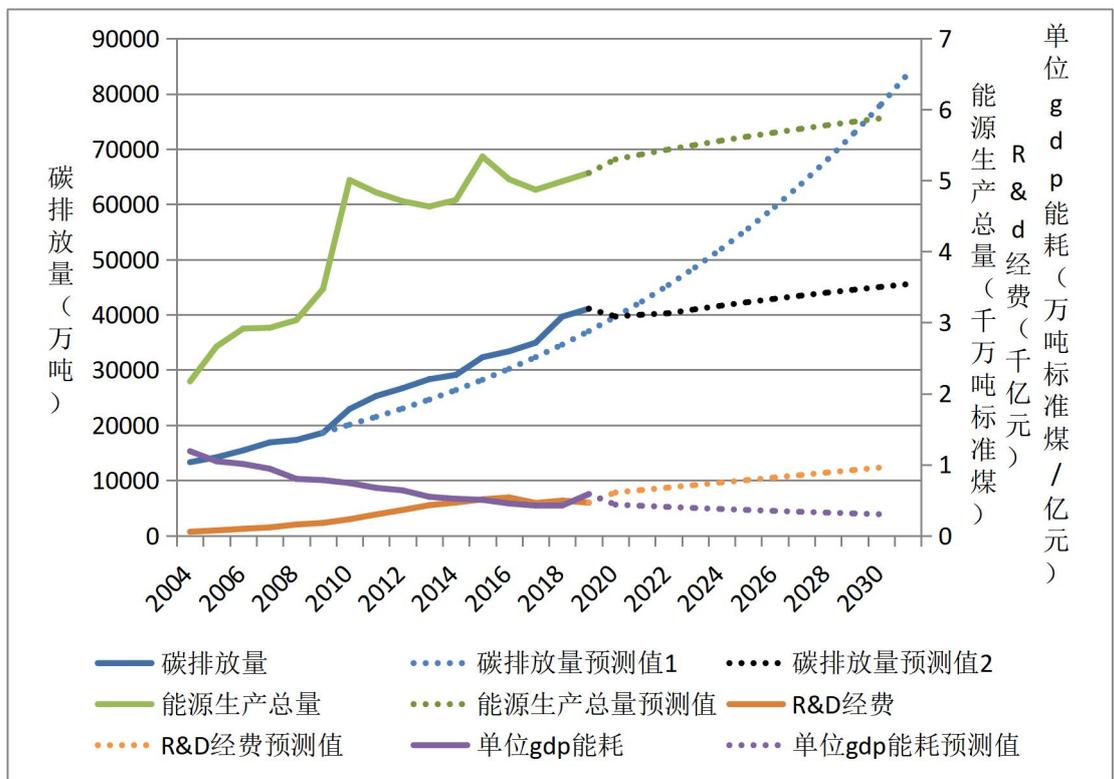


图 4.20 天津市碳达峰情况

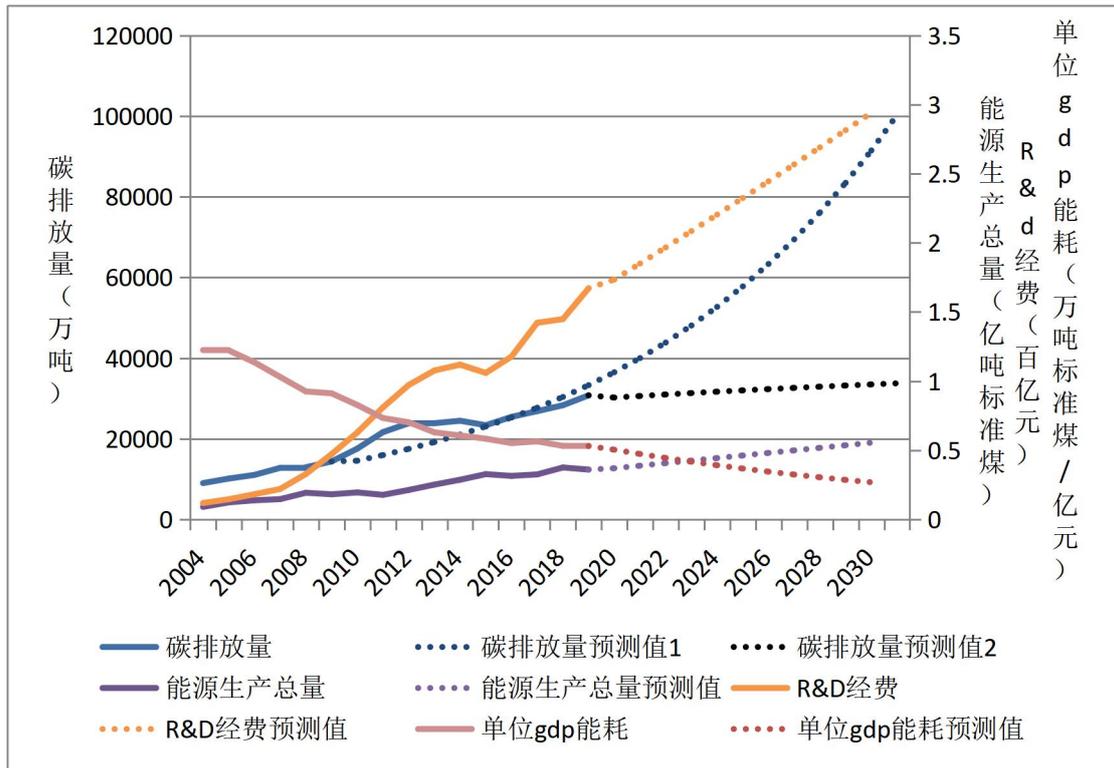


图 4.21 广西碳达峰情况

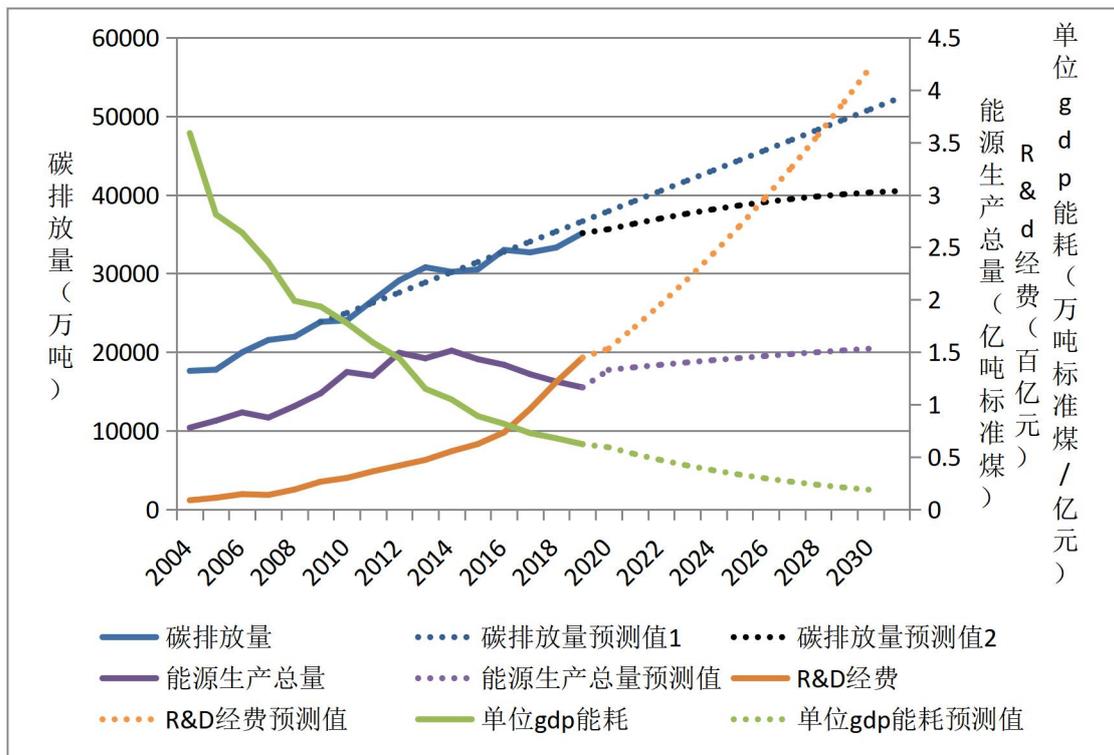


图 4.22 贵州省碳达峰情况

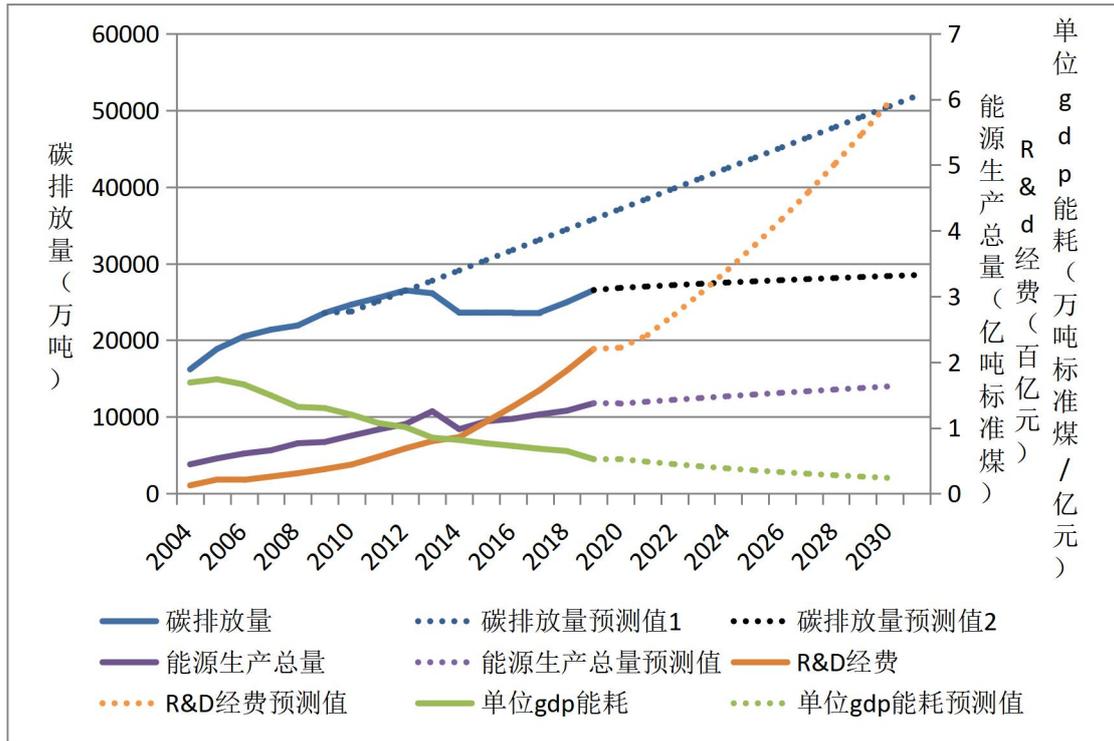


图 4.23 云南省碳达峰情况

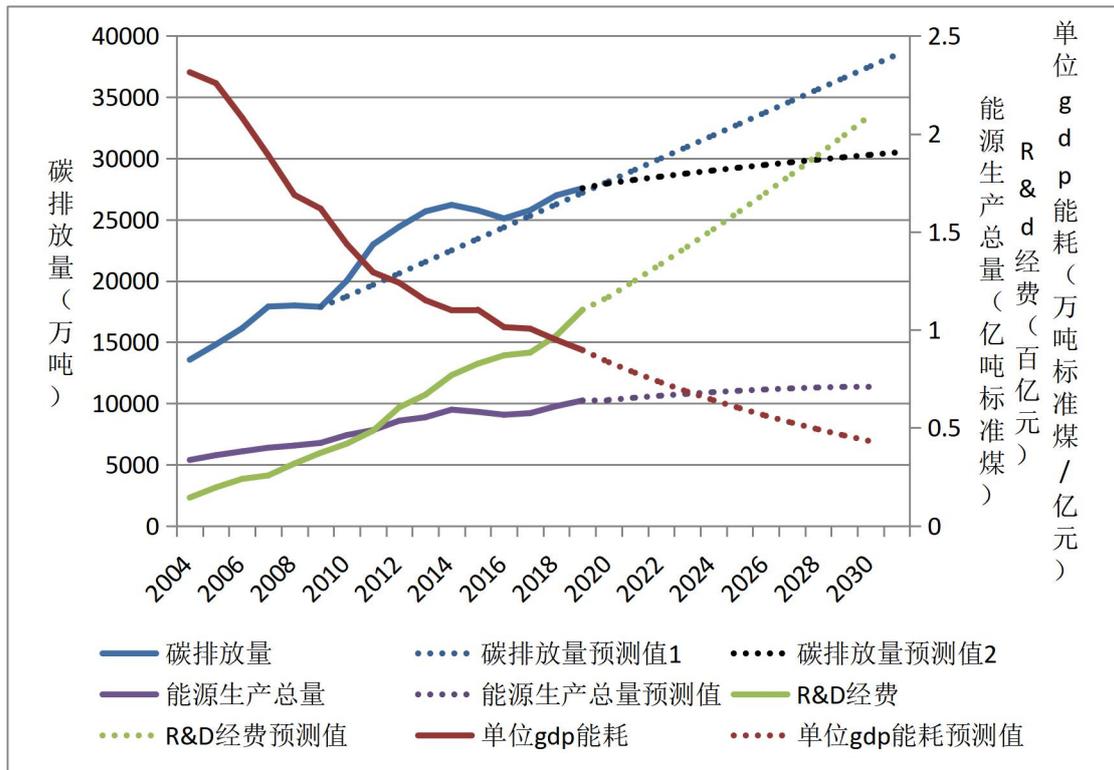


图 4.24 甘肃省碳达峰情况

我国大多数省份预计碳排放达峰时间在 2030 年左右，这些省份主要位于中部地区和西南地区。这些省份工业化和城镇化进程不断推进，经济体量不断增大的同时也消耗了大量化石能源。这些省份拥有一定的经济基础、丰富的森林资源和科创优势。通过统筹规划，科学制定重点地区与行业碳排放总量及增速等约束指标及有效激励指标，发挥创新优势，提前对绿色技术布局，推进绿色产业化，重点引导能源体系重构、新兴产业培育、低碳技术革新等，这些省份有望在 2030 年实现经济发展与碳排放脱钩。

四川和陕西是西部地区经济发展基础较好的省份。四川整体经济实力在西部省份中排在首位，正处在经济快速发展阶段，同时也是我国的能源生产大省和碳排放大省。能源资源禀赋条件得天独厚，既有丰富的煤炭等化石能源，同时也是我国最大的清洁能源生产基地。如图 4.10 所示，四川能源生产总量呈缓慢上升趋势，清洁能源占能源总量的比重不断增加，研发投入在西部省份中排在首位，绿色低碳技术发展较为成熟。工业产业具有多元化发展特征，碳排放强度持续降低，2010 年以后，碳排放增长率下降趋势明显，碳排放增长在 2030 年左右呈现达峰特征。陕西是我国的能源生产大省和碳排放大省，经济发展水平稳步提高，正由我国的欠发达省份向中等发达省份转变。如图 4.11 所示，陕西 2010-2018 年的实际值略高于预测值，这是因为在注重经济发展的同时，也消耗了大量化石能源。陕西的能源化工业、装备制造业和军工产业等不断向低碳化迈进，能源生产总量和研发投入水平不断增长，在协调好经济发展和节能减排的前提下，2019 年以后，碳排放量增加值呈逐年递减趋势，并将在 2030 年左右实现碳排放达峰的目标。

江西、湖北、湖南、河南和安徽等省份均为中部省份，近些年经济发展较好，工业化和城镇化进程不断推进。江西能源资源比较匮乏，是我国中部的经济欠发达省份。近些年，工业化和城镇化推进取得了初步效果。如图 4.12 所示，江西 2010-2019 年碳排放实际值与预测值变化趋势基本一致，并呈现变缓的趋势。政府通过引导传统工业产业向绿色、低碳、清洁方向发展，不断壮大发展新兴产业，促使碳排放强度持续降低，江西将在 2030 年左右顺利实现碳达峰。湖北是我国的经济、工业和碳排放大省，凭借四通八达的交通条件和区位优势，工业化和城市化进程不断向后期推进。如图 4.13 所示，湖北能源生产总量基本保持在一个

相对稳定的水平，而研发投入水平持续增长，为省内工业低碳化发展和培育新兴产业提供了有力支持，单位 GDP 能耗不断降低。湖北 2010-2019 年碳排放实际值在 2010 年和 2011 年有一个较大幅度的增长，随后碳排放实际值逐渐低于预测值，碳排放增长率呈现一定的降低趋势，并将在 2030 年左右趋于零。湖南是我国中部的经济大省，也是我国重要的制造业大省。如图 4.14 所示，湖南能源生产总量稳中有降，创新研发投入不断加大，制造业不断向现代化、先进化、低碳化方向发展，碳排放强度持续降低，能源利用效率高于全国平均水平。2010-2019 年碳排放实际值略低于预测值，碳排放增长率逐渐趋近于零，预计将在 2030 年实现碳排放达峰。河南人口众多、能源资源丰富、经济体量大，是我国的工业大省和碳排放大省。河南能否在 2030 年实现碳排放达到峰值对处在经济发展阶段的河南来说是个不小的挑战，同时对全国整体碳达峰目标意义重大。如图 4.15 所示，河南的能源生产总量近些年来不断降低，以煤炭为主的能源消费结构有所改善，在低碳试点、创新发展战略和供给侧结构性改革等的驱动下，河南不断加快绿色低碳的现代化制造业体系。其单位 GDP 能耗在我国各省份处于中等偏后，可在 2030 年左右实现经济增长与碳排放脱钩。安徽近些年经济增速排在全国前列，现今已成为我国的经济大省，经济高速增长的背后是对以化石能源为主体的能源的大量消耗。不同于部分省份工业结构偏重，安徽完成了农业大省向新兴工业大省的转型。如图 4.16 所示，安徽的能源生产总量稳中有降，对基础研究和核心技术的投入强度不断加大，碳排放强度不断降低，安徽大概率将在 2030 年左右实现碳排放达到峰值。

黑龙江和吉林是我国的老工业基地，能源利用率水平较低。但这两省份是我国的重点林业省份，森林资源十分丰富，生态系统碳汇能力水平不断提高，能源资源种类较为齐全，水能、风能和太阳能发电占比不断增加，通过加快低效率、高排放、高耗能向高效、绿色、安全的发展方式转变，可以如期实现碳排放达峰。黑龙江是我国的农业大省和能源生产大省，是我国最重要的粮仓和能源基地。东北是我国的老工业基地，黑龙江的制造业和军民融合产业在全国具有重要地位。如图 4.17 所示，在国家碳减排的目标下，黑龙江能源生产总量和碳排放强度逐年降低，2010-2019 年实际碳排放明显低于预测值，碳减排取得了显著成效，将在 2030 年左右完成碳达峰。吉林是我国重要的工业基地，其工业经济发展是吉

林经济增长的重要保证。如图 4.18 所示,吉林的研发投入和生产的能源变化不大且体量较小。由于政府对制造业向智能、数字、低碳转型的全面布局,全省能源利用效率在各省份中处于较高水平,其碳排放增长率明显降低并趋于平缓,将在 2030 年左右趋于零,如期实现碳排放达峰目标。

北京、天津都是京津冀地区的直辖市,产业结构要优于同属于京津冀地区的河北,第三产业占比较高。北京是我国的政治中心,具有天然的要素集中优势。北京的第二产业占比较低,且多为高新技术产业,现代服务业是北京经济的支撑产业。如图 4.19 所示,北京的研发投入和创新能力在各省份中排在前列,单位 GDP 能耗要低于其他各省份。近些年,通过政府对大气污染源头加强治理,空气环境得到了明显改善,北京作为我国的政治中心,在碳达峰进程中要发挥引领作用。天津面积虽小,却拥有相对丰富的矿产资源和天津港。如图 4.20 所示,其产业结构中第三产业占比较高,通过对高能耗和高污染企业外移和转型升级,高质量发展先进制造业,有效控制了碳排放的高增长。天津的碳排放在 2020 年以后有明显的减缓趋势,并将在 2030 左右可以完成碳达峰。

广西、甘肃、贵州和云南等省份均位于我国西部内陆地区,这些省份经济发展基础比较薄弱,基础设施建设比较落后,碳排放体量相对较小。其中位于西南地区的广西、云南和贵州具有优越的生态环境,近些年经济增长态势良好。广西拥有天然港口,是我国西南地区面向东盟的桥头堡,如图 4.21 所示,广西 2010-2019 年实际排放的二氧化碳先高于预测值,这是由于追求经济高速发展的同时,也消耗了大量的化石燃料,在十三五期间,不断推动传统工业向绿色低碳转型,做大做优特色和新兴产业,碳排放增长率明显降低,随着产业结构不断调整和创新水平不断提高,广西将在十五五末完成碳排放达峰。贵州经济增速连续多年排在全国前列,但经济发展方式相对比较粗放。如图 4.22 所示,2010 以后的碳排放实际值与预测值增长趋势相似,在此期间,贵州的 GDP 增速连续多年排在全国前三,其背后是消耗的大量化石能源。为响应以生态保护为先,高质量发展的要求,贵州积极寻求产业的技术创新、结构优化,保证在 2030 年左右可以实现碳达峰。云南是我国的动植物王国,拥有优越的生态环境,煤炭等化石能源和水能等可再生能源资源十分丰富。如图 4.23 所示,云南 2010-2019 年的碳排放实际值逐渐低于期间预测值,并且碳排放增长率趋于零,在 2030 年左右可以

实现碳排放达峰，这得益于云南的主导产业多为低碳产业，并且非化石能源消耗的比重远低于全国平均水平。甘肃地处我国西北欠发达地区，生态环境比较脆弱，拥有煤炭等丰富的化石能源和风能、光能等新能源。如图所示，2010-2019年碳排放实际值略高于期间的预测值，这是因为甘肃的产业结构以高耗能的工业为主，能源消费以煤炭等化石能源为主。随着传统工业低碳化，新能源产业规模化，碳排放强度逐渐降低，为甘肃在2030年左右碳达峰创造了条件。

4.3.3 实现碳达峰存在不确定性的省份

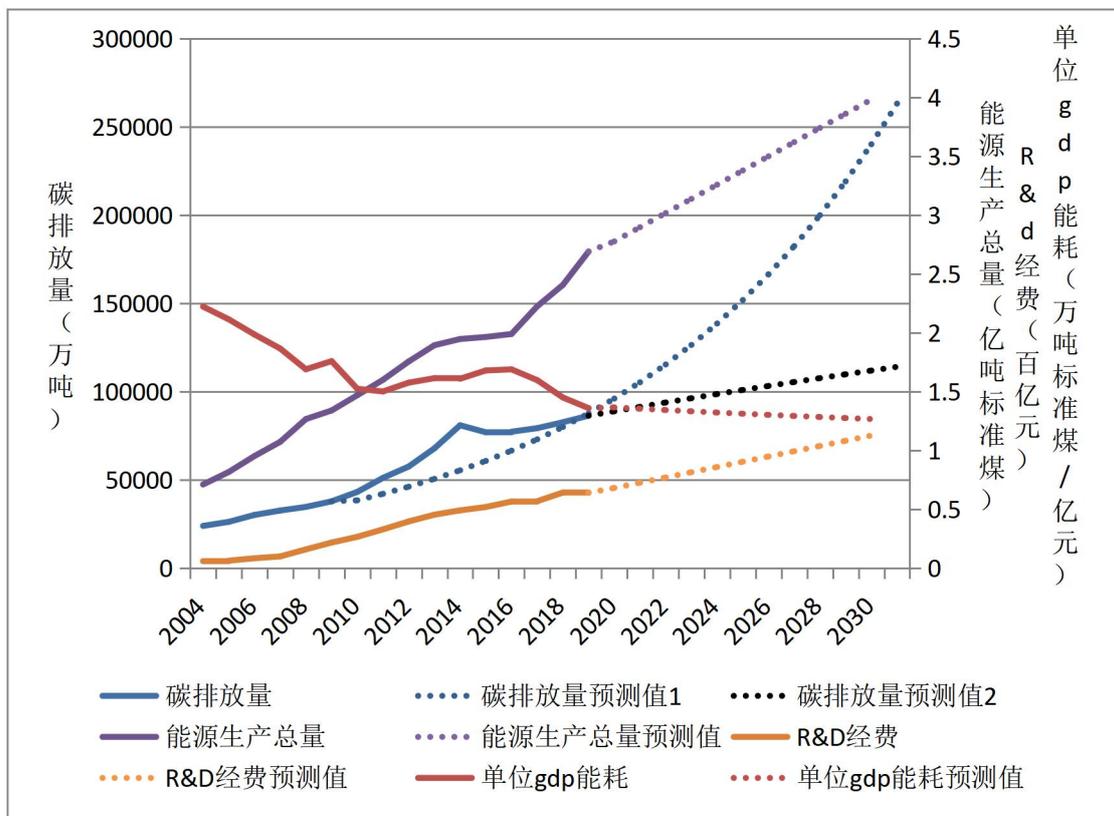


图 4.25 新疆碳达峰情况

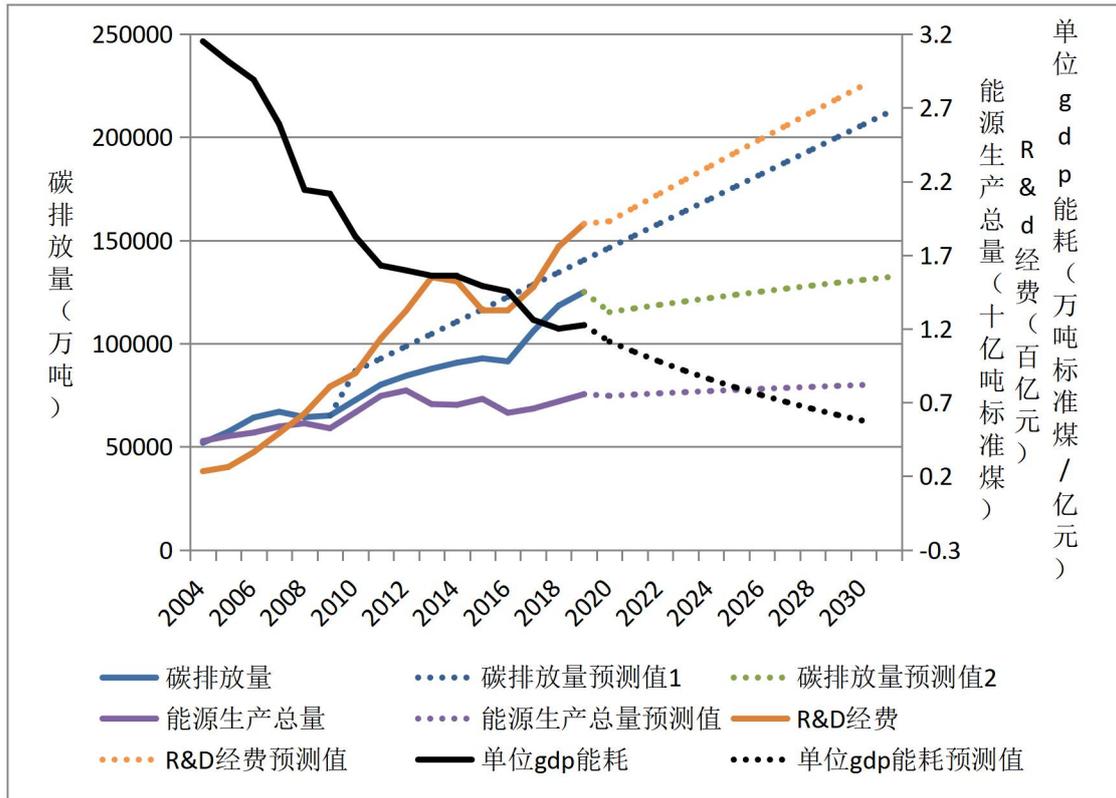


图 4.26 山西省碳达峰情况

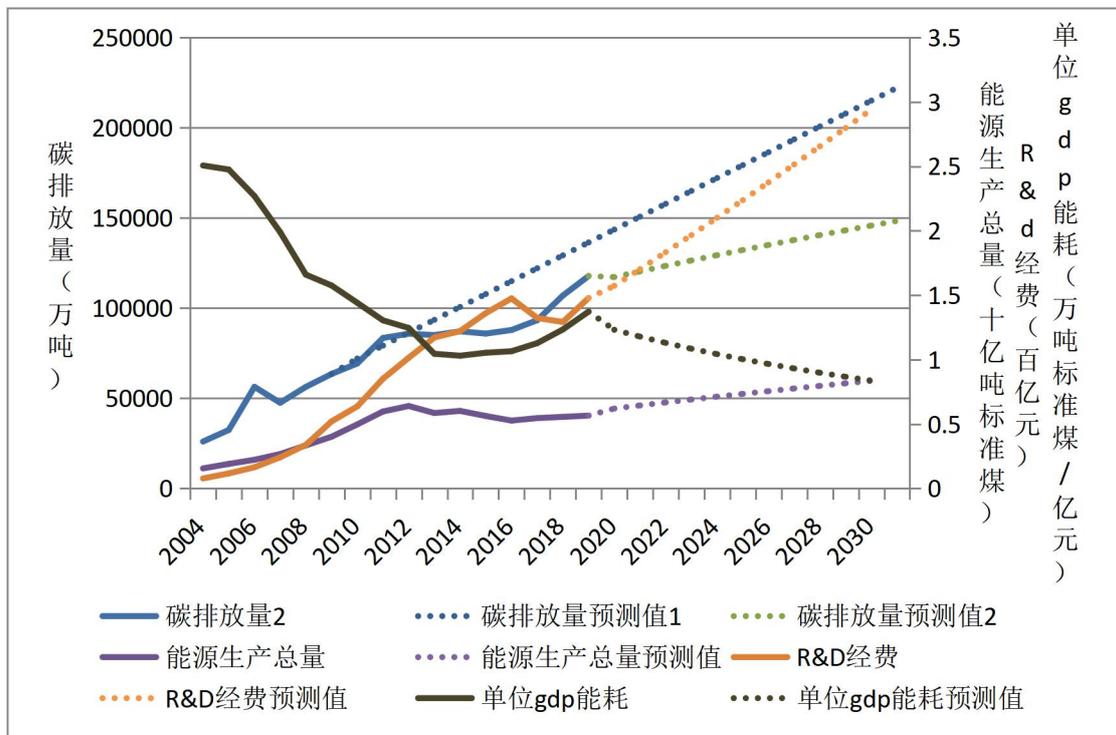


图 4.27 内蒙古碳达峰情况

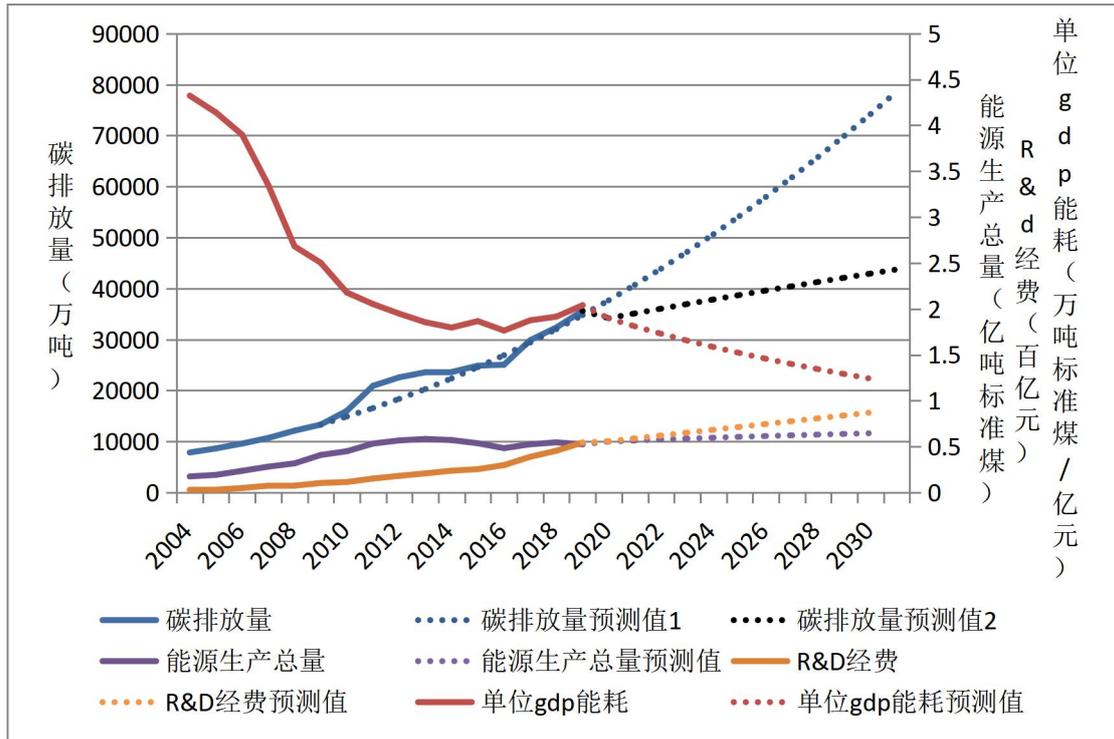


图 4.28 宁夏碳达峰情况

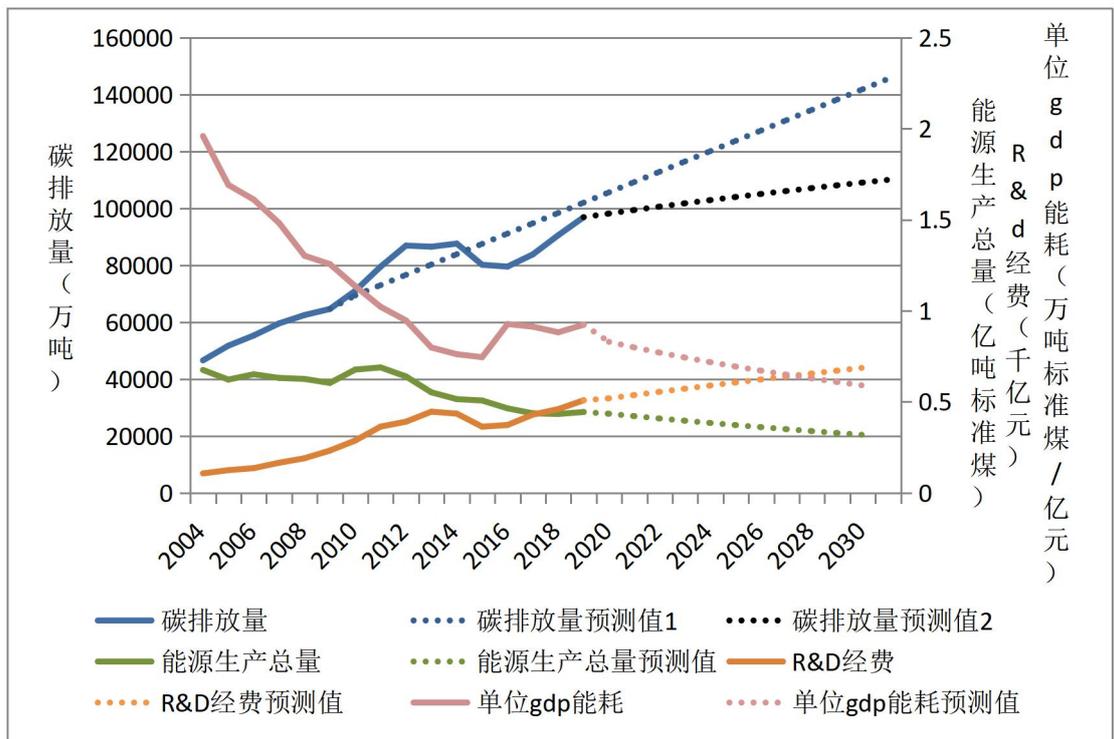


图 4.29 辽宁省碳达峰情况

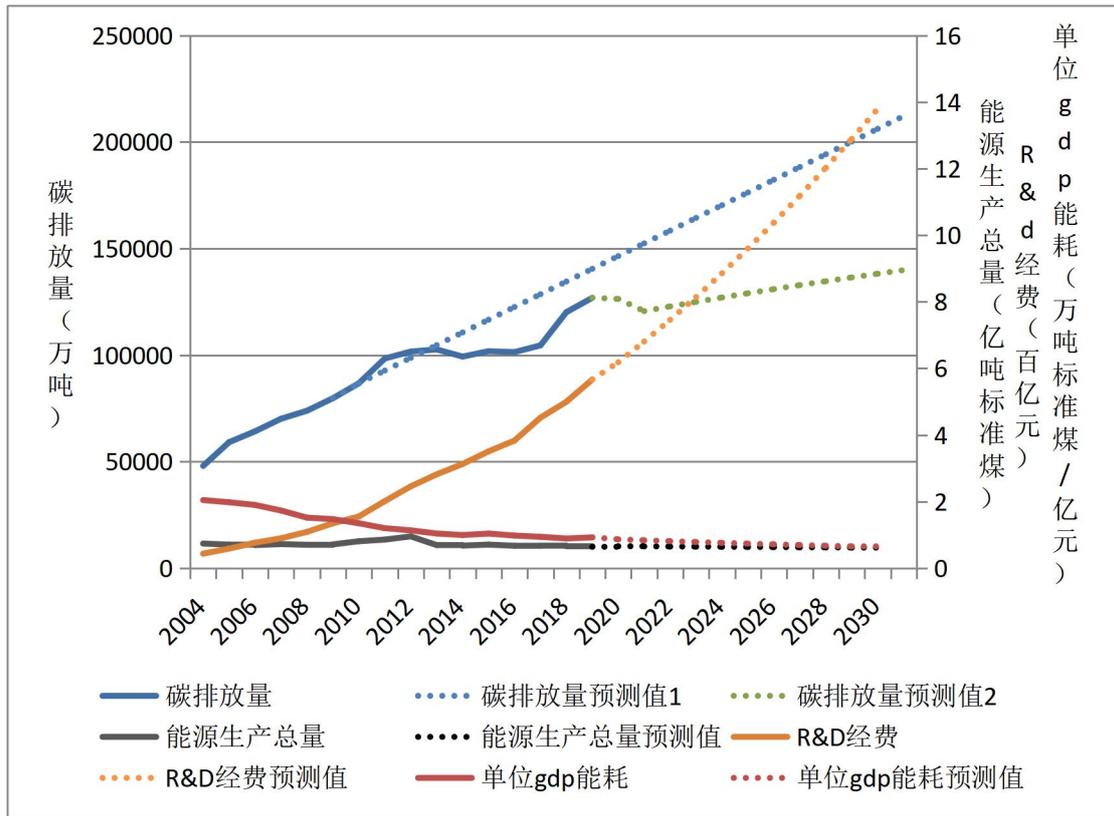


图 4.30 河北省碳达峰情况

一些省份短期内实现碳达峰存在很大的不确定性，这些省份主要是以西北内陆地区为主体的工业和能源大省。新疆、山西、宁夏和内蒙古等省份煤炭、石油和天然气等能源资源十分丰富。这些省份依旧处于收入水平较低、人均碳排放较高的状态。经济水平与东部经济发达省份还有一定差距，大量就业人口和地方财政收入依赖于能源资源相关行业，产业结构初级化、重型化、单一化问题突出，经济发展方式比较粗放，这些地区的碳达峰的时间和水平，以及达峰后的碳排放趋势也具有不确定性。大部分处于中西部的省份还处于工业化时期，宁夏、山西等省份遵循工业化发展规律，正进入重化工阶段。在重大低碳工艺和技术短期很难商业化应用以及非化石能源无法满足能源增量需求的现实背景下，这些地区发展重化工业可能存在碳排放增加的风险。对于这些地区，如何在控制碳排放和推动经济增长之间寻找平衡点是一个挑战。

新疆、山西、宁夏和内蒙古等省份经济基础较为薄弱，具有良好的能源资源禀赋。新疆地处我国西北内陆，是我国“一带一路”战略向西对外开放的桥头堡，同时也是我国的能源大省，石油、天然气等清洁的化石能源为东部经济发展提供

了保障。如图 4.25 所示，新疆的能源生产总量仍保持逐年增加的趋势，而研发投入有所不足。这也导致了碳排放强度改善不够显著，明显落后于我国大部分省份。2010-2019 年新疆碳排放实际值低于预测值，控制碳排放取得显著成效，但碳排放仍处在增长阶段，和全国整体一同实现碳达峰具有一定的挑战性。山西是我国的能源生产大省和碳排放大省。每年开发生产的煤炭等丰富的矿产资源大多被输送到中东部各省份，为我国经济的稳定增长提供了能源保障。如图 4.26 所示，2010-2019 年山西的碳排放实际值增长率要低于预测值，在全国碳减排的大背景下，山西积极转变产业结构，碳减排取得一定成果。同时山西经济发展水平在中东部省份中相对落后，依赖煤炭、电力等高污染产业发展经济的方式与创新不足并存的难题，对山西 2030 年实现碳达峰具有一定的压力。内蒙古从东横跨到西，是我国北部重要的生态屏障。内蒙古煤炭、石油等化石能源储量丰富，是我国重要的能源基地和向外供电大省。如图 4.27 所示，自 2010 年国家推行低碳试点城市以来，内蒙古碳排放得到了有效控制。同时内蒙古第二产业占比较高，并且以传统的煤炭、电力等高耗能产业为主，这也在一定程度上导致了内蒙古的碳排放强度排在全国前列，要在 2030 年实现碳排放达到峰值具有一定困难。宁夏是我国的经济欠发达省份，同时也是我国的能源生产大省。如图 4.28 所示，2010-2019 年碳排放实际值与预测值基本一致，在 2020 年以后碳排放增长率呈现下降趋势。宁夏的研发投入和能源生产总量都具有上升趋势，但研发投入在全国各省中的排名与能源大省的地位不匹配，宁夏能源结构以煤炭为主，产业中高耗能产业占比较高，在产业链中处于中低端，其单位 GDP 能耗远高于其他各省份，能源利用效率水平还有很大的提升空间，宁夏要在 2030 年前实现碳达峰需要做出很大的努力。

辽宁、河北相对于新疆、宁夏、山西和内蒙古等省份有所区别，辽宁和河北经济发展基础较好，交通条件便利，是我国的传统工业基地，为我国经济发展做出了重要贡献。辽宁是东北三省唯一临海的省份，经济体量在东北三省中位居第一。如图 4.29 所示，能源生产总量具有一定的下降趋势，有利于碳排放的减少。同时研发投入的体量、增长速度与东部其他沿海省份相比存在一定差距。辽宁是我国的传统工业大省，并且高碳排放的重化工业占有一定比重，产业结构相对失衡。绿色低碳技术创新能力不足，碳排放强度跟不上经济发展水平，其碳达

峰时间可能会晚于国家整体碳达峰时间。河北是我北方的经济大省和全国的碳排放大省，其丰富的化石能源为省内经济发展提供了支持。如图 4.30 所示，其能源生产总量保持相对平稳，研发投入增长率呈现上升趋势，总量与其他经济发达省份相差较大。河北的产业体系建立在以钢铁、建材等高耗能产业为主的传统工业的基础上，高新技术产业还处在起步阶段，产业结构相对经济发达省份比较单一。对河北来说，产业结构调整是一项艰巨的任务，其总体能源利用效率还有待提高，2030 年实现碳排放达到峰值挑战性很大。

5 相关政策建议

5.1. 关于提前实现碳达峰省份的建议

5.1.1 深化国际合作，发挥国内碳达峰引领作用

提前实现碳达峰的省份主要是江苏、上海、浙江等东部沿海省份和内陆的青海、重庆等省份，这些省份应在全国各地碳达峰行动中发挥引领和示范作用。广东、江苏、浙江、山东等省份经济水平和碳排放量均排在全国前列，其实现碳达峰时的峰值和时间对我国整体碳达峰进程具有重要影响。作为我国的生态文明建设高地，青海、海南等省份碳排放体量排在全国倒数，但在我国清洁能源建设和碳汇产业发展中具有重要作用。浙江、上海、福建、重庆、广东和江苏等省份作为我国创新与对外开放的高地，要深化与国际在绿色技术、绿色金融和绿色能源等方面的交流合作，进一步巩固碳排放成果。作为我国的海洋大省，海南要利用好国际碳排放权交易中心这个国际交流平台，根据我国国情建立与国际标准接轨的海洋碳汇标准体系。

5.1.2 进一步优化产业结构，促进经济低碳化发展

各省份的碳排放主要来自发电、发热行业等工业部门，必须采取相关措施提升山东、广东、江苏、浙江、重庆和福建等省份发电、发热产业的碳排放效率，控制碳排放量。这些省份第二产业占比较高，应科学谋划产业结构调整方向，充分利用人才、资金、技术等优势，着力发展高新技术产业、战略性新兴产业等第二产业，并不断提高现代服务业对经济增长的贡献力度。在保持经济稳定中寻求产业低碳化路径突破口。作为西部地区较为发达的省份，重庆要充分发挥其区位优势，通过促进传统产业转型升级，与东部发达省份在低碳技术等方面加强交流合作，不断发展壮大制造业和战略性新兴产业。海南要充分利用好自由贸易港这个战略定位，着重推动旅游业等低碳产业发展，并推广新能源汽车在海南普及。青海发展经济的同时要发挥好国家生态屏障这个重任，对部分资源依赖型企业要加快转型升级，严格控制高耗能企业的新增。

5.1.3 发挥先进技术优势，建立现代能源体系

广东、江苏和浙江等省份研发经费投入在全国处于前列，绿色低碳技术和能源装备制造技术较为成熟，能源利用效率高于其他地区，应在全国碳减排中发挥其创新能力和技术水平。同时这些省份也是我国的能源消耗大省，加快发展清洁能源，改善能源供应结构对控制碳排放意义重大。山东、广东、江苏、浙江、海南和福建等东部沿海省份具有具有发展核电、海上风电和光伏产业的天然条件，应充分利用其资源与先进技术优势，提高核能、风能和太阳能等清洁能源自给率，降低对外部化石能源的依赖度。重庆的创新能力在中西部地区排在前列，一次能源相对匮乏，经济社会发展所需的化石能源依赖于进口，应立足于丰富的可再生能源资源禀赋，有序推进风能、水能和太阳能等能源项目的建设。青海在我国的生态保护中具有重要地位，其清洁能源资源十分丰富，并且具有一定的能源开发先发优势，要紧紧围绕风能、水能、天然气和太阳能等能源资源，加快建设成我国的清洁能源基地。

5.2. 关于如期实现碳达峰省份的建议

5.2.1 立足碳排放实际情况，合理规划碳达峰行动

如期实现碳达峰的各省份经济社会发展水平、生态环境状况和能源资源禀赋等有所不同，各省份需要遵循中央部署和结合自身碳排放实际情况，研究制定碳达峰专项方案，明确碳排放达峰的重点区域、行业和达峰路径。各省份政府部门要提高对于如期实现碳达峰的思想认识，把碳达峰目标作为一项不容轻视的政治任务，要把其融入到实现高质量发展的规划中。北京、天津等经济发展水平较高、低碳经济发展基础较好的省份和身为生态文明试验区的贵州和江西等省份要发挥自身优势，主动作为。各省省内地区发展方式有所不同，要重点控制化石能源开采利用和工业聚集的区域的碳排放。针对交通、煤化工和建筑等高耗能产业，制定绿色低碳行动计划，实行碳排放标准约束、增量控制等一系列措施控制碳排放。

5.2.2 加快产业结构调整，有效控制煤炭能源消费

各省份要根据自身特色优势，在生态有机农业、先进制造业以及现代服务业中选择适合自身发展的相关行业，以实现碳达峰目标为契机，推进产业结构转型升级。正确处理好经济稳增长与优化产业结构的关系，降低工业在产业中所占的比重，尤其是控制高耗能企业的化石能源消费，有利于控制碳排放。河南、四川、吉林、天津、安徽、陕西、湖北和湖南等省份工业实力强劲，以煤炭为主的化石能源消耗占能源消费比重较高。各省份通过深化供给侧结构性改革，降低重化工业、高耗能产业在第二产业中的比重，产业结构减排会取得较好的效果。中部地区和东北地区是我国工业集聚的地区，在工业化和城镇化进程中产生了大量污染物，碳排放总量占全国的比重较高。这些省份应与发达国家和东部省份积极合作，大力推进对钢铁、建材和交通等重点领域低碳技术的创新和技术引进，降低碳排放强度。北京作为我国的发达城市，产业结构以第三产业为主，能源利用效率水平远远低于全国平均水平，要进一步推动产业结构优化升级，大力发展高新技术产业和现代服务业，同时做好节能减排技术的深度研发与推广工作。

5.2.3 依托资源禀赋优势，促进低碳经济发展

我国煤炭资源十分丰富，石油和天然气比较匮乏。由于我国工业化和资源禀赋特点，能源需求和供给体系以煤炭占主体的化石能源为主。在碳达峰的目标驱动下，各省份应逐步减少煤炭、石油等化石能源占比，加大对风能、光能等可再生能源的开发。我国可再生能源资源具有一定的区域性特征，政府层面要做好对可再生能源开发的规划和政策、资金支持。四川、云南、贵州、甘肃、陕西和重庆等西部省份是我国新能源开发的重点区域，而东部地区新能源研发和装备制造技术全国领先，这些省份要和东部地区加强技术合作，合力下好全国及各省能源结构调整这盘棋。经过多年的发展，我国可再生能源开发规模和技术水平在全球处于领先地位，但在成本方面，可再生能源相对火电还不具备优势，政府要对相关企业做好财政补贴，充分调动企业参与开发建设的积极性。四川、湖北、云南和贵州等省份水能资源丰富，要做好水能资源的开发利用。风电和光伏占清洁能源的比重较高，是我国可再生能源开发的重点。云南、贵州、甘肃、北京、黑龙

江和吉林等省份风能资源较为丰富，要做好风力资源的利用。广西、云南、贵州、黑龙江、吉林、江西和湖南等省份森林植被资源十分丰富，要加强对森林资源的保护，发挥其生态服务功能和碳汇能力。

5.3. 关于实现碳达峰困难省份的建议

5.3.1 给予相应的政策支持，推动合理实现碳达峰

内蒙古、新疆、宁夏和山西等省份为我国经济社会稳定发展提供了重要的能源保障，这些省份在推进碳达峰进程中面临的挑战较大，国家层面应该在传统产业转型升级、科技创新投入等方面给予相应的政策支持。我国各地区实现碳达峰的条件差别较大，碳达峰目标不能以牺牲经济发展为代价，要结合碳达峰困难省份的实际情况，下达合理的碳减排任务，给予适度的碳达峰空间。国家金融机构要加大对这些省份清洁能源、节能环保和节能减排技术等绿色低碳领域的资金支持，并且引导更多的社会资金助推经济社会发展全面绿色转型。

5.3.2 提高能源利用效率，打造清洁高效的产业体系

西部地区地处我国内陆腹地，经济发展水平、技术水平和基础设施建设等比较落后，粗放的经济增长方式导致能源利用效率较低。山西、内蒙古、宁夏和新疆等欠发达省份，具有丰富的化石能源资源和占比较高的高耗能工业，促进地区经济发展的同时要发挥好能源资源禀赋优势，要落实好人才引进政策和对节能减排技术的资金支持，加大煤炭、电力等重点行业的绿色转型，重点培育和壮大特色农业、装备制造、旅游业等新兴产业，积极调整产业结构转向低碳化，探索生态优先、绿色发展为导向的新路子。这些省份第二产业占比较高，煤炭开采力度较大的地区，要限制高耗能项目增加，促进创新链与产业链的融合，建立绿色低碳、清洁高效的煤炭开采、利用体系。河北和辽宁作为我国的工业大省，产业结构偏重，能源效率水平有待提高。这两省份应加快传统产业转型升级，控制钢铁、建材和化工等高耗能产业的发展，大力发展先进制造业、战略性新兴产业和现代服务业，利用绿色低碳技术提高能源利用效率，建立绿色低碳、清洁高效的产业体系。

5.3.3 有序推进清洁能源开发，加快能源结构调整

化石能源消费在这些省份的能源消费中占主体地位，其中煤炭是最主要的化石能源。要加强绿色低碳技术的应用，推动煤炭清洁高效利用。同时要向能源利用效率水平高的东部发达省份学习先进的节能减排技术并推广普及，提高能源利用效率。辽宁在氢能和核能产业发展方面具有良好的基础，应积极推进氢能、核能等清洁能源的项目建设，加快能源结构绿色低碳转型。这些省份风能和太阳能等可再生能源比较丰富，要合理布局风能和太阳能等的开发利用，提高清洁能源在能源结构中的占比。其中内蒙古和新疆等省份是我国可再生能源的富集区，要加大对风能和太阳能等可再生能源的装机规模，有效降低燃煤火电的占比，加快建成我国的清洁能源基地。

参考文献

- [1] Stern, D.I., 2015. The environmental Kuznets curve after 25 years[J]. *Journal of Bioeconomics* 19(1): 1-22.
- [2] Churchill, S.A., Inekwe, J., Ivanovski, K., Smyth, R., 2018. The environmental Kuznets curve in the OECD: 1870 — 2014[J]. *Energy Economics*.
- [3] Ozokcu, S., Ozdemir, O., 2017. Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72: 639-647.
- [4] Olale, E., Ochuodho, T.O., Lantz, V., El Armali, J., 2018. The environmental Kuznets curve model for greenhouse gas emissions in Canada[J]. *Journal of Cleaner Production* 184:859-868.
- [5] Tollefson J. China's carbon emissions could peak sooner than forecast[J]. *Nature*, 2016, 531(7595): 425-426.
- [6] Elzen M, Fekete H, Höhne N, et al. Greenhouse gas emissions from current and enhanced policies of China until 2030: Can emission speak before 2030?[J]. *Energy Policy*, 2016, 89: 224-236.
- [7] Niu S, Liu Y, Ding Y, et al. China's energy systems transformation and emissions peak[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58:782-795.
- [8] British Petroleum, 2018b. *Energy Outlook 2018*.
<https://www.bp.com/content/dam/bpl/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/en-ergy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>.
- [9] Du, K.R., Xie, C.P., Ouyang, X.L., 2017. A comparison of carbon dioxide (CO₂) emission trends among provinces in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73:19-25.
- [10] Li, A., Zhang, A., Yao, X., Zhou, YX, 2017. Decomposition analysis of factors affecting carbon dioxide emissions across provinces in China[J]. *Journal of Cleaner Production* 141:1428-1444.
- [11] UNDP. Human development report 2007/2008- fighting climate change: human solidarity in a divided world [R] . New York: Pal -grave Macmillan, 2007.

- [12] NICHOLAS S. Key elements of a global deal on climate change [R] . The London School of Economics and Political Science (LSE) , 2008.
- [13] BENT S. Pathways to climate stabilization [J] . Energy Policy, 2008, (9) : 3505-3509.
- [14] AUFFHAMMER M , CARSON R T. Forecasting the path of China's CO₂ emissions using province-level information [J] . Journal of Environmental Economics and Management , 2008, (55) : 229-247.
- [15] OECD. Environmental outlook to 2030 [M] . Paris: OECD Publishing, 2008.
- [16] GUAN D , HUBACEK K , Weber C L , et al. The drivers of Chinese CO₂ emission from 1980 to 2030 [J] . Global Environmental Change, 2008, 18 (4) : 626-634.
- [17] 金书秦, 林煜, 牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型: 中国农业碳排放特征及其减排路径 [J] . 改革, 2021 (05) : 29-37.
- [18] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析 [J] . 中国工业经济, 2017 (03) : 44-63.
- [19] 李治国, 朱永梅, 高新伟. 系统耦合下制造业碳排放达峰路径研究——基于山东省的数据 [J] . 华东经济管理, 2019, 33 (09) : 22-31.
- [20] 李惠民, 张西, 张哲瑜, 王宇飞. 北京市碳排放达峰路径及政策启示 [J] . 环境保护, 2020, 48 (05) : 24-31.
- [21] 齐晔, 刘天乐, 宋祺佼, 王宇飞, 吕婧. 低碳城市试点“十四五”期间需助力碳排放达峰 [J] . 环境保护, 2020, 48 (05) : 9-11.
- [22] 曹颖, 李晓梅, 刘强, 徐华清, 赵旭晨. 推动部分区域碳排放率先达峰现状分析 [J] . 环境保护, 2019, 47 (08) : 27-30.
- [23] 方创琳. 新发展格局下的中国城市群与都市圈建设 [J] . 经济地理, 2021, 41 (04) : 1-7.
- [24] 刘甜, 王润, 孙冰洁. 中国典型沿海工业城市碳排放达峰分析 [J] . 中国人口·资源与环境, 2015, 25 (S2) : 25-28.
- [25] 魏丽莉, 任丽源. 碳排放权交易能否促进企业绿色技术创新——基于碳价格的视角 [J] . 兰州学刊, 2021, 15 (013) : 1-20.

- [26] 常纪文, 田丹宇. 应对气候变化法的立法探究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(02):16-19.
- [27] 冯爱青, 岳溪柳, 巢清尘, 王国复. 中国气候变化风险与碳达峰、碳中和目标下的绿色保险应对[J]. 环境保护, 2021, 49(08):20-24.
- [28] 安国俊. 碳中和目标下的绿色金融创新路径探讨[J]. 南方金融, 2021(02):3-12.
- [29] 王勇, 韩舒婉, 李嘉源, 李博. 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, 2019, 41(10):1824-1836.
- [30] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于RICE-LEAP模型[J]. 资源科学, 2021, 43(04):639-651.
- [31] 庄贵阳, 窦晓铭. 新发展格局下碳排放达峰的政策内涵与实现路径[J]. 新疆师范大学学报, 2021, (06):29-39.
- [32] 马丁, 陈文颖. 中国2030年碳排放峰值水平及达峰路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 26(S1):1-4.
- [33] 沈满洪, 何灵巧. 外部性的分类及外部性理论的演化[J]. 浙江大学学报(人文社会科学版), 2002(01):152-160.
- [34] 贺红兵. 我国碳排放影响因素分析[D]. 华中科技大学, 2012.
- [35] 马晓琨. 经济学研究主题与研究方法的演化——从古典经济增长理论到新经济增长理论[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2014, 44(04):51-57.
- [36] 程叶青, 王哲野, 张守志, 叶信岳, 姜会明. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10):1418-1431.
- [37] 师博, 沈坤荣. 政府干预、经济集聚与能源效率[J]. 管理世界, 2013, (10):6-18+187.
- [38] 范秋芳, 张园园. 碳排放权交易政策对碳生产率的影响研究[J]. 工业技术经济, 2021, 40(12):113-121.
- [39] 原嫒, 周洁. 中国省域尺度下产业结构多维度特征及演化对碳排放的影响[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12):3186-3202.
- [40] 彭佳雯, 黄贤金, 钟太洋, 赵云泰. 中国经济增长与能源碳排放的脱钩研究[J]. 资源科学, 2011, 33(04):626-633.

- [41] 齐绍洲, 林岫, 王班班. 中部六省经济增长方式对区域碳排放的影响——基于 Tapio 脱钩模型、面板数据的滞后期工具变量法的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(05): 59-66.
- [42] 张庆宇, 张雨龙, 潘斌斌. 改革开放 40 年中国经济增长与碳排放影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 9-13.
- [43] 田成诗, 郝艳, 李文静, 曲本亮. 中国人口年龄结构对碳排放的影响[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2309-2318.
- [44] 何文举, 张华峰, 陈雄超, 颜建军. 中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究——基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角[J]. 南开经济研究, 2019, (02): 207-225.
- [45] 马晓钰, 李强谊, 郭莹莹. 我国人口因素对二氧化碳排放的影响——基于 STIRPAT 模型的分析[J]. 人口与经济, 2013, (01): 44-51.
- [46] 彭希哲, 朱勤. 我国人口态势与消费模式对碳排放的影响分析[J]. 人口研究, 2010, 34(01): 48-58.
- [47] 李建豹, 黄贤金, 吴常艳, 周艳, 徐国良. 中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析[J]. 经济地理, 2015, 35(11): 21-28.
- [48] 燕华, 郭运功, 林逢春. 基于 STIRPAT 模型分析 CO₂ 控制下上海城市发展模式[J]. 地理学报, 2010, 65(8): 983-990.
- [49] 肖慧敏. 中国产业结构变动的碳排放效应研究——基于省级面板数据[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(05): 84-87+92.
- [50] 高宏伟, 程仕英. 外商直接投资与碳排放规模——基于山西省的实证研究[J]. 经济问题, 2017, (04): 113-115+119.
- [51] 田晴. 对稳态经济的思考[J]. 财政研究, 2012, (07): 16-19.
- [52] 张腾飞, 杨俊, 盛鹏飞. 城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(02): 47-57.
- [53] 王科, 陈沫. 中国碳交易市场回顾与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(02): 24-31.
- [54] 王勇, 赵晗. 中国碳交易市场启动对地区碳排放效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(01): 50-58.

后记

白驹如隙，时光荏苒，三年的硕士研究生生涯即将结束，在兰州财经大学攻读硕士研究生三年的时光，是我今生最难忘的经历之一。这三年的求学生活，无论在做人、做事还是做学问方面，我都获益良多。回首刚入学时，对三年的学习生活充满了期待，一切都恍如昨日刚刚发生，让人心里感慨万分。

首先，我十分感谢我的导师王娟娟老师，她从我入学开始便孜孜不倦地给予了我学业指导和生活关怀，使我养成了良好的科研习惯，引导我从一个单纯追求课程成绩的本科生转变为一个在经济领域有所探索的研究生。王老师严谨的治学态度、勤奋的钻研精神和对于专业领域的热爱对我产生了潜移默化的深远影响。王老师以身作则教导我们要养成每天阅读学术文献的习惯，也给我们营造了“谈笑有鸿儒，往来无白丁”的良好师门氛围，让我们能够安心沉浸于科研之中。在毕业论文撰写期间，从最开始文章的框架敲定到最后的细节把控，无不倾注了王老师的心血和汗水。

其次，我十分感谢学院的各位老师，在我求学期间给予了各方面的指导和帮助。在课堂上，他们传授给我大量学科基础知识和热爱科研的精神；在日常生活中，他们给予了我诸多关爱。我还想感谢任可、史碧林和宋雪倩等师门同学，他们在我硕士求学期间，用自身的努力追求和善意，让我认识到人生的丰富多彩。在我硕士论文写作期间，对于研究方案和技术细节也提出了不少建设性的意见，使我的毕业论文能够更加完善。

硕士阶段即将结束，但这又是一个新的开始。在未来的岁月中，我一定会倍加珍惜这三年养成的良好科研习惯，也会牢记“博修商道”的校训，在未来的学习和生活中，保持乐观，继续努力。