

## 摘要

### 基于 LEAP 模型的吉林省能源需求及碳排放研究

中国政府声明要在 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。在中国，90%的碳排放来自能源领域。对能源需求和能源领域碳排放量进行预测，可以为政府制定发展规划和减排政策提供借鉴。目前吉林省正处于经济发展转型期和能源需求及碳排放平台期，因此，科学准确的预测吉林省未来能源需求量、碳排放量和碳达峰时间，探讨各因素对碳排放量的影响具有重要意义。

本研究以吉林省能源需求和能源领域碳排放为核算范围，以 2019 年为基准年，结合吉林省能源消费及碳排放现状建立 LEAP 模型，预测了不同经济增速情景、不同产业结构情景、节能减排情景、综合情景下吉林省能源需求及碳排放量，确定了碳达峰时间，讨论了 GDP 增速、产业结构、节能减排政策等对能源需求和碳排放量的影响。研究表明，GDP 增速决定了能源消费及碳排放的总体趋势，优化产业结构可以有效降低能源强度和碳排放强度。吉林省 2030 年能源消费总量介于 0.7-1.1 亿 tce 之间。基础情景下，吉林省并无碳达峰趋势。节能减排情景下，吉林省将在 2025 年实现碳达峰，能源消费总量为 7790 万 tce，碳排放量为 16470 万吨。在最大碳排放政策情景下，吉林省将在 2029 年实现碳达峰。在此基础上，为进一步给吉林省碳减排提供参考，本研究计算了分行业、分能源品种碳减排潜力，通过单因素分析法设立 4 个子情景，对能源强度、化石燃料比例、电力供应体系等因素对碳排放影响情况进行定量分析。研究表明在保证社会经济发展的情况下，吉林省减排潜力主要来自电力部门、高耗能工业部门和交通部门。能源强度的下降和清洁能源在消费和发电供热端的普及所带来的煤炭使用量减少是实现碳减排的主要路径。因此，吉林省可以通过进一步优化电力供应体系、优化能源消费体系，发展新兴能源产业、推动煤炭减量替代、优化产业结构等措施实现经济快速发展下的碳减排，做到环境和经济协同发展。

**关键词：**碳排放量；能源需求；碳达峰预测；吉林省；LEAP 模型

# **Abstract**

## **Study on Energy Demand and Carbon Emissions in Jilin Province**

### **Based on the LEAP Model**

The Chinese government has declared its intention to reach peak carbon emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. In China, 90% of carbon emissions come from the energy sector. Forecasting energy demand and carbon emissions in the energy sector can provide a reference for government development planning and emissions reduction policies. Currently, Jilin Province is in a period of economic development transformation and a plateau of energy demand and carbon emissions. Therefore, it is of great significance to predict the future energy demand, carbon emissions, and peak carbon times scientifically and accurately in Jilin Province and to explore the impact of various factors on carbon emissions.

This study focuses on energy demand and carbon emissions in the energy sector of Jilin Province, using 2019 as the base year. It establishes a LEAP (Long Range Energy Alternatives Planning System) model based on the current energy consumption and carbon emissions in Jilin Province. It forecasts energy demand and carbon emissions in Jilin Province under different economic growth scenarios, different industrial structure scenarios, energy conservation and emissions reduction scenarios, and comprehensive scenarios. It determines the peak carbon time and discusses the impact of GDP growth, industrial structure, and energy conservation and emission reduction policies on energy demand and carbon emissions.

Research results show that GDP growth determines the overall trend of energy consumption and carbon emissions, and optimizing the industrial structure can effectively reduce energy intensity and carbon emission intensity. Total energy consumption ranges between 70-110 million tce. Under the baseline scenario, Jilin Province does not show a peak carbon trend. Under the energy conservation and emissions reduction scenario, Jilin Province will achieve peak carbon in 2025, with a total energy consumption of 77.9 million tce and carbon emissions of 164.7 million

tons. Under the maximum carbon emissions policy scenario, Jilin Province will achieve peak carbon in 2029.

To provide further reference for the carbon emissions reduction path in Jilin Province, this study calculates the potential for carbon reduction by industry and energy type. It establishes four sub-scenarios through a single-factor analysis method, conducting a quantitative analysis of the impact of factors such as energy intensity, the proportion of fossil fuels, and the electricity supply system on carbon emissions. Research results show that, while ensuring social and economic development, Jilin Province's emissions reduction potential mainly comes from the power sector, high-energy-consuming industrial sectors, and the transportation sector. The reduction in energy intensity and the widespread use of clean energy in energy consumption and power supply and heating, leading to a decrease in coal consumption, are the main pathways to achieving carbon emissions reduction. Therefore, Jilin Province can achieve carbon emissions reduction under economic development by further optimizing the power supply system, optimizing the energy consumption system, developing emerging energy industries, promoting the reduction and substitution of coal, and optimizing the industrial structure, achieving coordinated development of the environment and economy.

**Keywords:** carbon emissions; energy demand; peak carbon prediction; Jilin Province; LEAP model

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别：  硕士  博士

学科专业： 环境工程

论文题目： 基于 LEAP 模型的吉林省能源需求及碳排放研究

作者签名： 程谢

指导教师签名： 冯成

2023 年 6 月 1 日

# 目录

摘要.....	I
Abstract .....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.3 研究内容 .....	6
1.4 技术路线 .....	6
第 2 章 理论基础和模型方法.....	8
2.1 理论基础 .....	8
2.1.1 低碳经济理论 .....	8
2.1.2 碳达峰、碳中和理论 .....	8
2.2 模型方法 .....	9
2.2.1 LEAP 模型 .....	9
2.2.2 计算方法 .....	10
2.2.3 情景分析法 .....	11
第 3 章 吉林省能源消费及碳排放现状.....	14
3.1 吉林省整体情况 .....	14
3.1.1 地理、人口 .....	14
3.1.2 经济发展水平和结构 .....	15
3.2 吉林省能源消费情况 .....	17
3.2.1 能源消费总量 .....	17

3.2.2 各行业能源消费 .....	17
3.2.3 单位 GDP 能源强度 .....	20
3.3 吉林省碳排放现状 .....	20
3.4 本章小结 .....	22
第 4 章 吉林省能源需求及碳达峰时间预测 .....	23
4.1 LEAP 模型结构 .....	23
4.2 数据来源 .....	24
4.3 基年参数设置 .....	24
4.3.1 基年人口情况 .....	24
4.3.2 基年经济和能源情况 .....	24
4.3.3 基年能源结构 .....	25
4.3.4 能源加工转换情况 .....	25
4.4 情景设置 .....	26
3.4.1 基础情景 (BS) .....	26
3.4.2 不同经济增速情景 (HGDP、LGDP) .....	27
3.4.3 不同产业结构情景 (HIS、LIS) .....	27
3.4.4 节能减排情景 (ECS) .....	27
3.4.5 综合情景 (ELM, ESM) .....	27
4.5 结果分析 .....	29
4.5.1 经济发展对能源需求及碳排放量的影响 .....	29
4.5.2 产业结构对能源需求及碳排放量的影响 .....	30
4.5.3 节能减排情景 .....	31

4.5.4 综合情景 .....	32
4.6 本章小结 .....	33
第 5 章 吉林省能源领域碳减排路径研究 .....	35
5.1 碳减排潜力分析 .....	35
5.1.1 分部门减排潜力 .....	35
5.1.2 分能源品种减排潜力 .....	36
5.2 碳排放驱动因素分析 .....	37
5.2.1 能源强度 .....	39
5.2.2 低化石能源消费 .....	39
5.2.3 高新能源产业 .....	39
5.3 吉林省碳减排路径 .....	40
5.3.1 优化电力供应体系 .....	40
5.3.2 优化能源消费体系 .....	40
5.3.3 完善碳排放监管体系，制定节能减排奖惩机制 .....	41
5.3.4 推动碳排放交易市场建立 .....	41
5.3.5 加快能源科技创新 .....	41
5.3.6 推动能源系统智能化改革 .....	42
5.3.7 打造新能源产业链，促进能源转型升级 .....	42
5.3.8 调整产业结构，发展新兴产业 .....	42
5.3.9 推进清洁供暖 .....	42
5.3.10 积极宣传，坚持正确碳减排路径 .....	42
5.4 本章小结 .....	43

第 6 章 结论与展望.....	44
6.1 主要结论 .....	44
6.2 不足与展望 .....	45
参考文献.....	46
致谢.....	52

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

IPCC 第六次评估报告中呼吁为了保护地球生命和人类幸福，人类需要及时采取有效措施，将气候变暖带来的不良后果降到最低<sup>[1]</sup>。根据世界气象组织（WMO）的报告，自 1994 年以来，大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度已从 357ppm 增加到 2017 年的 405ppm。全球气温一直处于上升的趋势。据统计，到 2018 年全球气温较工业化之前以上升 1℃ 之多。由此带来的诸如海平面上升、冰川和冰盖融化的速度明显加快，台风、洪水、干旱、寒潮和暴风雪等极端天气发生频率年年升高，给人类社会带来了巨大的财产和生命安全风险。

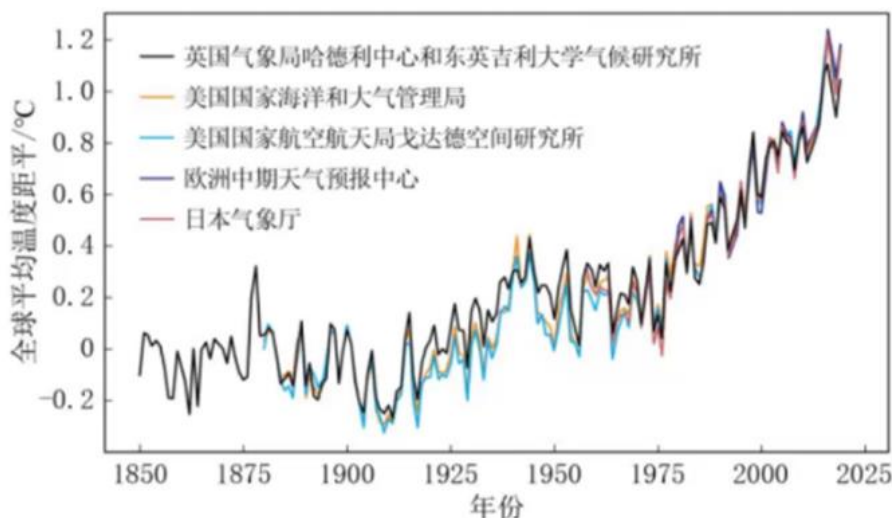


图 1.1 1850 年以来全球平均气温波动<sup>[2]</sup>

为应对气候变化，国际社会已采取了许多行动和措施。以下是其中一些主要的工作：《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）：这是一个国际环境条约，旨在稳定温室气体浓度，减缓全球气候变化。自 1994 年生效以来，各国根据自身能力采取行动，减少温室气体排放。《京都议定书》：1997 年签署的京都议定书是 UNFCCC 的一部分，要求工业化国家在 2008-2012 年间减少温室气体排放。虽然京都议定书已过期，但它为全球减排行动奠定了基础。《巴黎协定》：2015 年达成的《巴黎协定》是全球应对气候变化的最重要协议。各国自愿承诺减少温室气体排放，并设置了 2℃ 和 1.5℃ 两个层次的目标。同时，该协议还强调了适应气候变化和提供资金支持的重要性。

中国作为最大的发展中国家，面临着环境与发展的双重考验，早在上个世纪90年代，我国政府就开始提出可持续发展这一理念，在十八大上生态文明被指定为国家治理战略，十九大二十大上美丽中国战略成为五位一体发展理念之一，两山理论深入人心。中国政府一直积极倡导生态文明，作世界上绿色发展的先驱者和推动者。2021年国务院印发2030年前碳达峰行动方案的通知，标志着我国碳达峰行动如火如荼的展开，各省、市、自治区纷纷响应，推出行动方案，按计划实现碳达峰任务。

吉林省工业起步较早，时至今日工业结构日渐落后，产业类型转型困难。经济增长出现平台期，能源消费量和碳排放量正处于谷期。但随着近年来新能源产业发展和国家政策的倾斜，吉林省发展势必迎来一波窗口期，碳排放量极有可能迎来反弹。那么，制定怎样的发展策略和碳减排路径，才能在保证GDP高速发展的情况下仍旧实现2030年前碳达峰目标成为亟需解决的问题。本研究从现实指导意义出发，对吉林省2020-2030年能源需求及碳排放量进行了预测，为政府和社会各界提供借鉴。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 能源消费及碳排放研究现状

碳排放是导致全球气候变化的主要原因，减少碳排放和对能源消费结构进行优化有利于实现可持续发展，降低对环境的破坏<sup>[3]</sup>。清华大学针对中国长期低碳发展和转型路径构建了内容框架如图1.2所示，从社会经济发展、能源系统CO<sub>2</sub>排放、政策支撑等方面对中国碳排放的实际国情进行了深入分析，研究了长期碳排放的趋势、政策和路径<sup>[4]</sup>。了解城市化与碳排放的关系及影响机制有助于制定气候政策，为城市化发展如何实现低排放提供启示。Tan等人<sup>[5]</sup>收集了2003-2015年中国省级面板数据集，采用"Threshold-STIRPAT"模型，研究不同情景下城市化对碳排放的影响，最终发现居民消费水平提高和技术进步发挥了主要作用。住宅能源使用约占美国温室气体（GHG）排放量的20%。Goldstein等人<sup>[6]</sup>利用9300万个家庭的数据，估计了整个美国的温室气体排放量，并阐明了气候、富裕程度、能源基础设施、城市形态和建筑属性在推动温室气体排放方面各自的影响。Luo等人<sup>[7]</sup>动态考察了中国、印度和新加坡1980-2020年外国直接投资和其他变量对经济增长和碳排放的影响，并检验了PHH假说和KEC假说的有效性。Saidi等

人<sup>[8]</sup>以 15 个主要可再生能源消费国为例，利用完全修正的普通最小平方法（FMOLS）和向量误差修正模型（VECM）两种预测方法，证明可再生能源在促进经济增长和减少碳排放方面的有效性。Meng 等人<sup>[9]</sup>采用对数平均除法（LMDI）方法研究中国碳排放的驱动因素。选取能源强度、研发效率、能源结构和省域结构等 7 个经济因素，从行业角度构建中国碳排放影响因素分解模型。定量分析了各种经济因素对碳排放的影响。Jia 等人<sup>[10]</sup>根据中国 30 个省份 1979-2016 年的准确数据和 2017-2030 年的预测数据，采用“a non-parametric and additive regression model”来探索清洁能源发展对减少 CO<sub>2</sub> 排放和经济增长的线性和非线性影响。Sun 等人<sup>[11]</sup>基于 2001-2018 年中国经济发展和矿业碳排放的数据，利用 LMDI 分解模型，探讨了中国矿业碳排放与经济发展之间的脱钩关系。唐祎祺<sup>[12]</sup>对中国 30 个省区碳排放的经济社会驱动因素进行了探究，得出中国在 2031 年实现碳达峰的概率最大。张弛<sup>[13]</sup>探究了能源消费与碳排放之间的变动特征和相关关系。

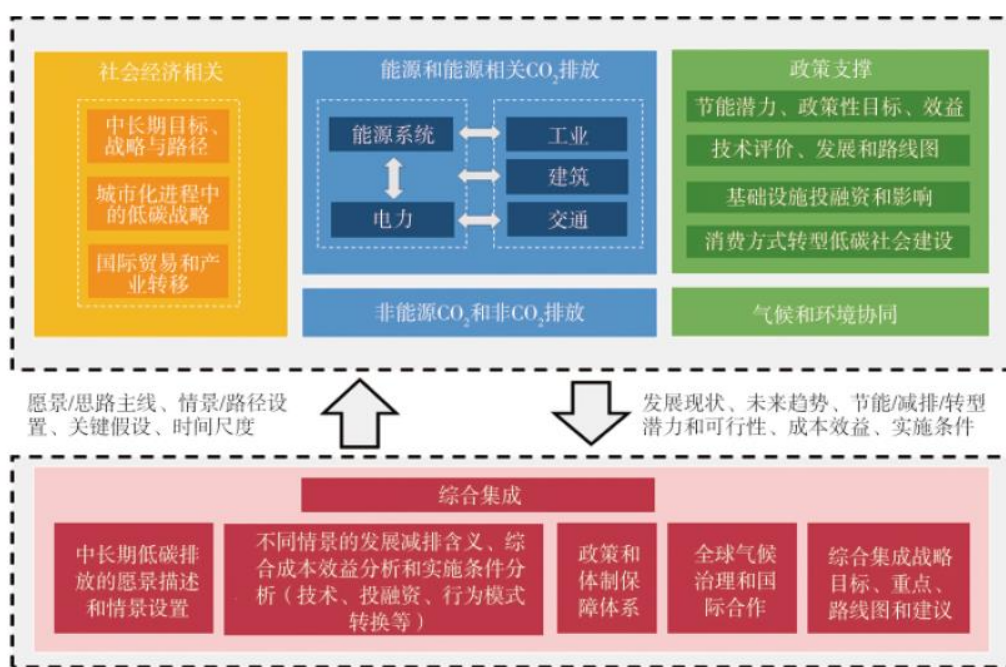


图 1.2 低碳发展战略及转型路径结构框架

近年来，有大量关于吉林省温室气体核算<sup>[14]</sup>、碳排放峰值预测<sup>[15]</sup>、能源产业对经济增长的影响<sup>[16]</sup>、能源结构优化<sup>[17]</sup>、能源供需预测<sup>[18]</sup>等方面的研究。但在吉林省碳达峰行动方案发布之后，对整个吉林省能源领域的能源需求和碳排放进行预测的研究未见报到。

### 1.2.2 能源环境模型研究现状

能源环境模型是一种可以用来分析城市能源规模、消费结构、发展趋势及对环境影响的数学工具<sup>[19]</sup>。能源环境模型可以根据不同的驱动因素如人口、经济、社会、技术等,预测未来不同情景下的能源消费和供应,并计算相应的碳排放量,从而评估不同的节能减排政策效果。它们可以根据建模方法分为自顶向下模型、自底向上模型和混合能源模型<sup>[20]</sup>。

### (1) 自顶向下模型

自顶向下模型是从宏观的角度出发,基于经济理论和数学方法,构建能源系统与经济系统之间的关系。这种模型可以反映能源政策对经济增长、就业、收入分配等方面的影响,但是对能源技术和环境因素的描述比较粗糙。这种模型是最早出现的一类能源经济环境模型,主要包括宏观计量模型、系统动力学模型、STIRPAT模型、一般均衡(CGE)模型等,这些模型在国际上有广泛的应用。Chen等人利用能源-环境-经济综合模型,分析了中国到2050年的能源发展和碳排放情况<sup>[21]</sup>。Holland等人使用国家研究所全球经济计量模型(NiGEM)的修改版评估了碳税对全球经济的宏观经济影响,特别关注对化石燃料进口国和出口国的贸易条件影响<sup>[22]</sup>。Wang等人<sup>[23]</sup>对人口、富裕程度和技术影响(STIRPAT)模型进行了改进,将碳排放的影响因素纳入模型进行建模分析,有效评估了上海电力行业未来的碳排放情况。Yu等人<sup>[24]</sup>利用STIRPAT模型对比分析了家庭CO<sub>2</sub>排放最重要的驱动因素,研究发现,最主要的驱动因素是户均人数、总人口、失业和城市化率。并且,受到家庭规模的正向影响,而受到失业率的负向影响。Jiang等人<sup>[25]</sup>利用CGE模型测算了COVID-19对中国主要宏观经济指标和二氧化碳排放的影响,模拟了三种财政政策、三种货币政策以及它们的组合对经济的缓解作用,寻找同时满足低碳经济和碳达峰双重目标下的政策。Suvajit Banerjee<sup>[26]</sup>利用CGE模型研究了在基于地域性消费的替代框架下对发展中国家的出口实施边境碳调整的影响。

### (2) 自底向上模型

自底向上模型是从微观的角度出发,基于能源技术和工程数据,构建能源系统内部的结构和运行过程。这种模型可以反映不同能源技术之间的竞争和替代,以及不同环境措施对能源系统的影响。自底向上模型是从20世纪70年代开始发展起来的一类能源经济环境模型,这些模型在国际上也有很多应用。比较典型的

有 MARKAL 模型和 LEAP 模型。

Chen 等人<sup>[27]</sup>构建三种 MARKAL (MARKet ALlocation) 族模型, 研究了中  
国能源系统的碳减排策略及其对经济的相应影响。评估了 MARKAL 和  
MARKAL-ED 的碳减排对社会福利的影响, 以及 MARKAL-MACRO 对 GDP、  
投资和消费的影响。分析了最终和一次能源结构的变化、技术发展的变化以及三  
种模型中给定碳约束的边际减排成本。Marcin Jaskólski<sup>[28]</sup>利用市场分配  
(MARKAL) 模型框架, 以找到成本最低的技术组合, 并符合欧盟关于可再生能  
源电力标准和减排目标的能源政策为导向, 计算出了波兰到 2050 年的最佳电力  
技术结构。Sinéad M<sup>[29]</sup>等人使用 MARKAL-EFOM 系统模型分析 2050 年爱尔兰  
温室气体减排方面的成果。Peter 等人<sup>[30]</sup>通过使用 MARKet ALlocation 模型对美国  
不同情景下对各种电力供应成本、碳减排成本进行预测。Yao 等人<sup>[31]</sup>为了研究  
区域电力供应结构的演变规律, 收集了各省资源禀赋和技术方面的差异数据, 并  
将其导入中国区域电力部门的综合 MARKAL-EFOM 系统 (TIMES) 模型中, 计  
算了各碳排放约束下的最佳区域供电结构。Shi 等人<sup>[32]</sup>利用 MARKAL-EFOM 系  
统 (TIMES) 模型模拟中国建筑行业未来的能源消耗和碳排放, 分析了技术进步  
和可再生能源在建筑领域使用的影响。同时也对建筑行业的节能减排潜力进行了  
测算。

LEAP 模型具有结构灵活、数据需求量小且能够反应技术进步、能源效率等  
优点, 从而被广泛运用于工业部门<sup>[33-35]</sup>、建筑部门<sup>[36-38]</sup>、交通部门<sup>[39-41]</sup>等领域能  
源消费和碳排放的相关研究。例如, 刘方舟<sup>[42]</sup>利用 LEAP 模型和弹性系数法的得  
到一致的规律, 预测了某市的碳达峰时间, 发现工业部门是碳减排潜力最大的部  
门。常征<sup>[43]</sup>利用 LEAP 模型构建了全新的碳脉模型, 便于对碳迁移路径全程进行  
模拟分析, 直观反应生产中 CO<sub>2</sub> 的生成机理。Chen 等人<sup>[44]</sup>运用 LEAP 模型预测  
了长沙市 2020-2025 年的能源需求, 通过不同情景的对比发现第三产业的相对节  
能率最高。刘继秀<sup>[45]</sup>则对吉林省直到 2050 年的能源与碳排放发展路径进行了预  
测, 发现吉林省在 2030 年实现碳达峰是最优选择, 碳排放强度较 2005 年下降  
65%。解品磊<sup>[46]</sup>对吉林省工业领域碳排放进行了深入研究, 发现工业总产值对碳  
达峰时间及总量影响最大, 各类能源占比影响较小。栾天阳<sup>[47]</sup>与后春辉<sup>[48]</sup>则对耗  
能占比较大的钢铁行业进行了碳排放分析, 并对其碳减排路径进行了研究。新能

源汽车的火热给碳减排带来了新的机会，依托吉林省汽车产业，秦宝洋<sup>[49]</sup>对吉林省交通部门进行了碳排放分析，结果表明在新能源汽车的普及下吉林省在 2028 年交通领域实现碳达峰。

### (3) 混合能源模型

混合能源模型是在自顶向下模型和自底向上模型之间进行有效的耦合，综合考虑经济、技术和环境等多方面因素，使得模型既有宏观经济分析的优势，又有微观技术分析的优势。这种模型是未来发展的趋势。混合能源模型可以分为硬连接和软连接两种方式，前者是将两种类型的模型在数学上进行整合，后者是将两种类型的模型在逻辑上进行协调。在混合能源模型中以国家能源模型(NEMS)最为常见<sup>[43]</sup>。

吉林省以实现 2030 碳达峰为导向，出台了新能源领域、煤炭控制领域的多份综合分析报告，从技术领域和微观领域对吉林省能源需求和碳排放量做出了规划，如大力推动氢能源发展、普及新能源汽车等。根据上述对三类模型的对比分析，LEAP 模型可以较好的量化吉林省在规划中提到的节能减排措施，得出科学的预测结果，故本研究采用 LEAP 模型开展后续工作。

## 1.3 研究内容

本研究旨在预测吉林省 2020-2030 年的能源消费量，并分析不同发展状态下的碳达峰时间。主要研究内容有：

(1) 通过对比分析，确定一种能源模型。在分析整理吉林省往年能源数据的基础上，构建该模型；

(2) 结合政府近年出台的规划、报告、方案等，设置多种预测情景，对相应的参数进行赋值；

(3) 得出预测结果并进行分析，包括：能源需求量、达峰时间、二氧化碳排放峰值及构成、达峰场景下分品类能源消费结构、分行业能源消费结构等；

(4) 运用单因素分析法，计算减排潜力并提出行之有效的碳减排、碳达峰路径。

## 1.4 技术路线

本研究技术路线如图 1.3 所示。本研究分成准备阶段、建模阶段、结果分析

三个阶段。准备阶段主要工作为阅读大量能源预测相关的文献，结合吉林省社会及能源发展现状，选择一种适合的能源预测模型，确定核算边界，讨论验证建模可行性。接着进行第二阶段，通过参阅其他能源模型及 LEAP 模型相关情景设置、参数设置，确定 LEAP 模型基期，构建 LEAP 模型。设置 5 大类 8 小类情景，对吉林省采取的节能减排措施进行量化，并设置合适的参数。得出结果之后进行第三阶段，首先是对比分析不同情景下的能源需求量和碳排放量，预测碳达峰时间；接着使用单因素法进行碳减排潜力分析和碳减排驱动因素分析，研究各因素对碳排放量的影响力度。最后，根据分析结果提出吉林省碳减排路径，为政府及社会各界的工作提供借鉴。

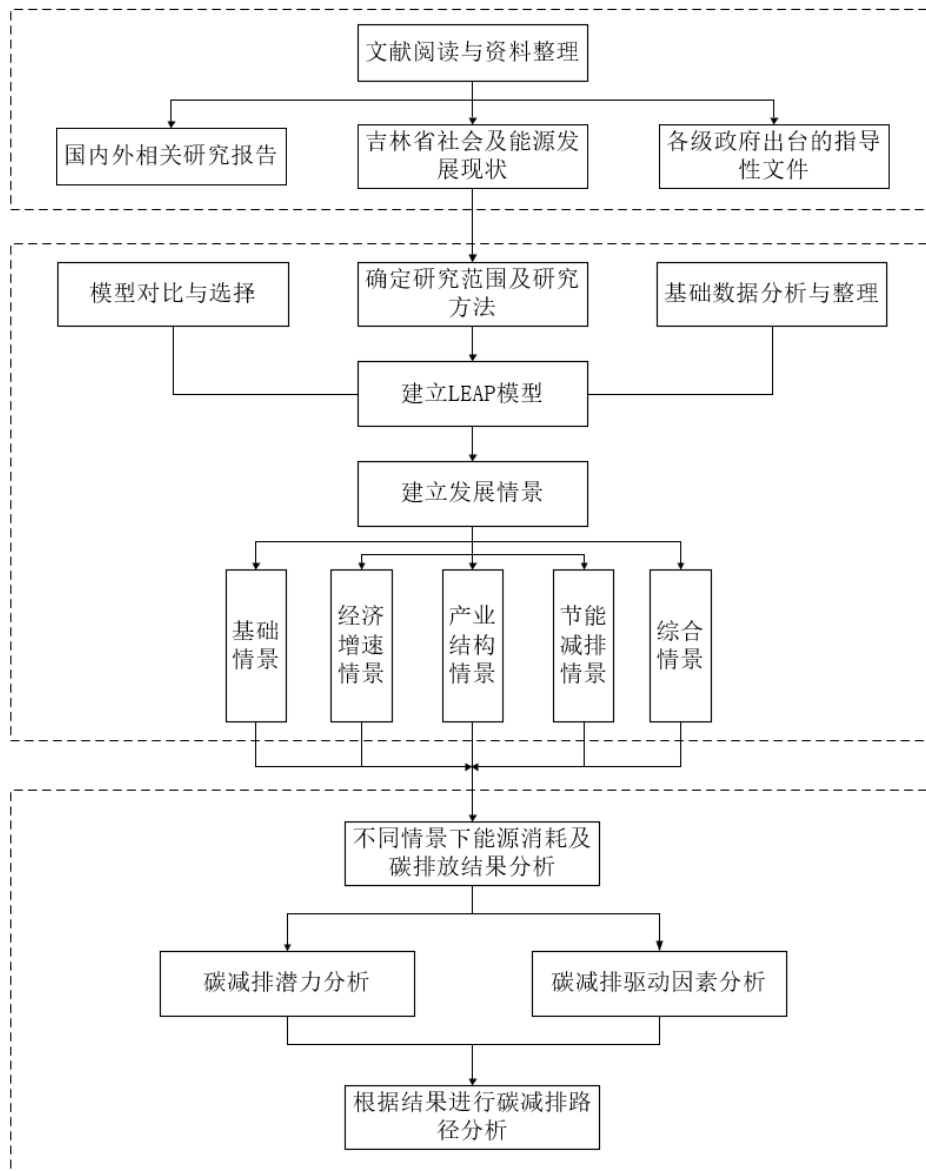


图 1.3 本研究技术路线图

## 第 2 章 理论基础和模型方法

能源需求和碳排放研究是建立在低碳经济理论上，并要以实现碳达峰、碳中和为目标。具体体现在实现碳达峰、碳中和不能牺牲经济发展，要实现经济高质量发展下的科学碳排放管理。运用 LEAP 模型和情景分析法可以结合吉林省的实际情况对吉林省的能源需求和碳排放进行科学的预测和分析。

### 2.1 理论基础

#### 2.1.1 低碳经济理论

低碳经济理论应运而生于全球气候变化日趋严重的大背景下，它倡导在经济增长与环境保护之间寻求平衡，通过推动可持续发展和提高能源使用效率，达成一种兼顾经济发展和社会进步的经济模式<sup>[50]</sup>。低碳经济理论认为，减少碳排放可以促进经济增长，推动创新和产业升级，同时也可以改善环境质量和人民生活水平。

低碳经济理论的核心思想是要将经济发展与环境保护相结合。在环境保护方面，可以通过改变能源结构、提高能源利用效率、推进清洁技术创新等方式来实现温室气体排放量的减少<sup>[51]</sup>。例如，使用清洁能源替代化石燃料，政府制定能源效率标准、实施节能政策，企业使用清洁生产技术等提高能源利用效率。与此同时，低碳经济不仅要减少温室气体排放，还要推动经济可持续增长。例如投资可再生能源、绿色基础设施和绿色农业等。

低碳经济在中国已被广泛应用于解决环境与发展之间的题，自 2007-2021 年共有 5000 篇以上的文章对低碳经济的实现和发展进行了研究讨论<sup>[52]</sup>。自提出 2030 碳达峰目标以来，低碳经济更是成为实现“双碳”目标炙手可热的途径之一。如何在短时间内寻求经济发展和环境保护的平衡，成为实现目标的重中之重，这需要整个社会达成共识并付诸努力。总的来说，虽然仍有许多挑战需要克服，但低碳经济为可持续高质量发展和建设绿色美丽中国提供了新的道路。

#### 2.1.2 碳达峰、碳中和理论

碳达峰是指在一定时期内，一个国家或地区温室气体排放总量达到历史最高点，然后逐年减少。实现碳达峰的关键是采取有效措施减少温室气体排放，包括提高能源效率、发展清洁能源、推广低碳技术等。碳达峰是实现碳中和的第一步，

只有先达到碳排放峰值，才能进一步实现碳中和。碳中和是指通过减少温室气体排放和增加碳汇(如植树造林、恢复草原等)来实现碳排放与碳吸收之间的平衡，使大气中的碳排放量和碳吸收量达到相互抵消的状态。碳中和意味着实现零净排放，是阻止全球气候变暖的终极目标。

我国在第七十五届联合国大会上首次提出 2030 年前碳达峰，2060 年前碳中和目标，在《全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作意见》中明确指出要把碳达峰碳中和融入社会发展全过程<sup>[53]</sup>。在当下的资源禀赋下，碳排放权即为发展权。盲目的减少碳排放，一是会影响产业发展速度，二是减排本身就需要强大的经济支撑。所以我国要稳步实现双碳目标，必须要加强政策储备、强化决策支撑。首先要明确能源领域是重中之重，以煤为主的能源结构短时间内不会变。要想在短时间内完成双碳目标，可以通过存量替代尤其是新能源替代推动煤炭清洁高效利用，通过大力发展“风光火储氢”源网荷储一体化配电网支持新能源平稳健康发展。除了节能减排之外，还需大力发展碳交易。通过碳交易来满足发展过程中必要的碳排放；最后要防止碳中和政治运动化，减碳要从发展的角度出发，要发挥市场的主导作用，通过碳定价、碳税等手段调节碳排放量，做好低碳经济，避免出现煤炭“一吨难求”的局面。

吉林省由于经济增速放缓，碳排放量已经处于平台期。但这并不意味着吉林省已经碳达峰，这与前文所述的低碳经济以及新发展理念下的碳达峰目标相冲突。从吉林省十四五规划来看，吉林省应抓住新能源汽车和新能源发电的风口，利用自身产业优势，实现经济发展和节能减排的双突破。

## 2.2 模型方法

### 2.2.1 LEAP 模型

Long Range Energy Alternatives Planning System (LEAP) 是一个广泛应用的能源政策和环境规划软件工具<sup>[54]</sup>。它是由 Stockholm Environment Institute (SEI) 开发的，主要用于评估长期能源需求、供应及其环境影响。LEAP 模型涵盖了能源需求预测<sup>[55]</sup>、资源分析<sup>[56]</sup>、市场竞争和环境影响分析<sup>[57]</sup>等方面。LEAP 模型采用分层结构来表示能源系统，包括技术、燃料、部门和子部门等层次。通过输入关键假设，如经济增长、人口增长、能源价格和政策目标，来评估未来能源需求的发展趋势。LEAP 模型中拥有环境数据库，可以分析计算能源系统的环境影响，

如温室气体排放和其他大气污染物排放。本研究主要使用 LEAP 模型中能源需求和转换模块，建立吉林省能源需求模型，计算并分析能源需求量及碳达峰时间。

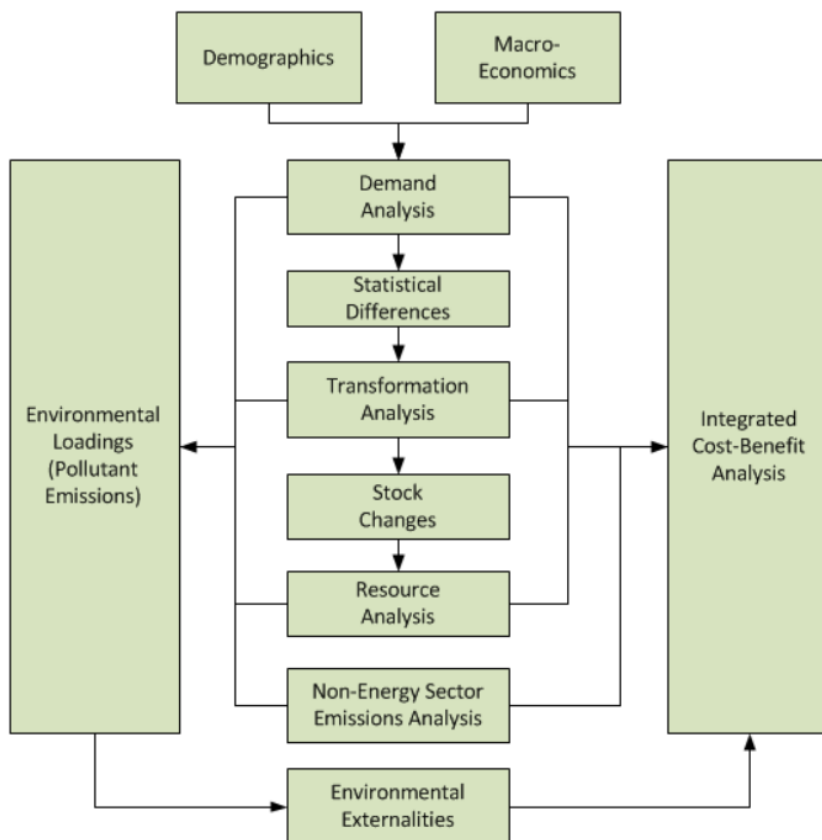


图 2.1 LEAP 模型结构示意图

### 2.2.2 计算方法

能源需求总量由终端能源需求、能源加工转换两部分组成。终端能源需求由各部门活动水平与能源强度相乘得到，能源加工转换由输入燃料量及转换效率相乘得到，电力部门由 LEAP 模型根据电力负载曲线以及发电装机量模拟得到。计算公式如下：

$$E_t = E_c + E_d \dots \dots \dots (2.1)$$

$$E_d = \sum_i (AL_i \times EI_i) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$E_c = \sum_i (AF_i \times CE_i) \dots \dots \dots (2.3)$$

其中：E<sub>t</sub>——能源需求总量；

E<sub>d</sub>——终端能源需求；

i——部门类型；

$AL_i$ ——部门活动水平;

$EI_i$ ——该部门能源强度;

$E_c$ ——能源转换需求;

$AF_i$ ——输入燃料量;

$CE_i$ ——转换效率;

本研究计算的碳排放量为吉林省能源领域的碳排放量,不包括工业生产、农林畜牧等领域。能源活动在区域碳排放量中占比超过 90%,故以能源领域为排放边界能够基本准确反应该地区的碳排放现状及发展情况。本研究碳排放量计算方法采用《省级温室气体清单编制指南》中能源活动的部门方法,能源活动排放计算公式如下:

$$E_g = E_c + E_p \dots \dots \dots (2.4)$$

$$E_c = \sum_i (AC_j \times Coe_j \times Cof_j \times EF_j \times \frac{44}{12} \times 10^{-3}) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$E_p = (\text{调入电量} - \text{调出电量}) \times \text{地区内电网供电的平均排放因子} \dots (2.6)$$

其中:  $E_g$ ——能源活动排放的 $CO_2$ 总量,  $10^4t$ ;

$E_p$ ——电力调入调出产生的 $CO_2$ 排放量,  $10^4t$ 。

$E_c$ ——化石燃料燃烧排放的 $CO_2$ 量,  $10^4t$ ;

$j$ ——燃料类型

$AC_j$ ——燃料 $j$ 的消费量,  $10^4t$ ;

$Coe_j$ —— $j$ 种燃料碳排放系数,  $tC/TJ$ ;

$Cof_j$ ——燃料 $j$ 净产热 $GJ/t, GJ/m^3$

$EF_j$ ——燃料 $j$ 的碳氧化率;

### 2.2.3 情景分析法

情景分析法 (Scenario Planning) 是一种在不确定的未来环境中制定策略的方法。它通过创建多个可能的未来情景,帮助我们了解可能的发展趋势和挑战<sup>[58]</sup>。在能源模型中,情景分析法被广泛应用于评估能源政策<sup>[59]</sup>、技术发展<sup>[60]</sup>、环境约束<sup>[61]</sup>、市场趋势<sup>[62]</sup>等因素对未来能源需求、供应和结构的影响<sup>[63]</sup>。这种方法有助于政策制定者、企业和研究人员在面对不确定性时,制定更有远见和可持续的能

源发展战略。以下是情景分析法在能源模型中的几种典型应用：

**能源政策分析：**政策制定者可以通过构建不同的政策情景来评估和比较各种能源政策对能源系统的影响。例如，可以设定碳排放限制、可再生能源目标或者能源效率提升目标等不同情景，然后评估各情景下的投资需求、能源供需平衡、环境影响等指标。

**技术创新与推广：**情景分析法可以用于评估新能源技术在未来市场中的潜在竞争力和推广前景。通过构建包含不同技术成本、市场渗透率和政策支持等因素的情景，可以分析新技术对现有能源结构的改变和对能源系统的影响。

**能源安全与可靠性：**情景分析法可以用于评估能源供应的可靠性。例如，可以设定资源价格波动、地缘政治风险、极端天气事件等不确定因素，然后分析这些因素对能源供应安全和系统稳定性的影响。

**能源需求预测：**情景分析法可以用于研究不同经济发展、人口变化和生活方式变化等因素对未来能源需求的影响。通过比较不同情景下的能源需求变化趋势，可以为能源规划和政策制定提供依据。

情景分析法在能源模型中的应用主要包括以下几个步骤：

**确定目标和范围：**首先明确分析的目标，本文研究吉林省能源消耗量和碳排放量，预测 2020-2030 年期间的发展趋势，得出碳达峰时间。

**收集数据和信息：**收集与分析目标相关的历史数据、政策文件、研究报告等资料，以便了解现有能源市场的状况和未来发展的可能趋势。

**确定关键驱动因素：**从收集的数据和信息中，识别对未来能源市场发展有重要影响的关键驱动因素，例如经济增长、人口变化、技术进步、政策环境等。

**构建情景：**基于关键驱动因素，构建多个可能的未来情景。每个情景代表了一种可能的未来发展路径，涵盖了不同的经济增长速度、能源政策、技术创新和环境约束等因素。

**模型计算和分析：**采用 LEAP 模型对每个情景进行计算和分析，预测未来能源需求、供应、结构和排放等指标。同时，对比不同情景下的能源发展趋势，评估各种政策、技术和市场因素对能源市场的影响。

**结果展示和政策建议：**将计算结果绘成图表并加以分析，以便政策制定者、企业和研究人员更直观地了解未来能源及碳排放的发展趋势。同时，根据分析结

果，提出有针对性的政策建议，为能源发展战略的制定提供参考依据。

## 第3章 吉林省能源消费及碳排放现状

模型的构建需要数据的支撑。本章分析整理了吉林省近些年经济、产业构成、能源消费和碳排放的基本数据，为后文的模型构建和数据分析提供参考依据。

### 3.1 吉林省整体情况

#### 3.1.1 地理、人口

吉林省位于中国东北地区，拥有丰富的自然资源和发展潜力。地处东经 121° 11'30"至 131° 19'30"，北纬 40° 26'30"至 46° 41'30"之间。总面积 18.74 万平方公里。吉林省地势西高东低，中部为长白山、张广才山和长白山支脉组成的山地，南部为松辽平原，北部为松花江平原。吉林省属于大陆性季风气候，气候分布不均，南部气候温和，北部气候寒冷，冬季长，夏季短。吉林省近代以来以汽车制造业、石油化学工业、冶金业为支柱产业，是我国的老工业基地，同时航空航天工业装备制造业、医药制造业、光电子信息产业也是其产业的重要组成部分。吉林省平原辽阔，是我国重要的粮食生产基地，东北大米闻名全国。图 3.1 为吉林省 2005-2019 年人口情况，从图中我们可以看到 2005 年吉林省总人口数为 2716 万人，城镇化率为 52.52%；总人口数在 2010 年达峰为 2746.6 万人，城镇化率为 53.36%。在往后的 10 年中总人口数逐年缓慢下降但是城镇化率呈逐年显著上升，截止到 2019 年吉林省总人口数为 2447.52 万人，城镇化率为 61.63%。同时我们看到，近 15 年来吉林省城镇人口基本保持稳定，而乡村人口有较大幅度下降，这也解释了吉林省总人口数下降而城镇化率大幅上升的原因。

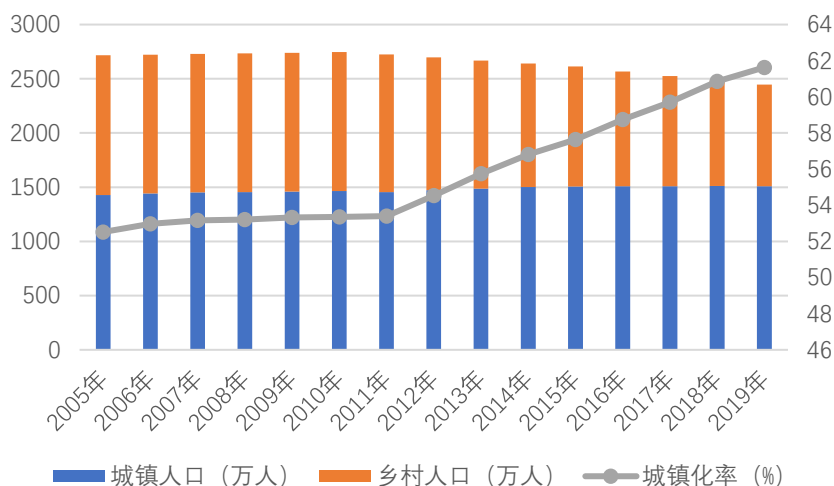


图 3.1 吉林省 2005-2019 年人口情况

### 3.1.2 经济发展水平和结构

吉林省在 2005-2011 年处于经济快速增长阶段，GDP 增长率常年保持在 15% 以上，GDP 从 2005 年的 2776.53 亿元上升到 2011 年的 7734.64 亿元，人均 GDP 从增长达到 10237 元上升到 28270 元，与 2005 年比较分别增长了 1.78 倍、1.76 倍。2011-2015 年，GDP 增长率一路下跌到 0.5%，2015 年吉林省 GDP 为 10018 亿元，人均 GDP 为 38128 元，与 2005 年相比较分别为增长了 2.61 倍、2.80 倍，增长速度明显放缓。2015-2019 期间，GDP 增长率逐步跌破 5%，2019 年，吉林省 GDP 为 11726.82 亿元，与 2005 年相比，增长了 3.22 倍，与 2013 年相比仅增长了 24%，经济发展进入瓶颈期，远低于全国 6.2% 的平均水平。这可能是由于 2013 年之后，移动互联网蓬勃发展，带来了巨大的经济发展动能，而吉林省的产业优势无法在这些领域发挥，导致在经济发展上逐渐掉队。近些年来，随着低碳经济的提出和双碳战略的实施，吉林省新能源资源丰富的优势逐渐凸显，依托传统强势的汽车行业大力发展新能源汽车，将会迎来经济发展的新高峰。

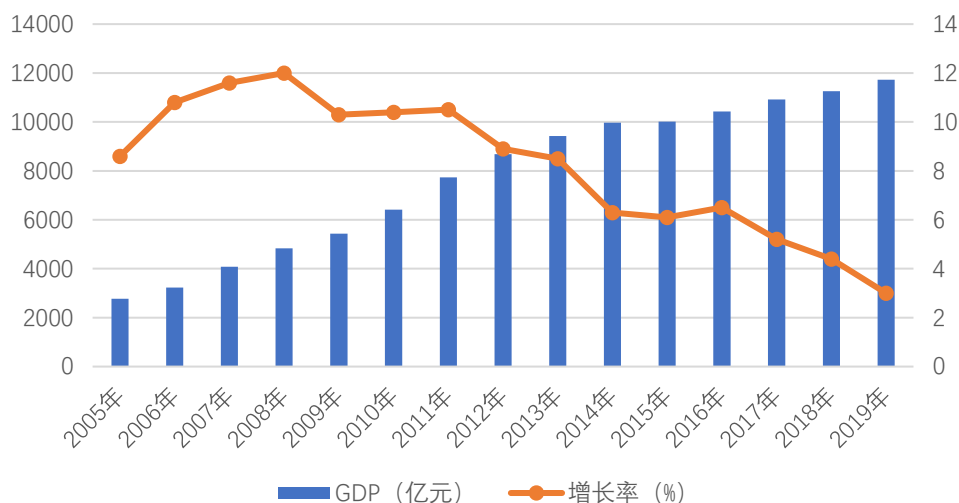


图 3.2 吉林省 2005-2019 年 GDP 总量及经济增长率

结合吉林省各产业构成情况来看，吉林省第一产业总体呈下降的趋势，第三产业总体呈上升的趋势，第二产业在 2010 年之前有较大幅度上升，2011-2015 年保持平稳，2015 年之后稳定下降。通过分析对比我们可以得出，第一产业占比从 20% 逐年下降到 10%，对吉林省的 GDP 贡献是比较薄弱的。2006-2011 年是吉林省经济快速增长的时期，同时期的第二产业的增长也较快，这说明吉林省的经济与第二产业严重挂钩，2011 年之后，一方面当时经济总体下行，市场体量减小导

致第二产业增长动力不足；另一方面，国家高质量发展政策开始实施，吉林省作为老工业基地，部分落后产能被替代，新兴产能规划布置需要时间，故导致了2011-2015年期间吉林省GDP增长率下跌。2015年之后，高质量发展转型初见成效，国务院也出台了相关措施解决东北地区面临的困境，吉林省产业结构开始升级。到2019年，吉林省第三产业占比达到53.8%，第二产业下降至35.3%。吉林省经济增长不再严重依赖第二产业，开始向第三产业转型发展。这点从能源强度上也可以看出，吉林省能源强度在2011年至2019年间有明显下降。2011年，吉林省能源强度为1.15吨标准煤/万元，其中第二产业最高（1.86吨标准煤/万元），第一产业最低（0.10吨标准煤/万元），第三产业居中（0.26吨标准煤/万元）。2015年，吉林省能源强度降至0.70吨标准煤/万元，第二产业仍然领先（1.24吨标准煤/万元），第一产业稍有上升（0.14吨标准煤/万元），第三产业略有下降（0.24吨标准煤/万元）。2019年，吉林省能源强度进一步下降到0.61吨标准煤/万元，第二产业继续下降（0.88吨标准煤/万元），第一产业和第三产业也有所降低（分别为0.12和0.19吨标准煤/万元）。从上述数据可以看出，第二产业是吉林省主要耗能产业，其能耗远远高于第一产业和第三产业。随着高质量发展政策的落实，吉林省经济结构和能源结构正逐步向优化方向发展，第二产业能源强度的大幅下降，十分利好吉林省的碳达峰碳中和进程。

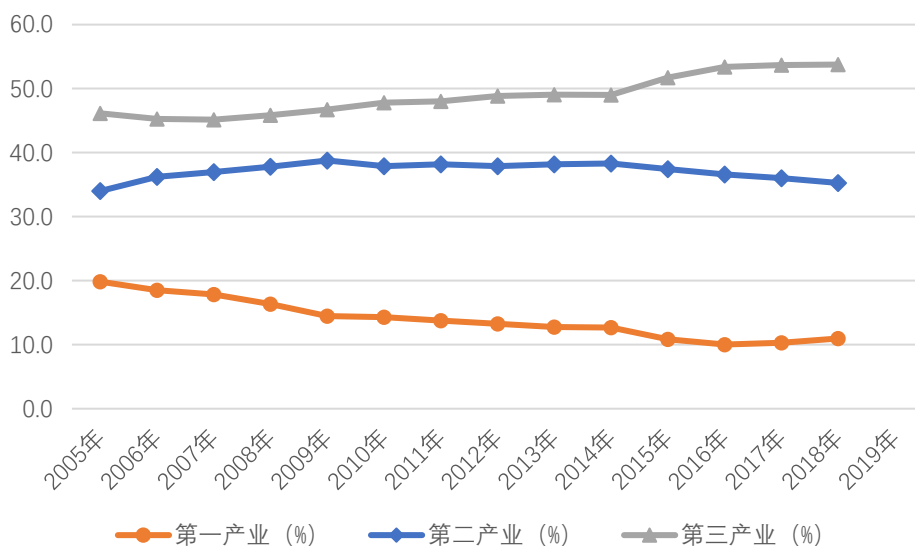


图 3.3 吉林省 2005-2019 各产业构成情况

## 3.2 吉林省能源消费情况

### 3.2.1 能源消费总量

图 3.4 显示了吉林省能源消费总量及主要构成情况。从图中可以看出，煤品燃料和油品燃料占据了能源消费的大部分，而且在 2005-2019 年间有所波动。2005-2012 年，吉林省能源消费总量逐年增加，从 5258.5 万吨标准煤增加到 9028.3 万吨标准煤。2012-2019 年，吉林省能源消费总量逐年减少，降至 7050 万吨标准煤，并保持相对稳定。另外，由于第四次经济普查的影响，2015 年之后的数据有所调整。与此同时，图 3.9 显示了吉林省碳排放量的变化情况。从图中可以看出，2015-2019 年，吉林省碳排放量呈下降趋势，并且与能源消费总量和煤炭比例呈负相关关系。这表明，在“十三五”期间，吉林省实现了经济发展和能源结构优化的双赢目标，并朝着更清洁更高效的能源发展方向前进。

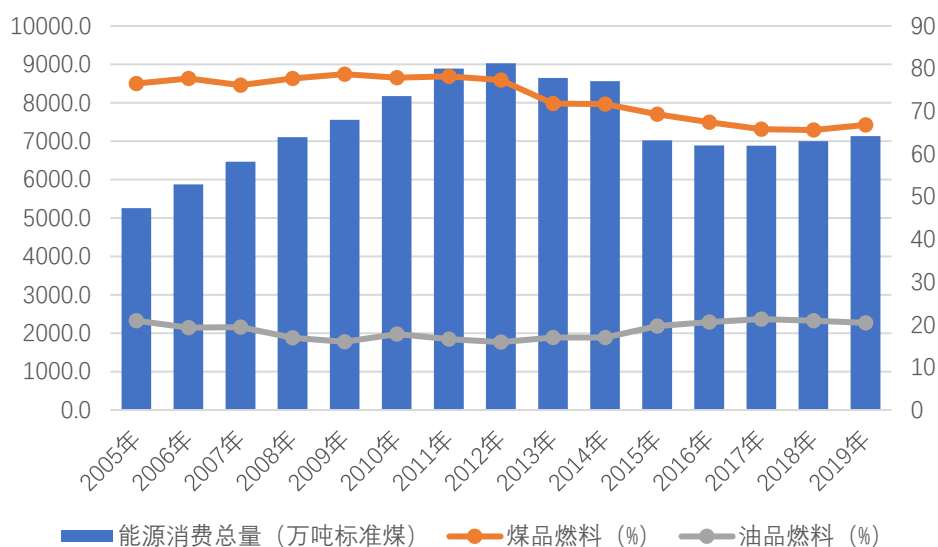


图 3.4 吉林省能源消费总量及主要构成

### 3.2.2 各行业能源消费

根据吉林省有关统计数据，绘制了吉林省 2019 年主要能源流动图(见图 3.5)，核算边界为吉林省消费量较大的煤品、油品、天然气燃料及新能源发电，舍去需求较少的能源品种。从图中看，吉林省终端能源消费以第二产业为主，第三产业次之。第二产业占总能源消耗的 64%，第三产业占比 21%，第一产业占比 3%，居民生活占比 12%。较前些年，第二产业消耗占比有随能源消费总量回升上升的趋势。分能源品种看，煤品燃料占比从 2012 年之后一直有下降的趋势，但到 2019 年仍占据主导地位，占比 64%，天然气和非化石能源占比较低，仅占比 5.2%、

6.6%，能源结构有待改善。

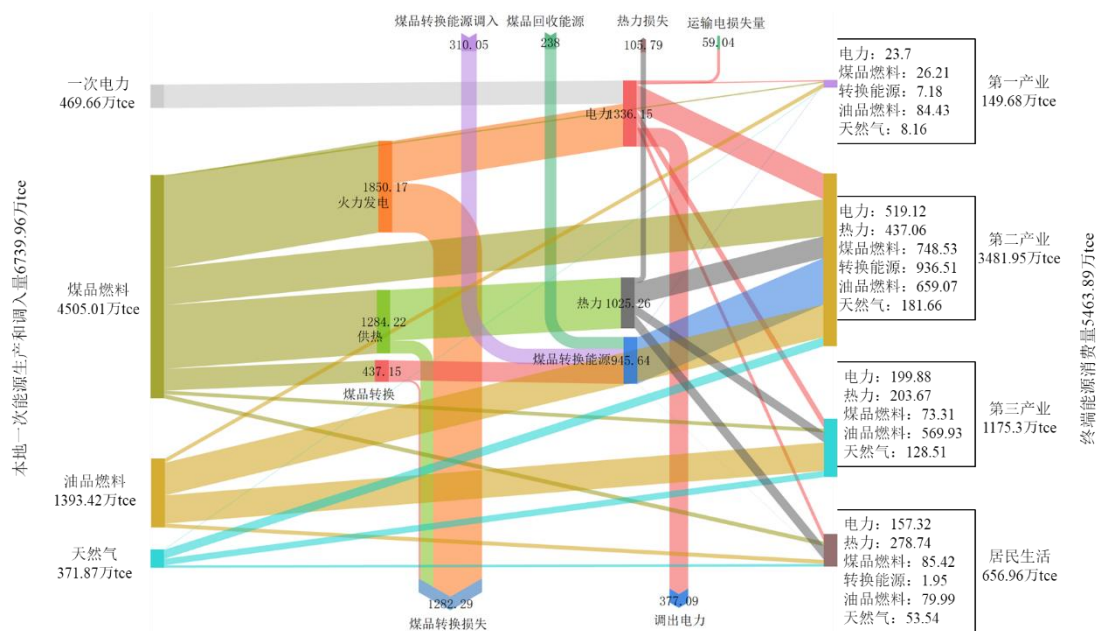


图 3.5 2019 年吉林省主要能源流动

根据以上分析，我们可以将吉林省终端能源消耗划分为农业（包括农、林、牧、渔业）、工业、建筑业、交通运输业（包括仓储和邮政业）、商业（包括批发、零售和住宿、餐饮业及其他第三产业）与居民生活消费六大行业。吉林省工业耗能最大，占总耗电量的 58%，并达到第二产业耗电量的 97%之多，显示出工业在吉林省产业中的主导地位。其次是交通运输业、商业及其他第三产业以及城乡居民生活三者，它们的终端能源消费量基本持平，分别占总耗电量的 12%、11%、13%。这与吉林省人口众多、汽车产业发达、物流业快速发展以及服务业占比上升有关。建筑业与农业则是终端能源消费量较低的行业，都为 3%。图 3.6 展示了 2019 年吉林省各行业终端能源消费量比例关系。

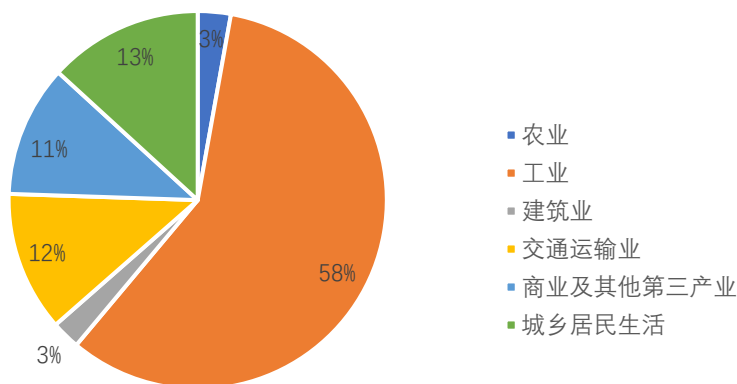


图 3.6 吉林省各产业能源消费比例关系

由吉林省工业能源消费主要集中在六大高耗能行业，分别是石油加工、炼焦和核燃料加工业，化学原料和化学制品制造业，非金属矿物制品业，黑色金属冶炼和压延加工业，有色金属冶炼和压延加工业，电力、热力生产和供应业。根据统计数据，这六大行业占了工业总耗能的 70%，但只贡献了 22% 的工业增加值。如图 3.7 所示。另外，农副食品加工业，食品制造业，酒、饮料和精制茶制造业、汽车制造业也是能源消费较高的行业，占了 16% 的工业总耗能。其他行业则占了 14%。这表明吉林省目前的耗能产业并非其工业的优势产业。

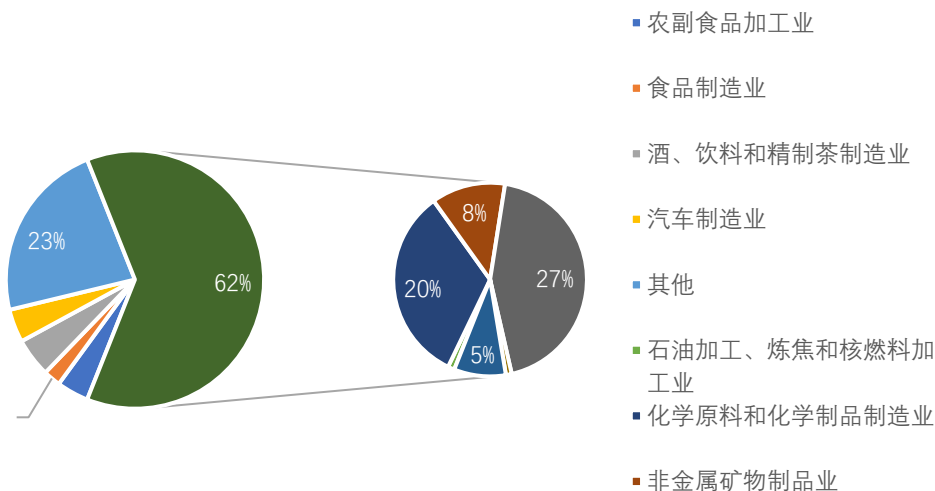


图 3.7 吉林省工业各行业能源消费量比例关系

### 3.2.3 单位 GDP 能源强度

如图3.8所示为吉林省2005–2019年的历年能源强度，吉林省2005年的能源强度为1.89吨标准煤/万元，从图中可以看出，吉林省2005-2015年期间，能源强度从1.89吨标准煤/万元降到0.70吨标准煤/万元，下降了63%，说明技术和产业结构有了很大改进。但是2015-2019年期间，能源强度下降缓慢，只降到0.61，其中第一、二、三产业的能源强度分别为0.12吨标准煤/万元、0.88吨标准煤/万元、0.19吨标准煤/万元。这可能是因为GDP增长放缓，而能源消费量稳定。这表明单靠减少能源消耗已经难以降低能源强度，也表明GDP增长不再依赖于能源消耗。

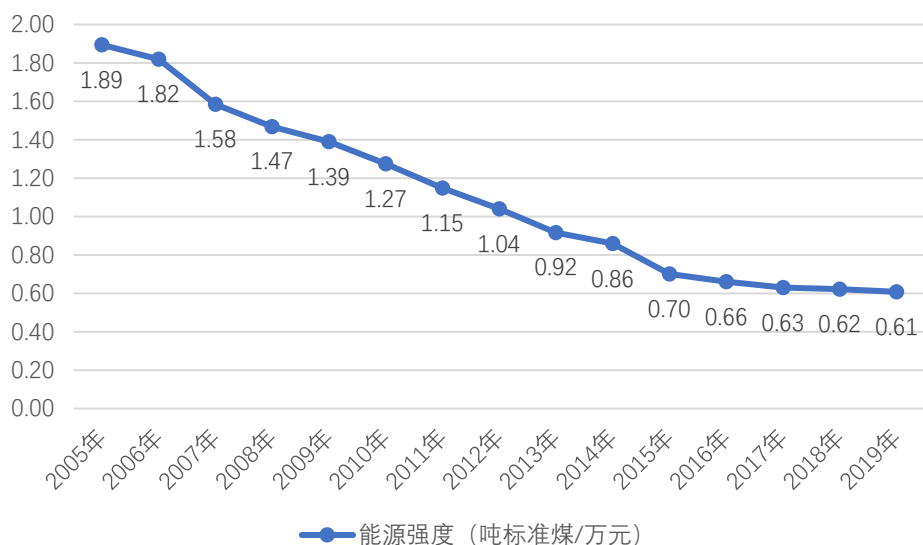


图 3.8 吉林省 2005-2019 年能源强度变化情况

### 3.3 吉林省碳排放现状

按照2.2节给出的计算方法，本研究结合《吉林省统计年鉴》给出的统计数据，对吉林省2005-2019年碳排放量进行了初步核算。吉林省化石燃料品种主要有原煤、焦炭、汽油、柴油、天然气、热力、电力。其他燃料投入量相对来说比较少，故本文选取以上七种能源，其中热力和电力按照火力发电燃煤量和供热燃煤量计算。参考《IPCC国家温室气体清单指南2006》以及《省级温室气体清单编制指南》，将上述化石能源排放因子数据整理如下：

表 3.1 各类化石能源的排放因子数据

能源种类(t)	单位热值(GJ/t)	单位热值含碳量(tC/TJ)	碳氧化率
原煤	20.908	26.37	0.94
焦炭	28.435	29.42	0.93
汽油	43.070	18.90	0.98
柴油	42.652	20.20	0.98
天然气	389.31GJ/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	15.32	0.99

调入调出电量数据从《吉林省统计年鉴》查得。供电排放因子根据《省级温室气体清单编制指南》可知吉林省为1.096Kg/KW·h。计算结果如图3.9a, 3.9b所示。从图3.9中我们可以看出, 受到吉林省近些年GDP增速逐年下滑的影响, 吉林省在2012年碳排放量达到顶峰, 达到23000万吨, 并一直呈现下降趋势, 到2019年碳排放量为17000万吨, 碳排放强度为1.50吨/万元。但随着吉林省经济复苏, 第二产业在经济结构中的主体地位不变的情况下, 碳排放量将进入平台期, 出现下降放缓或者反升的阶段。随着经济结构和能源结构向低碳绿色发展, 二氧化碳排放强度逐年下降, 目前已经降低到2005年的28%水平, 情况较为乐观。

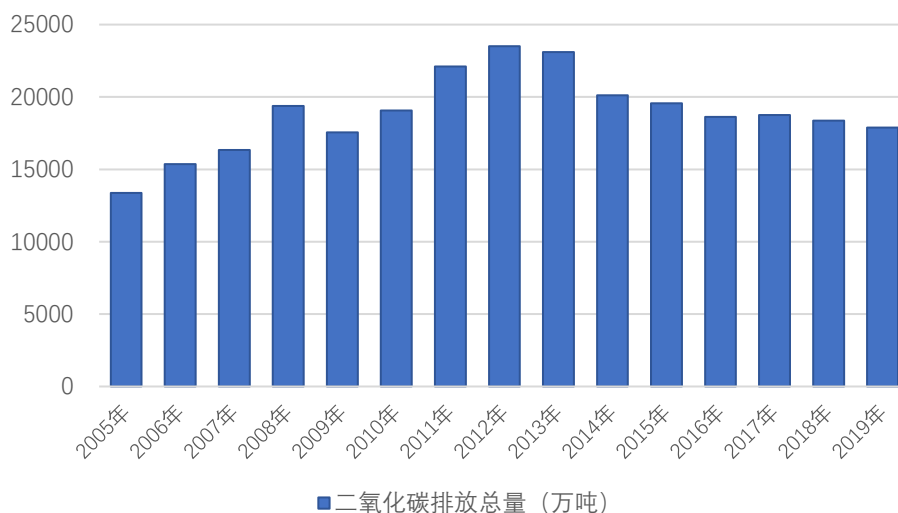


图 3.9a 吉林省 2005-2019 年二氧化碳排放量

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/067036143102006044>