



中国研究生创新实践系列大赛  
“华为杯”第二十届中国研究生  
数学建模竞赛

学 校

宁波大学

参赛队号

23116460172

队员姓名

1. 陈江涛
2. 李浩宇
3. 蔡万源

**中国研究生创新实践系列大赛**  
**“华为杯”第二十届中国研究生**  
**数学建模竞赛**

**题 目：** 区域双碳目标与路径规划研究

**摘 要：**

随着全球气候变化和环保意识的提高，各国都在积极探索可持续发展的途径。其中，碳中和作为一个能够减少碳排放、实现气候目标的重要手段，成为了全球关注的焦点。本文基于各种数学模型，分析和预测了各因素对碳排放的影响，为区域双碳目标的实现、我国发展与减排的矛盾的破解提供了重要依据。

针对问题 1，首先建立了相关指标及指标体系为后续的决策提供支持。再利用对数平均迪氏指数分解法（LMDI）定量分析了碳排放量的各类影响因素，结果表明经济发展因素对碳排放量的增长贡献率最大，而能源消费强度与碳排放呈负相关。此外，还通过引入斯皮尔曼相关系数，计算了指标之间的关联系数，如十二五时期的能源消费总量与 GDP 的相关性为 0.9，进一步地分析了达成双碳目标面临的挑战。

针对问题 2，首先采用双指数函数拟合 2010 年至 2020 年地区人口变化率，再利用最大似然估计求解参数，得到该区域人口预测模型，估计出未来 30 年人口的人口变化率，其中 2035 年预测人口为 8509.672 万人，2050 年为 8485.755 万人。再通过线性回归模型及最小二乘算法构建了该区域的经济预测模型，2035 年 GDP 总量为 177487.8 亿元，2050 年为 353375.6 亿元。此外，还通过能源消费量与经济、人口之间的关联性，建立了基于多元线性回归模型的区域的碳排放量预测模型，并通过最小二乘法对该模型进行求解，2035 年能源消费量为 177717.7 万 tce，2050 年为 354552.1 万 tce。最后，基于 STIRPAT 扩展模型，综合考虑了各种因素对碳排放量的影响，并使用基于二范数的岭回归方法对模型参数进行求解，得到了该区域碳排放量预测模型，结果证明该碳排放量预测模型能够很好的拟合真实数据。

针对问题 3，首先基于情景分析方法与碳排放相关的关键指标，建立了三种不同的情景。接着，根据情景的设定，调整关键指标，并通过 STIRPAT 扩展模型预测出多场景下的碳排放量，从而定量分析各项指标对达成双碳目标的影响。最后，通过与碳达峰和碳中和目标的比较，优选出较为合适的发展情景，实现对双碳目标达成的路径规划。本文提出的雄心情景能够在期限之前就达成双碳目标，为我国向双碳目标的迈进起到了指导作用。

**关键词：** LMDI 分析；皮尔曼相关系数；多元线性回归；STIRPAT 扩展模型；情景分析方法

# 目 录

1. 问题背景与重述 .....	3
1.1 问题背景 .....	3
1.2 问题重述 .....	3
2. 基本假设与符号说明 .....	5
2.1 基本假设 .....	5
2.2 符号说明 .....	5
3. 问题一模型建立与求解 .....	6
3.1 数据预处理 .....	6
3.2 问题一分析及思路 .....	6
3.3 问题一求解 .....	7
3.3.1 指标和指标体系 .....	7
3.3.2 区域碳排放量现状分析和影响因素及变化趋势分析 .....	9
3.3.3 各指标关联模型建立 .....	17
4. 问题二模型建立与求解 .....	26
4.1 数据预处理 .....	26
4.2 问题二分析及思路 .....	29
4.3 问题二求解 .....	30
4.3.1 基于人口和经济变化的能源消费量预测模型 .....	30
4.3.2 区域碳排放量预测模型 .....	36
5. 问题三模型建立与求解 .....	40
5.1 问题三分析及思路 .....	40
5.2 情景设计 .....	40
5.2.1 自然情景 .....	47
5.2.2 基准情景 .....	48
5.2.3 雄心情景 .....	49
5.3 多情景下碳排放核算方法及双碳目标与路径规划 .....	49
6. 总结与展望 .....	51
参考文献 .....	52
附录 .....	53

# 1. 问题背景与重述

## 1.1 问题背景

随着全球气候变化的日益严重和环保意识的不断升高，可持续发展已经成为 21 世纪全球议程的核心。在这个关键时刻，中国作为全球最大的碳排放国之一，不仅面临着严峻的气候挑战，还承担着全球气候行动的关键责任。2020 年，习近平主席在第七十五届联合国大会上提出中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。中国的碳中和承诺，成为了国际社会关注的焦点，不仅对中国自身的可持续发展具有深远影响，还对全球气候目标的实现产生着至关重要的影响。为此，中国政府采取了一系列政策措施，特别是在 2021 年中共中央国务院正式发布的《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》中，明确了中国双碳行动的顶层设计，以推动碳减排、促进可持续发展，以及加速能源转型<sup>[1]</sup>。

要实现双碳目标，最重要的矛盾是经济发展和碳排放增加间的矛盾。一方面必须减少碳排放。考虑到我国的能源禀赋和发展中国家的性质，减少碳排放需要找到经济增长和改善环境质量的平衡点，这将对传统高碳排放的企业产生重大冲击，对我国的产业结构和能源结构发出更大的挑战；另一方面必须增加碳汇，提高二氧化碳的吸收和固定。根据已有文献研究，仅仅依靠技术碳减排无法实现零碳社会，碳汇是实现碳中和目标不可或缺的中坚力量，社会资源会向碳汇产业倾斜，带动我国清洁行业的发展。由此可见，实现碳中和不仅可以带动中国国内环保和可持续发展，解决空气污染、水资源短缺等环境问题，还能通过投资绿色技术和可再生能源，培育新兴产业，创造就业机会，提升经济增长质量。

实现碳中和目标并推动经济社会的高质量发展，需要分析地区碳排放的影响因素及其发展趋势，提高能源利用效率和非化石能源的消费比重，规划合理的实现双碳目标的路径是一项及其重要的工作，为破解发展与减排的矛盾提供了重要思路。

## 1.2 问题重述

### 问题一：区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量的现状分析

(1) 建立指标与指标体系：建立相关指标及指标体系以描述某区域经济、人口、能源消费量、碳排放量以及各部门的碳排放状况，并且所建立的指标体系能够描述各主要指标之间的相互关系，其中部分指标的变化（同比或环比）可以用于碳排放量预测。

(2) 分析区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量的现状：以 2010 年为基期，分析某区域十二五和十三五期间的碳排放量状况，并分析对该区域碳排放量产生影响的各因素和贡献，研判对该区域实现双碳目标需要面对的主要挑战，为其双碳路径规划中差异化的路径选择提供依据。

(3) 建立区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量各指标的关联模型：分析相关指标的变化（环比与同比），并建立各项指标间的关联关系模型。再基于相关指标的变化，结合双碳政策与技术进步等多重效应，确定碳排放预测模型参数取值。

### 问题二：区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量的预测模型

(1) 建立基于人口和经济变化的能源消费量预测模型：以 2020 年为基期，结合 2035 年和 2050 年这两个中国式现代化的时间节点，对某区域十四五至二十一五期间人口、GDP 进行预测，并且再通过人口、GDP 与能源消费量之间的相关性，预测该区域十四五至二十一五期间的能源消费量。

(2) 建立区域碳排放量预测模型：基于碳排放量分别与人口预测、GDP 预测、能源消费量预测、各能源消费部门和能源供应部门的能源消费量、以及各能源消费部门和能源供应部门的能源消费品种之间的关联性，建立预测模型以预测该区域的碳排放量。

### **问题三：区域双碳（碳达峰与碳中和）目标与路径规划方法**

(1) 设计不少于三种情景，且所设计的情景与双碳目标的时间节点以及能效提升和非化石能源消费比重提升相关联。在这些情景下，2035 年的 GDP 比要 2020 年翻一番、2060 年比 2020 年翻两番，2060 年生态碳汇的碳消纳量为 2020 年碳排放量的 10%，2060 年工程碳汇或碳交易的碳消纳量为基期碳排放量 10%，且要求区域碳排放与各部门碳排放量的总和相一致，碳排放量核算模型使用问题二中的预测模型。

(2) 确定双碳目标与路径，确定不同时间节点（2025、2030、2035、2050 和 2060 年）GDP、人口、能源消费量、提高能源利用效率和提高非化石能源消费比重的目标值，并完成能效提升、产业（产品）升级、能源脱碳和能源消费电气化的定性与定量分析。

## 2. 基本假设与符号说明

### 2.1 基本假设

- 假设 1: 问题 2 中能源消费量与经济、人口具有线性关系;  
假设 2: 问题 3 中 2035 年的 GDP 比基期 (2020 年) 翻一番; 2060 年比基期翻两番;  
假设 3: 问题 3 中 2060 年生态碳汇的碳消纳量为基期碳排放量的 10%;  
假设 4: 问题 3 中 2060 年工程碳汇或碳交易的碳消纳量为基期碳排放量 10%;

### 2.2 符号说明

符号	符号说明
$Y$	人均 GDP
$S_i$	部门生产份额
$I_i$	能源消费强度
$U_{ij}$	碳排放因子
$P$	总人口数
$M_{ij}$	部门能源消费结构
$C$	区域的碳排放量
$C_{0T}$	基期与末期第 $T$ 年年碳排放量的变化量
$C_T$	第 $T$ 年的碳排放量
$C_0$	基期碳排放量
$\Delta C_1$	$T$ 年间碳排放因子因素的影响
$\Delta C_2$	$T$ 年间能源消费强度对碳排放的影响
$\Delta C_3$	$T$ 年间人均 GDP 对碳排放的影响
$\Delta C_4$	$T$ 年间人口总数对碳排放的影响
$\rho$	斯皮尔曼相关系数
$p_{nfec}$	非化石能源消费比重
$p_{nfeG}$	非化石能源发电比重
$E_1$	农林消费部门能源消费量
$E_2$	工业消费部门能源消费量
$E_3$	交通消费部门能源消费量
$E_4$	建筑消费部门能源消费量
$E_5$	居民生活消费能源消费量
$E_6$	能源供应部门能源消费量
$p_{cs1}$	农林消费部门二次能源消费比重
$p_{cs2}$	工业消费部门二次能源消费比重
$p_{cs3}$	交通消费部门二次能源消费比重
$p_{cs4}$	建筑消费部门二次能源消费比重
$p_{cs5}$	居民生活消费二次能源消费比重

### 3. 问题一模型建立与求解

#### 3.1 数据预处理

通过 Matlab 数据可视化，可观察到附表 6 某区域能源消费部门碳排放因子统计表中第三产业建筑消费部门的煤炭碳排放因子数据为空值，如表 3.1 所示。煤炭作为国家的战略资源，是我国重要的基础产业，也是建筑消费部门中不可或缺的原材料。此外，考虑到在该空缺年份前后几年都正常使用了煤炭资源，此年也不应该出现空值，因此判断为异常值。

为了补全异常值，本文选取了线性插值方法。线性插值是一种常用的插值方法，用于估计在已知数据之间的未知的数值，具体步骤如下：

1. 假设有一组已知数据点，其中包含两个相邻的点 A 和 B，它们分别对应的自变量值为  $x_A$  和  $x_B$ ，因变量值为  $y_A$  和  $y_B$ 。

2. 计算出 A 和 B 之间的自变量差值和因变量差值，从而计算出斜率：

$$k = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (3.1)$$

3. 假设要在 A 和 B 之间 X 处进行插值，只要计算出 X 处相对于 A 的自变量差值  $\Delta x = x_X - x_A$ ，再代入直线的方程可得：

$$y_X = y_A + k \times \Delta x \quad (3.2)$$

由此，可以得到 X 处的差值结果。基于此，可以得出能源消费部门碳排放因子统计表中第三产业建筑消费部门在 2012 年的煤炭碳排放因子为 2.658。

表 3.1 某区域能源消费部门碳排放因子统计表中第三产业建筑消费部门的煤炭碳排放因子数据

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
煤炭	2.664	2.664	—	2.653	2.664	2.6238	2.664

同理，附表 7 中某区域能源供应部门碳排放因子统计表发电项目中 2012 年的热力碳排放因子也为异常值，如表 3.2 所示。通过上述的线性插值法，可以得出能源供应部门碳排放因子统计表发电项目中 2012 年的热力煤炭碳排放因子为 2.942。

表 3.2 某区域能源供应部门碳排放因子统计表发电项目中的热力碳排放因子数据

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
热力	2.906	2.916	—	2.967	2.998	3.107	3.190

#### 3.2 问题一分析及思路

问题一分析思路如图 3.1，要分析该区域碳排放量和经济、人口、能源消费量的现状，首先要建立指标体系，以要分析的上述四个为一级指标，再选取许多二级指标，包括人均

GDP、各部门的生产总值、化石和非化石能源消费量等。再根据数据绘制十二五时期和十三五时期的碳排放量状况的折线图等，利用对数平均迪氏指数分解法（LMDI）分析对碳排放量产生影响的多个因素以及每个因素的贡献百分比，以此分析双碳目标要面临的挑战。最后对相关指标变化同比和环比进行绘图并分析，还引入了斯皮尔曼相关系数建立各项指标的关联模型，绘制了相关指标的相关性热力图并分析，确定了能源利用效率和非化石能源消费比重这两个碳排放模型预测参数的初始估计取值。

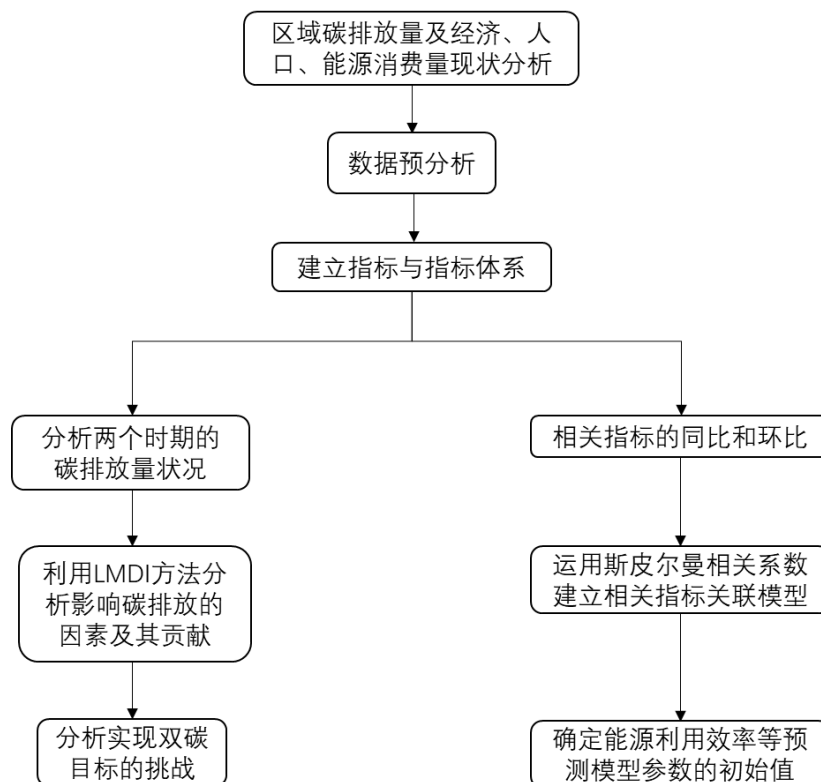


图 3.1 问题一分析思路

### 3.3 问题一求解

#### 3.3.1 指标和指标体系

分析区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量的现状，需要选定合适的指标并建立完善的指标体系。显然题目要求的一级指标为该区域的经济、人口、能量消费量以及碳排放量，为了细化指标体系并提高评估的可比性，本文选定了一些二级指标。在经济指标中，二级指标为总 GDP、人均 GDP、部门生产总值和生产份额；在人口指标中，二级指标为区域的总人口数；在能源消耗量指标中，二级指标为能源消费量总量、化石能源消费量、非化石能源消费量和能源消费强度；在碳排放指标中，二级指标为碳排放总量、各部门的碳排放量和碳排放因子，其中部分提出的二级指标的具体解释如下：

- 人均 GDP ( $Y$ )：表示区域每个人平均创造的生产价值。通过比较不同年份的人均 GDP，可以计算出年均的人均 GDP 增长率等相关指标，从而了解区域经济发展水平的变化。

- 部门生产份额 ( $S_i$ )：衡量各个部门的生产总值在该区域总 GDP 中的比重。通过对各部门产值占生产总值的比值进行分析，可以了解不同产业的发展状况，以及经济结构的变化。



● 能源消费强度 ( $I_i$ )：衡量各个部门在生产过程中的能源消耗情况。通过计算各部门能源消费总量与该部门生产总值的比值，可以比较各部门之间的能源消费强度，评估其对能源的消耗能力

● 化石能源消费量：化石能源是指来自地球地壳中的化石燃料，主要包括煤炭、石油和天然气。在本题中代表着使用煤炭、油品和天然气生产的能源的消耗量。

● 非化石能源消费量：非化石能源是指不使用化石燃料的能源，主要包括太阳能、风能、水能、地热能 and 生物质能等。在本题中代表着电力和热力生产的能源的消耗量。

● 碳排放因子 ( $U_{ij}$ )：衡量各部门在单位化石或非化石能源消耗所产生的碳排放。通过计算各部门消耗能源时产生的碳排放与能源消费量的比值，可以评估不同部门的碳排放强度，从而推断出各部门对的影响程度。

其中  $i$  分别代表各个部门,  $j$  分别不同种类的能源车, 则我们所构建的指标体系即如表 3.3 所示:

表 3.3 指标体系

一级指标	二级指标
经济	总 GDP (亿元)
	人均 GDP (万元)
	部门生产总值 (亿元)
	生产份额 (%)
人口	总人口 (万人)
能源消费量	能源消费量总量 (万 tce)
	化石能源消费量 (万 tce)
	非化石能源消费量 (万 tce)
	能源消费强度 (tce/万元)
碳排放	碳排放总量 (万 tCO <sub>2</sub> )
	各部门的碳排放量 (万 tCO <sub>2</sub> )
	碳排放因子 (tCO <sub>2</sub> /tce)

通过该指标体系可以将区域的碳排放量和经济、人口、能源消费量等社会因素相关联，其中部分指标可以和碳排放量列为一个等式，即 Kaya 模型，具体如下所示：

$$C = \sum_{i,j} P \times Y \times S_i \times I_i \times M_{ij} \times U_{ij} \quad (3.3)$$

其中  $P$  是总人口数,  $M_{ij}$  是第  $i$  部门的能源消费结构, 即种类  $j$  的能源消费量与能源消费量总量的比,  $C$  是该区域的碳排放量, 每个求和项可以描述各个部门的碳排放状况。

构建的指标体系中二级指标显然与一级指标存在密切关系, 而且它们之间也存在着相互关系, 可以通过以下几个方面进行描述:

1. 经济与人口的关系: 经济发展水平对人口总量具有一定的影响。通常情况下, 经济发展水平越高, 即 GDP 越高, 人们的生活水平也会提高, 从而有助于吸引更多的

人口流入。同时，人口总量的增长也会推动经济的发展。人口增长意味着潜在市场的扩大，为经济发展提供了更多的人力资源和市场需求。

2. 经济与能源消费量和碳排放的关系：GDP 的增长让越来越多的能源被消耗，因为在生产和交通等领域需要更多的能源来满足人们的需求。这可能会导致能源消费量的增加，并进一步增加二氧化碳等温室气体的排放。此外不同部门能源消费量和碳排放也有所不同，生产份额的差异也会对该区域能源消费量和碳排放产生影响。
3. 能源消费量与碳排放的关系：能源消费量导致碳排放增加，能源的利用通常伴随着化石燃料的燃烧，释放出二氧化碳等温室气体，进而导致碳排放的增加。因此，能源消费量的增加意味着更多的碳排放，但能源消费强度和非化石能源的使用比率也会产生影响。而碳排放总量或碳排放因子较高时，为了减少碳排放和应对气候变化，许多国家实施了碳排放限制政策，鼓励能源消费者减少使用高碳燃料或者采取节能措施。因此，碳排放也可以改变能源消费结构和总量。

### 3.3.2 区域碳排放量现状分析和影响因素及变化趋势分析

#### （一）区域碳排放量现状分析

参照所给数据，我们得到 2010 到 2020 年期间的碳排放量状况，如图 3.2 所示，

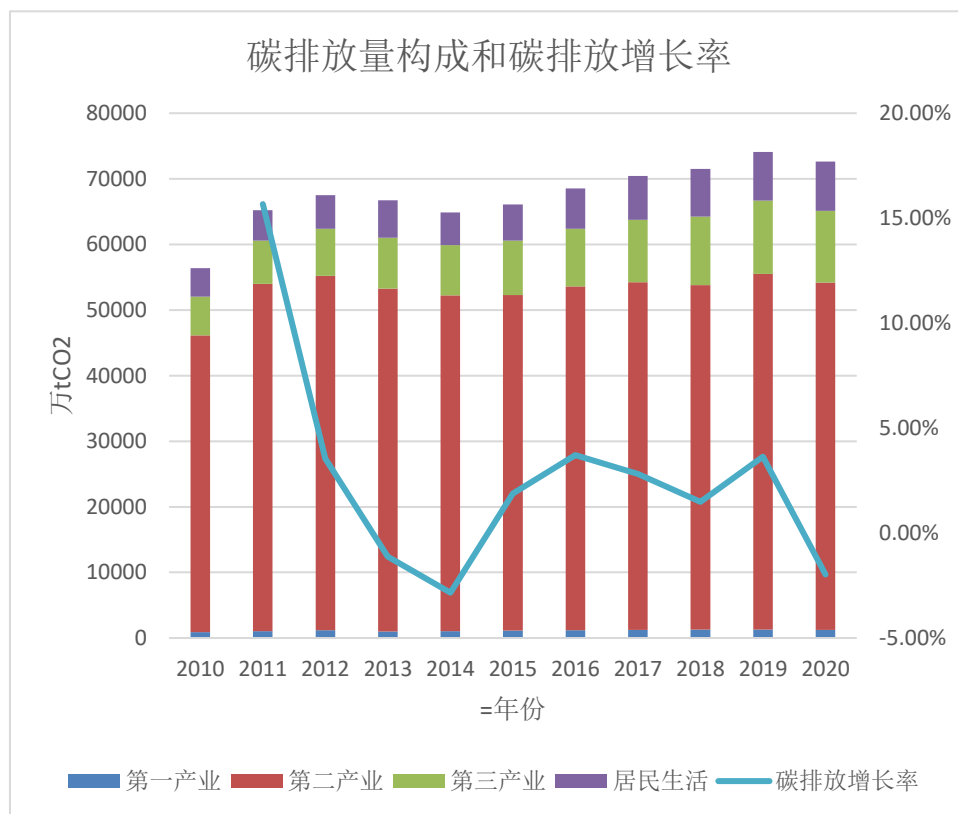


图 3.2 2010 到 2020 年期间的碳排放量状况

为了分析该区域十二五（2011-2015 年）和十三五（2016-2020 年）期间的碳排放量状况，将这两个时期的碳排放总量和碳排放量增长率提取出来，分别得到图 3.3 和图 3.4：

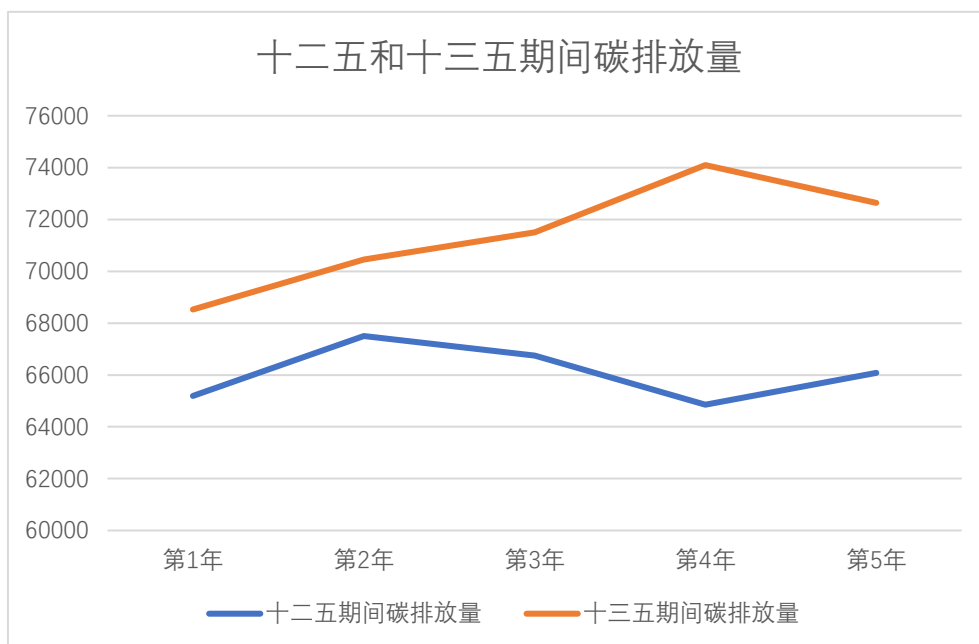


图 3.3 十二五和十三五期间的碳排放量

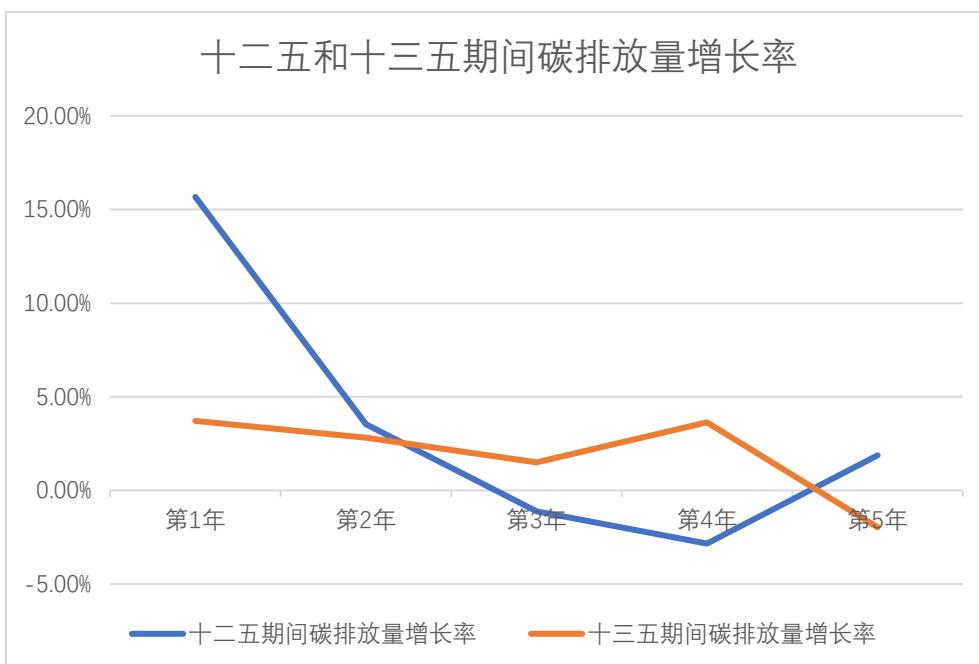


图 3.4 十二五和十三五期间的碳排放量增长率

通过图 3.3 可以看出，十三五时期的碳排放量要明显高于十二五时期。而且，在十三五时期的前四年随着年份的增加，每年的碳排放量始终在增加，尽管第五年有所降低，但总体还是增加的，十二五时期每年则有增有减。要更深入探究两个时期的碳排放量增长率，需要通过分析图 3.4 的碳排放量增长率曲线图。

通过图 3.4 可以看出，十二五时期的碳排放量在前四年都保持下降趋势，在第三年达到了负增长，但在第五年碳排放量增长率却开始回升，回到了正增长；十三五时期的前四年碳排放量增长率总体稳定保持在百分之三左右，但第五年达到了负增长。

要研究对碳排放量产生影响的各种因素，将选定的部分二级指标作为可能对碳排放量产生影响的因素。图 3.5，3.6，3.7，3.8 分别展示了碳排放总量及其增长率、GDP 总量及

其增长率、人口总量及其增长率、能源消费总量及其增长率，可以看出碳排放量和经济、人口、能力消费总量在数量和增长率的趋势总体上是相似的，说明四者可能存在相关性，为了论证这一点，本文通过 SPSSPRO 软件对相关性进行分析，结果如表 4 所示。

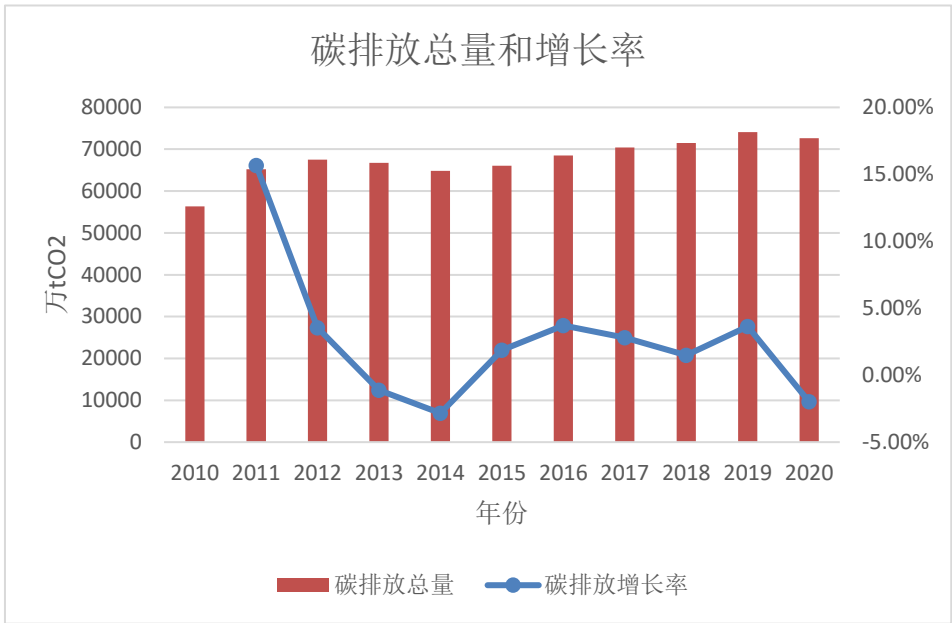


图 3.5 碳排放总量和增长率

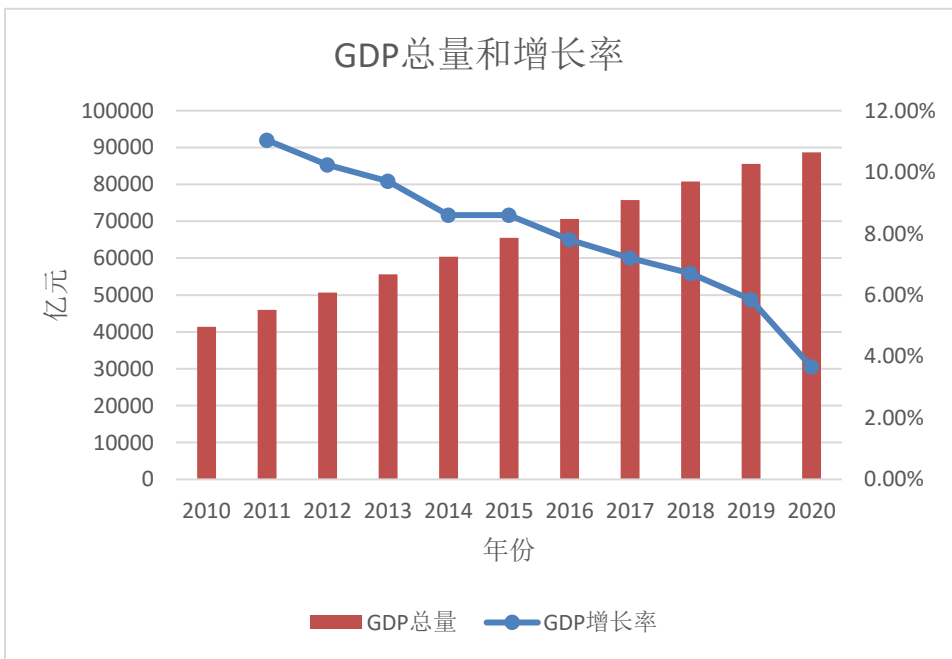


图 3.6 GDP 总量和增长率

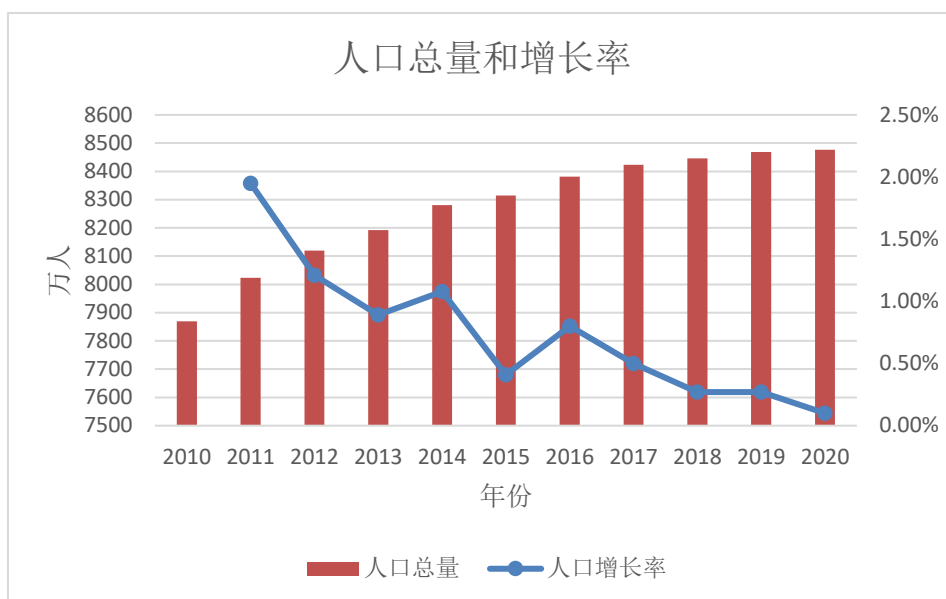


图 3.7 人口总量和增长率

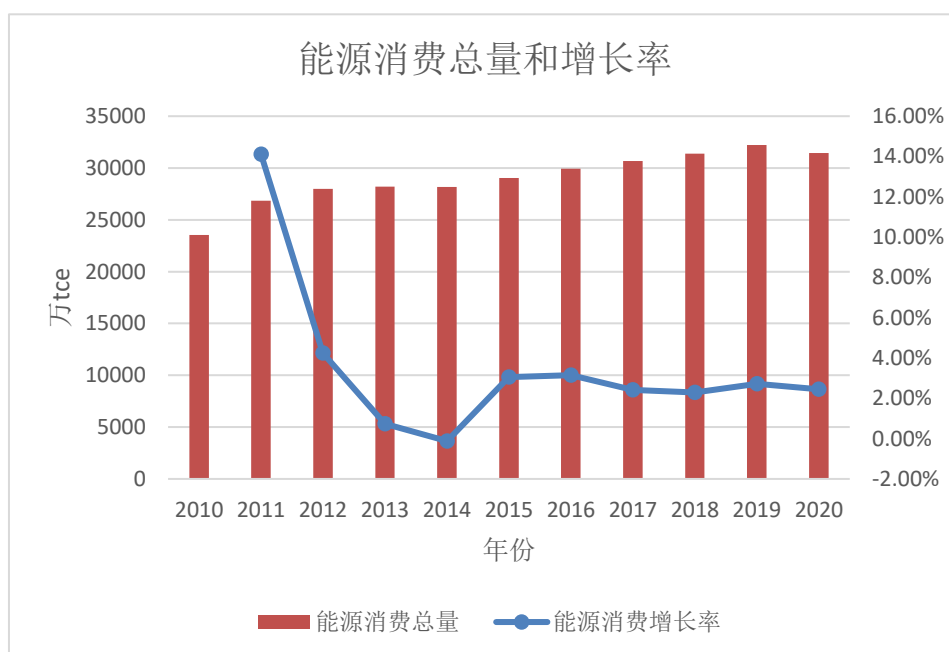


图 3.8 能源消费总量和增长率

表 3.4 碳排放量与经济、人口、能源消费量的相关性分析

	碳排放总量	能源消费总量	GDP	人口
碳排放总量	1	0.918	0.882	0.882
能源消费总量	0.918	1	0.982	0.982
GDP	0.882	0.982	1	1
人口	0.882	0.982	1	1

由表 3.4 可以看出该区域碳排放量与经济、人口、能源消费量都呈现显著相关性。为了进一步分析对该区域碳排放量产生影响的各因素，我们选取了部分二级指标，研究它们对碳排放量的影响和贡献。

## （二）区域碳排放量的影响因素分析

选取的二级指标和选取原因分别为：人均 GDP，它是代表经济因素对碳排放量的影响的典型指标；总人口，是人口对碳排放量影响的典型指标；能源消费强度，它影响了能源消费量的同时影响了碳排放量，也是一个影响碳排放量的必要因素；碳排放因子，将能源消费和碳排放关联起来的重要指标。

这样，我们可以就得到一个新的碳排放 Kaya 恒等式：

$$C = U \times I \times Y \times P \quad (3.4)$$

要分析对碳排放量产生影响的各因素的贡献，要对这个式子进行因素分解。使用 LMDI（对数平均迪氏指数分解法）进行因素分解，LMDI 是一种常用的因素分解方法，用于评估不同因素对总体碳排放量变化的贡献，在 LMDI 方法中，碳排放量的变化被分解为各个因素的贡献，通过计算对数平均迪氏指数来量化各个因素的贡献，针对调查数据的起点和终点的端点值，求其对数平均函数作为分解权重<sup>[2]</sup>。LMDI 方法分为加法分解和乘法分解两类，区别在于表达式是加法还是乘法，选用的加法分解的形式为：

$$\Delta V_x = \sum_i \frac{v_i^T - v_i^0}{\ln v_i^T - \ln v_i^0} \times \ln \frac{x_i^T}{x_i^0} \quad (3.5)$$

LMDI 方法进行该地区碳排放量因素分解公式为：

$$C_{0T} = C_T - C_0 = \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 + \Delta C_4 \quad (3.6)$$

其中， $C_{0T}$  为基期与末期第 T 年年碳排放量的变化量， $C_T$  为第 T 年的碳排放量， $C_0$  为基期碳排放量。 $\Delta C_1$  为基期与第 T 年间碳排放因子因素的影响， $\Delta C_2$  为基期与第 T 年间能源消费强度对碳排放的影响， $\Delta C_3$  为基期与第 T 年间人均 GDP 对碳排放的影响， $\Delta C_4$  为基期与第 T 年间人口总数对碳排放的影响。

利用 LMDI 分解方法的加法形式得到：

$$\Delta C_1 = \frac{c^T - c^0}{\ln c^T - \ln c^0} \times \ln \frac{U^T}{U^0} \quad (3.7)$$

$$\Delta C_2 = \frac{c^T - c^0}{\ln c^T - \ln c^0} \times \ln \frac{I^T}{I^0} \quad (3.8)$$

$$\Delta C_3 = \frac{c^T - c^0}{\ln c^T - \ln c^0} \times \ln \frac{Y^T}{Y^0} \quad (3.9)$$

$$\Delta C_4 = \frac{c^T - c^0}{\ln c^T - \ln c^0} \times \ln \frac{P^T}{P^0} \quad (3.10)$$

每个因素对碳排放量的贡献率分别为：

$$r_U = \frac{\Delta C_1}{\Delta C} \times 100\% \quad (3.11)$$

$$r_I = \frac{\Delta C_2}{\Delta C} \times 100\% \quad (3.12)$$

$$r_Y = \frac{\Delta C_3}{\Delta C} \times 100\% \quad (3.13)$$

$$r_P = \frac{\Delta C_4}{\Delta C} \times 100\% \quad (3.14)$$

它们的和等于 1。

将 2010 年到 2020 年的数据代入，首先分别计算 Y、I、U，即

$$\begin{aligned} U(\text{碳排放因子}) &= \frac{\text{碳排放量}}{\text{能源消费量}}; \\ I(\text{能源消费强度}) &= \frac{\text{能源消费量}}{GDP}; \\ Y(\text{人均GDP}) &= \frac{GDP}{\text{总人口数}}; \end{aligned} \quad (3.15)$$

对该区域的整体数据，得到表 3.5：

表 3.5 2010 年到 2020 年多个影响因素的整体数据

年份	碳排放因子 (tCO <sub>2</sub> /tce)	能源消费强度 (tce/万 元)	人均 GDP (万元/ 人)	总人口 (万 人)
2010	2.394295	0.568804	5.258874	7869.34
2011	2.427151	0.584515	5.727621	8022.99
2012	2.410875	0.552687	6.239087	8119.81
2013	2.366739	0.507432	6.784317	8192.44
2014	2.302169	0.466713	7.288827	8281.09
2015	2.275804	0.44291	7.88348	8315.11
2016	2.288172	0.423798	8.431183	8381.47
2017	2.297092	0.404871	8.99296	8423.5
2018	2.279084	0.388148	9.569725	8446.19
2019	2.299164	0.376683	10.10216	8469.09
2020	2.310367	0.354498	10.46131	8477.26

对数据进行因子分解，得到表 3.6：

表 3.6 不同影响因素对该区域碳排放量的影响

碳排放因子	能源消费强度	人均 GDP	总人口	总效应
-2289.138	-30333.6981	44122	4773.827	16273.27

计算每个因素的贡献率，得到图 3.9

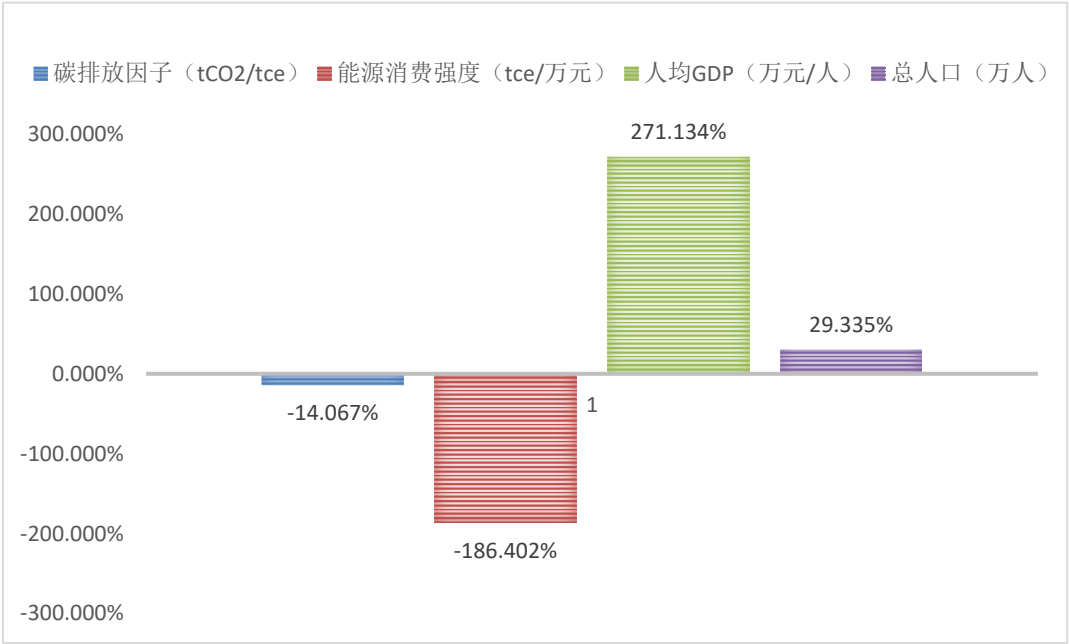


图 3.9 不同影响因素对该区域碳排放量影响的贡献率

结合表 3.6 及图 3.9 的贡献率可以看出，经济发展因素导致的碳排放量增长贡献很大，即碳排放量的增长在很大程度上与经济的发展挂钩，快速的经济的发展在给人民带来幸福生活的同时，也会导致碳排放量的快速增加；能源消费强度表现为负效应，即更好的能源消费强度能够控制碳排放量，因此需要从科学技术与政策扶持等方面增加能源消费强度；人口规模和碳排放因子的贡献较低，前者对碳排放量的增加有正效应，而后者为负效应。

为了进一步分析不同因素对该区域碳排放量的影响，分别对十二五时期和十三五时期的影响和贡献率进行计算。

表 3.7 不同时期不同因素对该区域碳排放量的影响

	碳排放因子	能源消费强度	人均 GDP	总人口	总效应
十二五	-3100.59	-15282.5	24731.93	3365.999	9714.814
十三五	1044.594	-15431.1	19606.62	1338.432	6558.519



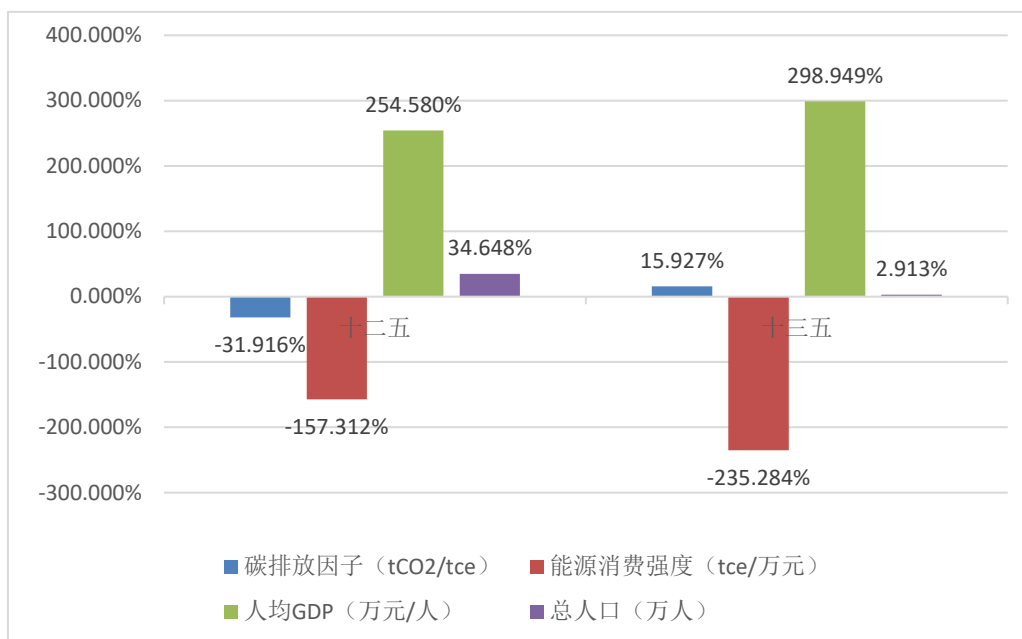


图 3.10 不同时期不同因素对该区域碳排放量影响的贡献率

碳排放因子和整体一样，对碳排放量增长的贡献较小，但十二五时期碳排放因子多碳排放量增长的趋势还起到负效应，即对碳排放的增长具有抑制作用，但到十三五时期贡献率反而开始为正值了，说明十三五时期的能源消费会造成更多的碳排放，这也造成了未来能源的合理消耗的挑战，必须升级节能减排技术和清洁能源的使用等以降低碳排放因子，提高能源的使用效率。

能源消费强度在两个时期都表现出了显著的负效应，更好的能源消费强度能够有效地控制碳排放量，而且十三五时期的负效应较十二五时期更加显著，说明该区域在政策、科学技术等扶持下，经济发展对能源的依赖性逐渐降低，在降低碳排放量中起到了十分可观的作用。

经济的发展造成了碳排放量的增加，且经济的贡献率非常高，经济发展通常伴随着工业化和城市化进程，这些过程需要大量能源供应和资源消耗。传统能源来源主要是化石燃料，如煤炭、石油和天然气，它们在燃烧时释放出二氧化碳等温室气体。随着经济的发展，城市化工业化步伐加快，更多的基础设施进行建设，导致了碳排放量的增加。因此需要在经济增长的同时积极采取措施减少碳排放，通过技术创新和政策支持，可以实现经济发展与低碳环保的双赢局面，促进可持续发展。

人口对碳排放量的增长在两个时期都起到促进的作用，总体来说贡献率较小，尤其在十三五时期，随着人口增加速度的放缓，且该区域居民节能减排、低碳生活的意识越来越强，将人口增加导致的碳排放缩小到了一个很理想的数字，贡献率甚至仅占到不到3%，随着减碳生活模式的继续推广，相信未来由人口带来的减碳效应会更高。

### （三）达成双碳目标面临的主要挑战

碳排放量增长主要受到经济发展的影响，而能源使用效率是减少碳排放量的关键。由上述数据、图表可以发现，为了在该区域实现碳达峰和碳中和，面对的主要挑战分别为如何在保证经济发展的同时抑制因为经济发展导致的碳排放量增加，以及如何高效的使用各种能源而减少碳排放。

首先，碳达峰意味着碳排放量停止增长，达到最高水平后开始下降，实现碳中和意味着将净碳排放量降至零或负值。这需要转型到低碳经济模式，需要新能源技术来增加

能源使用效率。然而，这需要大规模的投资和技术创新，以建设清洁能源设施、改善能源输配系统，并促进新能源技术的发展和​​应用。

另外，碳达峰和碳中和还面临着技术、经济和社会转型的挑战。需要加大研发和创新力度，推动可再生能源技术的突破和成熟。同时，由于清洁能源的成本较高，经济可行性也是一个挑战。应该通过政策激励、市场机制和金融支持等手段，推动低碳产业的发展和市场竞争力​​的提升。此外，社会转型也需要广泛的参与和社会共识，培养节能减排的意识和行为习惯。通过这些措施，才有可能在保持经济发展的同时抑制碳排放的增长。

综上所述，实现碳达峰和碳中和面临着多重挑战，包括通过技术提高能源使用效率，以及经济和社会转型以降低经济发展导致的碳排放等方面。但这些挑战也为我们提供了机遇，促使我们加强合作，加快创新，推动可持续发展和环境保护的目标。通过政府、企业​​和个人的共同努力，我们可以应对这些挑战，并为未来创造一个更清洁、可持续的世界。

3.3.3 各指标关联模型建立

（一）分析相关指标的变化

分析相关指标的变化，选取了同比和环比。

同比是指与同一时间段的上一个时间点相比进行比较，可以有效地反映出同一时间段内的增长或下降趋势，在此处指指标的数据与上一个时期的同年数据比较，即与五年前的数据进行比较，即

$$G_{\text{同比}}(t)=\frac{Y(t)-Y(t-5)}{Y(t-5)}\times 100\% \tag{3.16}$$

环比指与上一时间段相比进行比较，可以较为准确地反映出短期内的增长或下降情况，在此处指指标的数据与前两年的数据进行比较，即

$$G_{\text{环比}}(t)=\frac{Y(t)-Y(t-1)}{Y(t-1)}\times 100\% \tag{3.17}$$

对碳排放量、经济、人口和能源消费量的增长进行同比和环比，可以得到

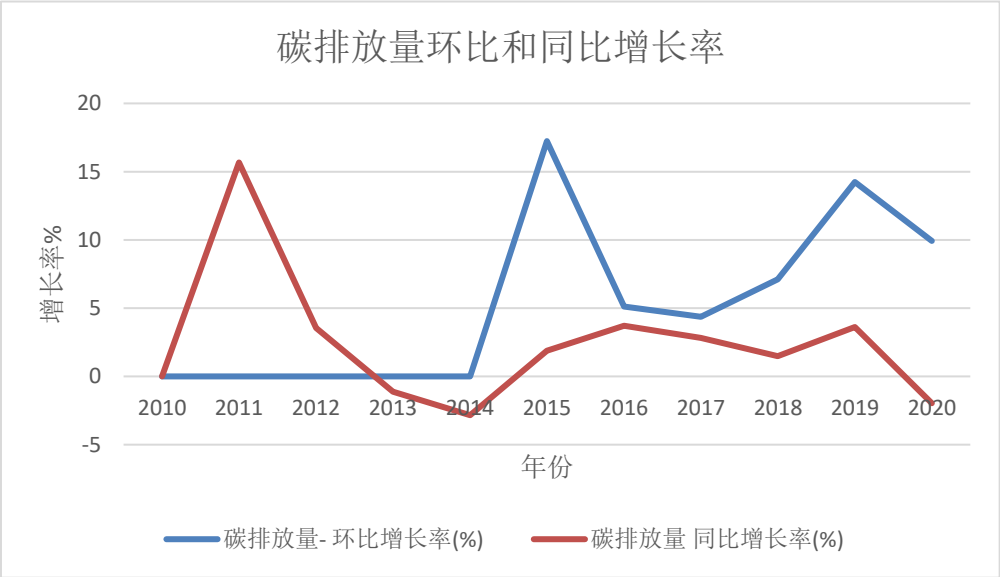


图 3.11 碳排放量环比和同比增长图

从图 3.11 可以看出 2010-2020 年碳排放量的环比和同比增长率均呈现出下降趋势，并趋于负增长率。其中十二五期间碳排放量同比增长率均呈现出较为明显的下降趋势，而十三五期间碳排放量的环比增长率的下降趋势较为平缓。可见碳排放量的环比和同比增长率已经得到了有效的控制。

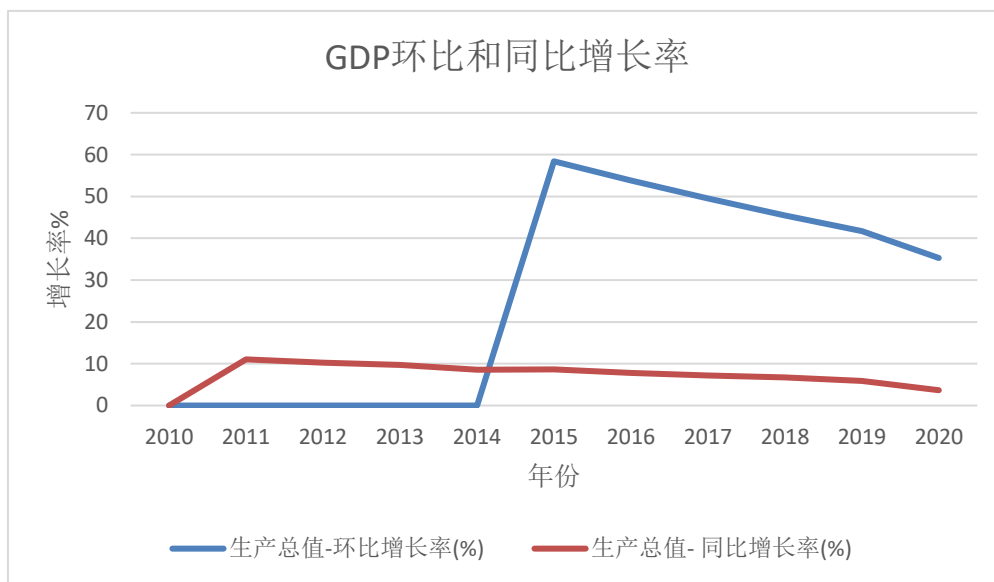


图 3.12 生产总值环比和同比增长图

图 3.12 展示了 2010-2020 年生产总值环比和同比增长率的变化，可以看出生产总值环比和同比的增长率都呈现出下滑趋势，其中同比增长率的下滑趋势更加明显，而环比增长率的下滑趋势较为缓和。由此可见我国之前高速的生产总值增长已经趋于稳健。

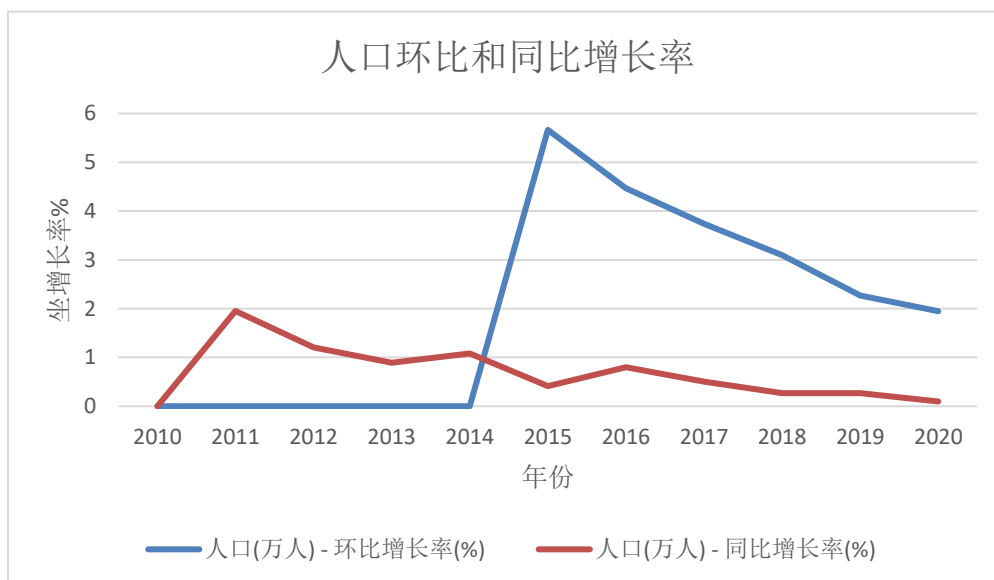


图 3.13 人口环比和同比增长图

从 3.13 可以看出 2010-2020 年人口量的环比和同比增长率均呈现出较为明显下降趋势，并趋向于负增长率。其中十二五期间人口数量的同比和环比增长率下降趋势是非常显著的，而在十三五期间碳排放量的环比增长率则变为平缓的下降。可见人口数量增长在经过 11 年的演变后已经趋向于负增长。

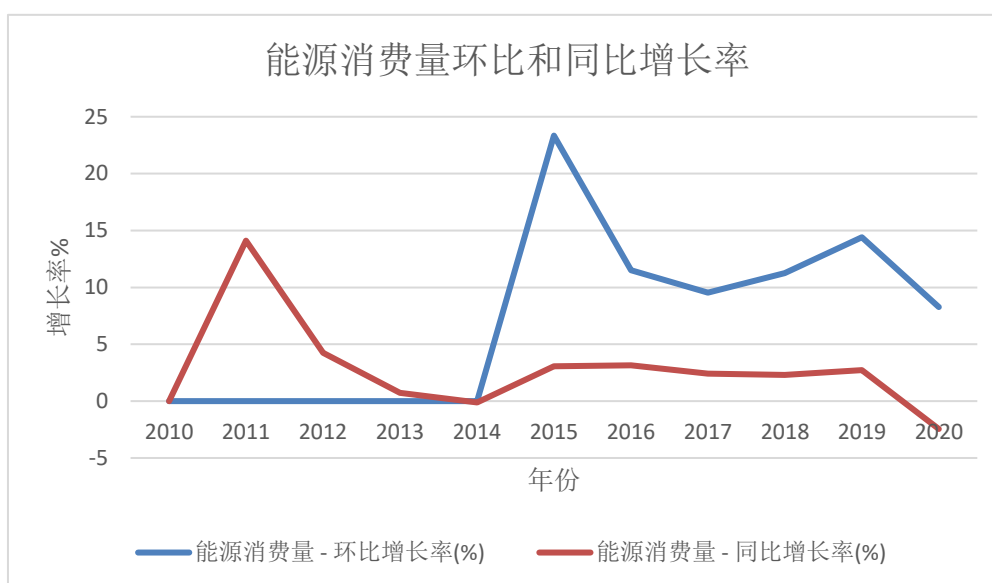


图 3.14 能源消费量环比和同比增长率

图 3.14 展示了 2010-2020 年能源消费量的环比和同比增长率变化，可以看出能源消费量环比和同比的增长率在整体上都呈现出下滑趋势，其中十二五期间同比和环比增长率的下降趋势极为明显，而十三五期间同比和环比增长率的下滑趋势则更为平缓。可见我国近年来能源消费量的增长趋势即将进入到负增长阶段，能源消费量将出现缓慢减少。

## （二）建立各项指标间的关联模型

为了对各个指标间的关联进行描述，采用了斯皮尔曼相关系数来具体量化各个指标间的相关性。

斯皮尔曼相关系数（Spearman's rank correlation coefficient）是一种统计方法，用于度量两个变量之间的相关程度。与皮尔逊相关系数不同，斯皮尔曼相关系数是根据数据的秩次（即排序）来计算的，而不依赖于原始的数值。它常用于分析非线性关系、处理异常值，并且在数据倾斜或有序的情况下表现良好。这一方法在各个领域的数据分析和研究中广泛应用，有助于理解变量之间的关系。

斯皮尔曼相关系数的取值范围在-1 到 1 之间，其中 1 表示完全正相关，-1 表示完全负相关，0 表示无关。它衡量的是两个变量的单调关系，即随着一个变量的增加，另一个变量是如何变化的<sup>[3]</sup>。斯皮尔曼相关系数  $\rho$  的表达式如下：

$$\rho = \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.18)$$

其中  $n$  是样本的数量， $d_i$  代表数据样本  $x_i$  和  $y_i$  之间的等级差。同时为了分析相关指标的变化，分别选用了十二五时期和十三五时期的该区域碳排放相关的指标。选取的指标分别为：

表 3.8 选取的各项指标

十二五时期数据	十三五时期数据
人口	人口
GDP	GDP
一产农业消费部门的增加值	一产农业消费部门的增加值
二产工业消费部门的增加值	二产工业消费部门的增加值
三产增加值	三产增加值
能源消费总量	能源消费总量
化石能源消费量	化石能源消费量
非化石能源消费量	非化石能源消费量
碳排放量总量	碳排放量总量
第一产业的农林消费部门碳排放量	第一产业的农林消费部门碳排放量
第二产业的工业消费部门碳排放量	第二产业的工业消费部门碳排放量
第三产业碳排放量	第三产业碳排放量
居民生活消费碳排放量	居民生活消费碳排放量

要衡量任意两个指标间的关联关系，计算任意两个指标间的斯皮尔曼系数，为了更清晰地进行展示，对选取的指标使用了斯皮尔曼热力图（Spearman Heatmap）。

斯皮尔曼热力图是一种基于斯皮尔曼等级相关系数的数据可视化方法。斯皮尔曼等级相关系数是一种非参数统计量，用于衡量两个变量之间的单调关系。斯皮尔曼热力图通常用于显示多个变量之间的相关性，并可通过颜色编码来表示相关性的强度。

将斯皮尔曼系数矩阵可视化为热力图。在热力图中，你可以使用不同的颜色来表示相关系数的强度，例如使用冷色调表示负相关，暖色调表示正相关，颜色的深浅表示相关性的强弱。各项指标间的斯皮尔曼相关系数热力图如图 3.15 所示。



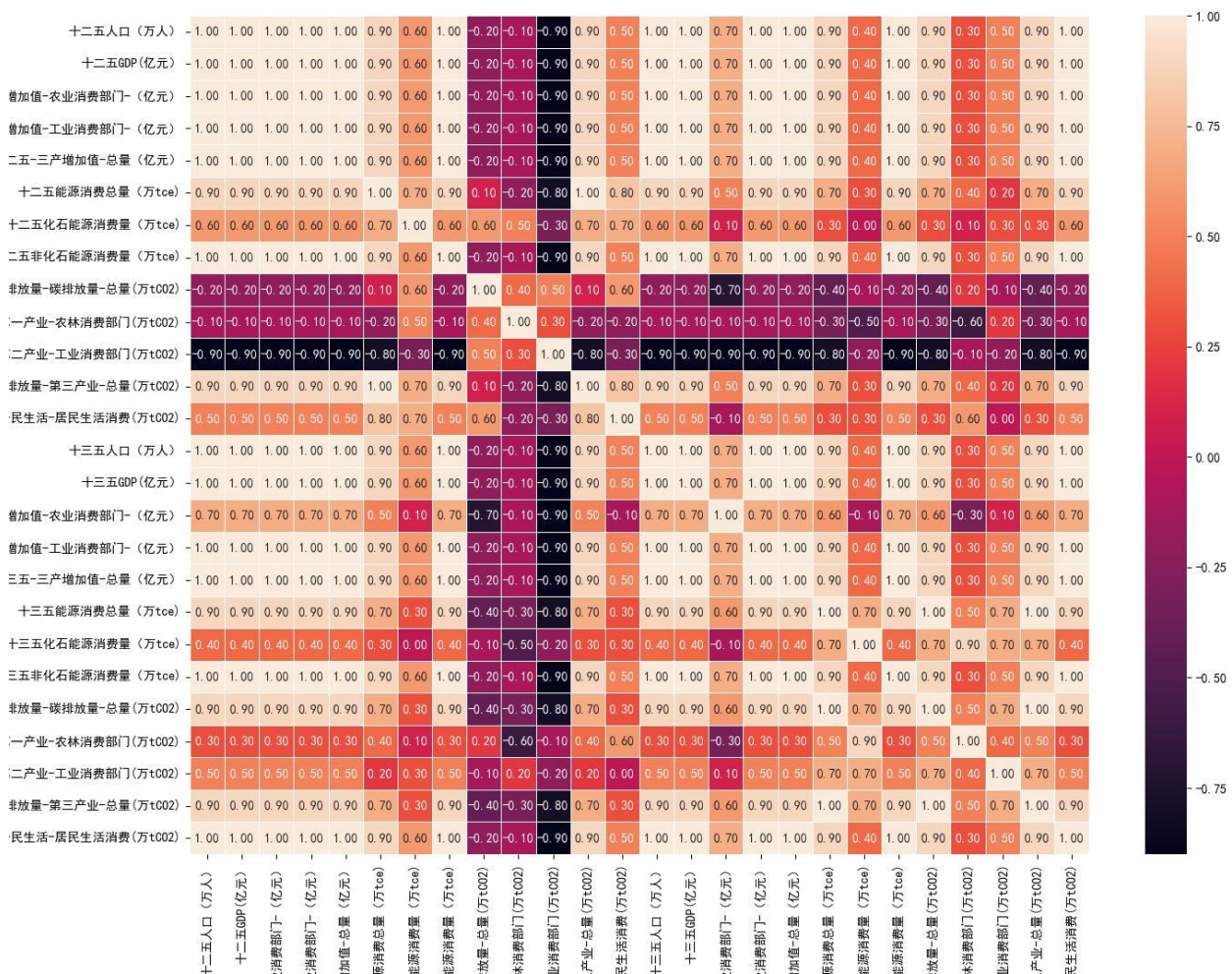


图 3.15 各项指标间的斯皮尔曼相关系数热力图

由图 3.15 可以得到各项指标间的斯皮尔曼相关系数，构建各项指标间的关联关系模型。四个一级指标间存在正相关性，选取的二级指标中的大部分也都存在着较高的正相关性。但部分指标如农业消费部门的多项指标与其他二级指标相关性较低，大部分都是存在微弱的负相关关系，此外工业消费部门的部分指标与其他的指标几乎达到了完全的负相关。碳排放量与许多二级指标的相关系数也较小，只与其他一级指标及农业消费部门和居民消费部门的部分指标相关性较高。

### （三）碳排放模型参数确定

要确定碳排放预测模型的参数，需要考虑多重因素。

首先，双碳政策是指一种旨在应对气候变化和减少碳排放的政策框架。它主要包括两个关键目标：碳达峰，即努力控制二氧化碳排放量在某一特定时间点之前达到峰值，之后逐渐减少；碳中和：即通过减少排放和增加吸收，使总体的碳排放量与吸收量达到平衡，实现净零碳排放。双碳政策要达成这两个关键目标，就必须控制碳排放量的增长[4]。

第二，技术进步给能源的消费提供了更加高效、清洁的方式，大大提高了能源利用效率，就是产生同等经济价值时消耗的能源更少，减少消耗能源时的碳排放。

第三，清洁能源和低碳排放能源开始得到推崇，如风力、水力等可再生能源成本逐渐降低，非化石能源的比例也将逐渐增大，对已知碳排放量的增长也起到积极作用。

结合上述因素，将能源利用效率、非化石能源消费比重作为碳排放预测模型的中需

要事先取值的参数。

此处将能源利用效率定义为 GDP 与能源消费总量的比值，能源利用效率越高，产生同等经济价值时消耗的能源就越少，从而碳排放就越少；将非化石能源消费比重定义为能耗品种结构中除煤炭、油品、天然气外的能源品种消费量之和与能源消费量总量的比值。由此得到表 3.9 和表 3.10：

表 3.9 能源利用效率及增长率

年份	能源利用效率（万元/tce）	能源利用效率增长率
2010	1.758075	0
2011	1.710819	-2.688%
2012	1.809343	5.759%
2013	1.970709	8.918%
2014	2.142646	8.725%
2015	2.257797	5.374%
2016	2.359615	4.510%
2017	2.469921	4.675%
2018	2.576336	4.308%
2019	2.654755	3.044%
2020	2.820892	6.258%

表 3.10 非化石能源消费比重及增长率

年份	非化石能源消费比重（%）	非化石能源消费比重增长率
2010	3.61%	0
2011	3.18%	-11.947%
2012	3.66%	15.164%
2013	4.36%	19.249%
2014	5.34%	22.313%
2015	5.18%	-2.844%
2016	5.39%	3.955%
2017	6.31%	17.113%
2018	7.45%	18.120%
2019	8.06%	8.161%
2020	8.71%	8.025%

为了更加直观的分析这两个因素及其增长率的变化，绘制出图像。

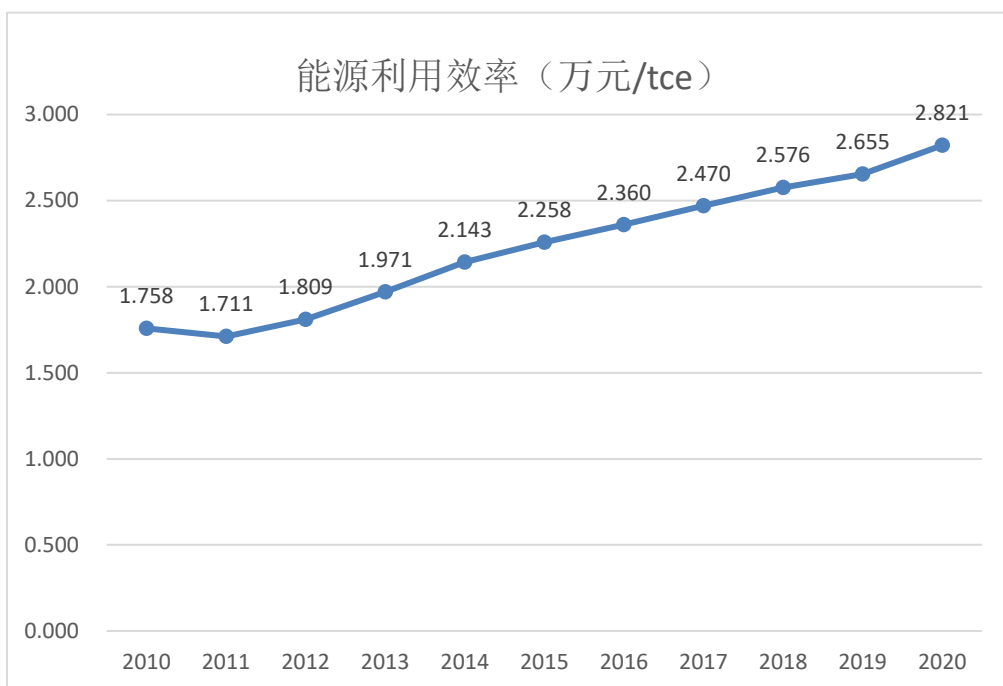


图 3.16 2010 到 2020 年的能源利用效率

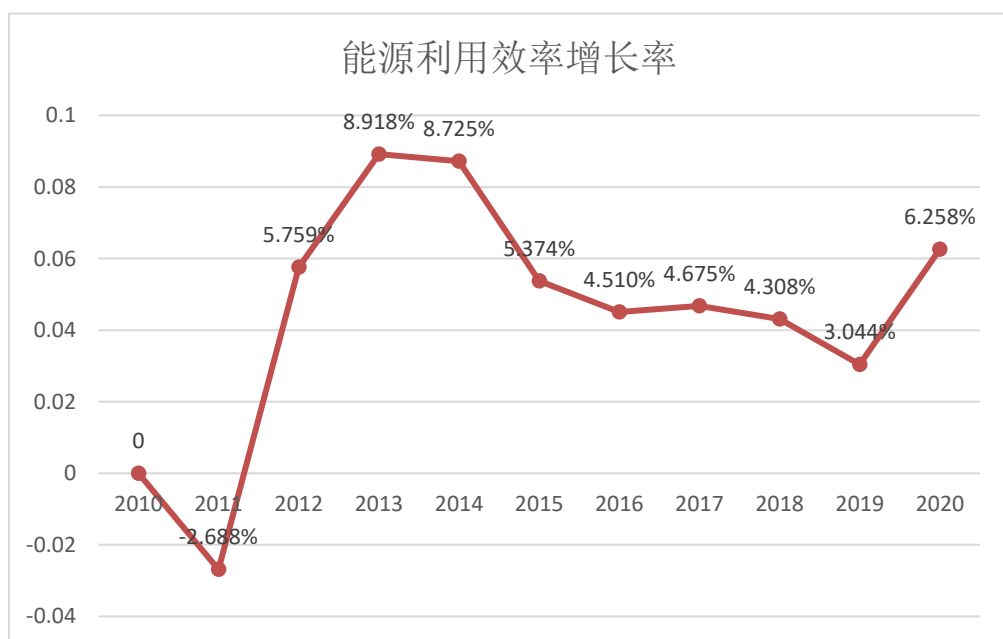


图 3.17 2010 到 2020 年的能源利用效率增长率

由图 3.16 可以看出，能源利用效率除了 2011 年降低了 0.47 万元/tce 以外，始终保持逐年上涨的趋势。从 2010 年的 1.758 万元/tce，到 2020 年的 2.821 万元/tce，总体上升了 60.466%，说明现在生产同等的 GDP 所需要的能源较以往减少了。

由图 3.17 可以看出，2011 年到 2020 年能源利用率的增长率存在着一些波动，但除了 2011 年外一直是正增长。在 2012 年和 2013 年达到了最高两年的增长率，分别为 8.918% 和 8.725%，在 2011 年增长率最低为 -2.688%。虽然有一年增长率为负，但总体上能源利用率始终保持增长趋势。



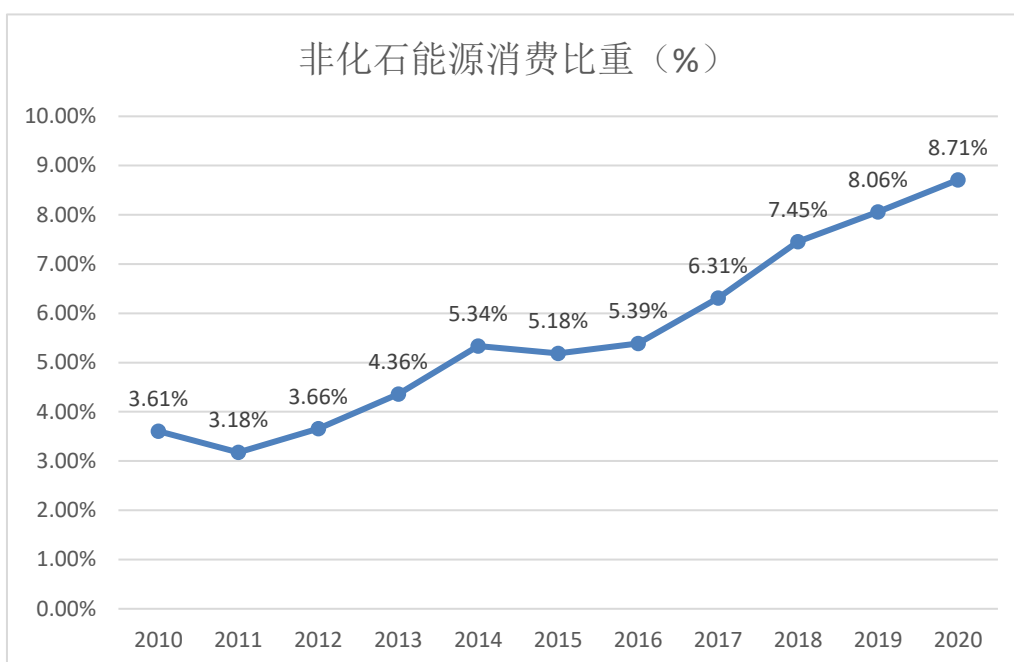


图 3.18 2010 到 2020 年的非化石能源消费比重

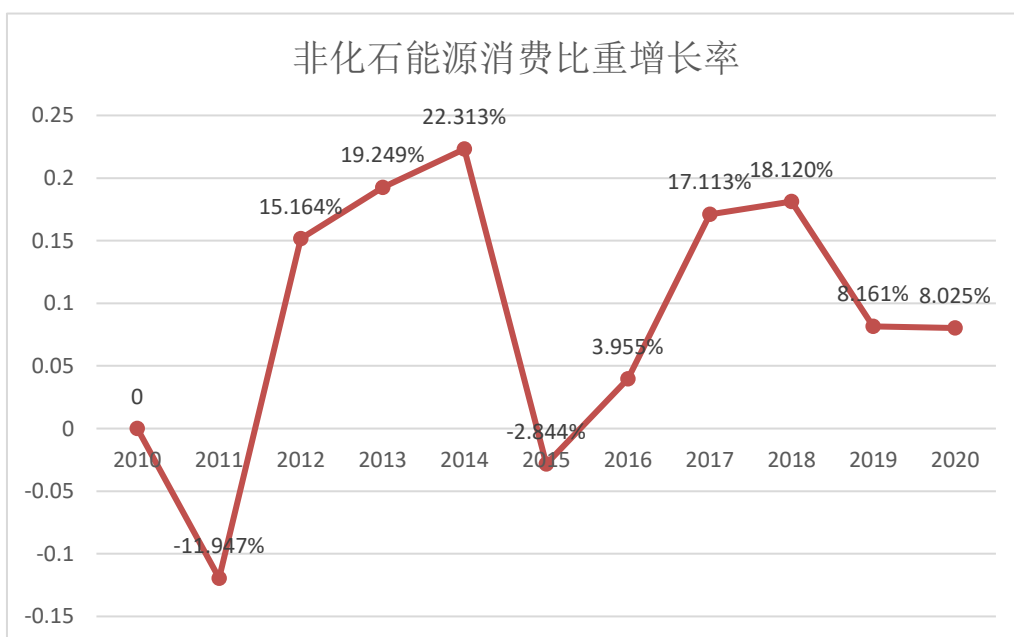


图 3.19 2010 到 2020 年的非化石能源消费比重增长率

由图 3.18 可以看出，2010 年到 2020 年非化石能源消费比重整体上呈现上涨趋势。除了 2011 年和 2015 年略低于前一年外，非化石能源消费比重始终保持着稳步上升，从 2010 年的 3.61% 到 2020 年的 8.71%，上涨了 141.274%，说明非化石能源正在逐步得到重视和使用，消耗单位能源的碳排放也会因此逐步减少。

由图 3.19 可以看出，非化石能源消费比重增长率波动较大，最高在 2014 年达到 22.313%，但随后在下一年 2015 年却降到了负增长，在之后几年才又开始稳步上涨。非化石能源消费比重增长率在 2011 年达到最低的 -11.947%，在 2015 年也为负增长为 -

2.844%，此外年份都为正增长。在这些年份中，虽然有部分年份非化石能源消费比重有所降低，但总体上还是保持着增加趋势。

基于上述分析，得到了能源利用效率和非化石能源消费比重的变化趋势：能源利用效率近十年的平均增长率为 4.888%，非化石能源消费比重近十年的平均增长率为 9.731%。这些参数取值可以作为碳排放预测模型的初始估计值，但在具体模型中可以结合实际进行调整。

## 4. 问题二模型建立与求解

### 4.1 数据预处理

根据附表所提供的数据、非化石能源消费比重  $p_{nfec}$  及非化石能源发电比重  $p_{nfeg}$  的定义可以得出 2010 年至 2020 年非化石能源消费比重及非化石能源发电比重数据，如表 4.1 及表 4.2 所示。

非化石能源消费比重=非化石能源消费量/能源消费量≈非化石能源发电量/能源消费量  
=非化石能源发电比重

非化石能源发电比重=(非化石能源发电量/电力消费量)\*(电力消费量/能源消费量)  
=非化石能源发电占比\*电力消费比重

表 4.1 2010 年至 2020 年非化石能源消费比重

year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
$p_{nfec}$	0.0361	0.0318	0.0366	0.0436	0.0533	0.0518	0.0538	0.0631	0.0745	0.0806	0.0871

表 4.2 2010 年至 2020 年非化石能源发电比重

year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
$p_{nfeg}$	0.0102	0.0092	0.0095	0.0096	0.0130	0.0112	0.0123	0.0162	0.0222	0.0266	0.0306

根据附表所提供的数据、各能源消费部门二次能源消费比重的定义可以得出 2010 年至 2020 年各部门电力消费比重数据，如表 4.3 所示，其中记农林消费部门电力消费比重为  $p_{cs1}$ 、工业消费部门电力消费比重为  $p_{cs2}$ 、交通消费部门电力消费比重为  $p_{cs3}$ 、建筑消费部门电力消费比重为  $p_{cs4}$ 、居民生活消费电力消费比重为  $p_{cs5}$ 。

某部门二次电力消费比重=某能源消费部门二次能源消费量/某能源部门能源消费总量=(某能源消费部门电力能源消费量+某能源消费部门热力能源消费量+某能源消费部门其他能源消费量)/某能源部门能源消费总量

表 4.3 2010 年至 2020 年各能源消费部门电力消费比重

year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
$p_{cs1}$	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.001	0.002
$p_{cs2}$	0.147	0.143	0.146	0.156	0.162	0.159	0.161	0.165	0.167	0.147	0.143
$p_{cs3}$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.002	0.002
$p_{cs4}$	0.017	0.017	0.018	0.020	0.021	0.022	0.024	0.026	0.030	0.017	0.017
$p_{cs5}$	0.020	0.019	0.021	0.024	0.022	0.022	0.025	0.027	0.030	0.020	0.019

为了建立碳排放量及经济、人口、能量消费量的预测模型，需要对多个因素进行预测，

从而确定碳排放量预测模型的参数。需要预测的模型参数如表 4. 4。

表 4. 4 需要预测的模型参数

数据项	字母缩写	数据项	字母缩写
人口总量	P	GDP 总量	A
非化石能源消费比重	$\rho_{nfec}$	非化石能源发电比重	$\rho_{nfeG}$
农林消费部门能源消费量	E1	工业消费部门能源消费量	E2
交通消费部门能源消费量	E3	建筑消费部门能源消费量	E4
居民生活消费能源消费量	E5	能源供应部门能源消费量	E6
农林消费部门电力消费比重	$\rho_{cs1}$	工业消费部门电力消费比重	$\rho_{cs2}$
交通消费部门电力消费比重	$\rho_{cs3}$	建筑消费部门电力消费比重	$\rho_{cs4}$
居民生活消费电力消费比重	$\rho_{cs5}$	能源消费强度	I

本文采用了灰色预测模型 GM(1,1)对部分参数进行预测，灰色预测模型 GM(1,1)是一种基于灰色理论的预测模型，用于对具有较少可靠数据的系统进行短期预测。灰色理论是一种系统分析方法，它主要用于处理信息不完全、样本数据有限或缺失的问题。灰色理论的核心思想是从不完全、不确定的信息中获取有用的知识，并进行定量分析和预测。灰色预测模型 GM(1,1)可以通过一阶累加生成序列数据，进而进行预测<sup>[5]</sup>，基本原理如下：

假设原始数据序列为  $X^0 = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$ ，其中  $x^{(0)}(t)$  为原始数据的元素。

(1)对原始数据序列进行一次累加得到累加序列  $X^1 = [x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}]$ ，其中  $x^{(t)}$  为累加后的数据。

(2) 建立一阶差分方程模型：

$$\frac{dx^{(t)}}{dt} + ax^{(t)} = b \quad (4.1)$$

其中 a 和 b 是待估的参数，a 代表了相关数值的发展灰数，b 代表了内生控制灰数。

(3) 使用最小二乘法求参数，同时设  $A[ab]^T$  进行预算求解，有  $A=(B^TB)^{-1}B^TY$ ，其中

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(1)}(2) + X^{(1)}(1)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(3) + X^{(1)}(2)] & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}[X^{(1)}(n) + X^{(1)}(n-1)] & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$Y = [X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)]^T \quad (4.3)$$

(4) 代入 a 和 b，可以得到灰色预测模型的基本形式：

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k) = (1 - e^a) + \left[ X^{(0)}(l) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} \quad (4.4)$$

(5)再累减后即可得到预测值，得到的预测值公式为：

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[ X^{(0)}(l) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (4.5)$$

经过灰色预测模型 GM(1,1)的计算后，可以得到需要预测的该区域各消费部门碳排放量的模型参数，结果如表 4.5 所示。

表 4.5 预测的模型参数的值

年份	农林消费 部门能源 消费量	工业消费部 门能源消费 量	交通消费部 门能源消费 量	建筑消费部 门能源消费 量	居民生活消 费能源消费 量	能源供应部 门能源消费 量
2021	449.851	19736.1	2722.233	1112.407	2365.378	6651.047
2022	455.176	20224.96	2876.355	1178.089	2521.185	6532.41
2023	460.533	20725.93	3039.202	1247.649	2687.254	6414.711
2024	465.921	21239.3	3211.268	1321.317	2864.262	6297.94
2025	471.34	21765.4	3393.076	1399.334	3052.93	6182.092
2026	476.791	22304.52	3585.178	1481.958	3254.025	6067.158
2027	482.274	22857	3788.155	1569.46	3468.366	5953.131
2028	487.79	23423.16	4002.625	1662.129	3696.825	5840.005
2029	493.338	24003.35	4229.236	1760.269	3940.333	5727.772
2030	498.918	24597.91	4468.677	1864.204	4199.881	5616.425
2031	504.531	25207.19	4721.675	1974.276	4476.526	5505.958
2032	510.177	25831.57	4988.996	2090.847	4771.392	5396.362
2033	515.856	26471.41	5271.452	2214.301	5085.682	5287.632

2034	521.568	27127.1	5569.899	2345.045	5420.673	5179.76
2035	527.314	27799.03	5885.243	2483.508	5777.73	5072.74
2036	533.094	28487.61	6218.44	2630.147	6158.307	4966.565
2037	538.907	29193.24	6570.502	2785.444	6563.952	4861.228
2038	544.755	29916.35	6942.495	2949.91	6996.316	4756.723
2039	550.636	30657.37	7335.55	3124.088	7457.16	4653.043
2040	556.553	31416.75	7750.857	3308.55	7948.36	4550.181
2041	562.504	32194.93	8189.678	3503.903	8471.914	4448.132
2042	568.49	32992.39	8653.343	3710.791	9029.955	4346.888
2043	574.511	33809.61	9143.258	3929.895	9624.754	4246.444
2044	580.567	34647.07	9660.91	4161.935	10258.73	4146.793
2045	586.659	35505.27	10207.87	4407.677	10934.47	4047.929
2046	592.787	36384.72	10785.8	4667.928	11654.72	3949.845
2047	598.95	37285.96	11396.44	4943.546	12422.41	3852.535
2048	605.15	38209.53	12041.66	5235.438	13240.67	3755.994
2049	611.386	39155.97	12723.41	5544.564	14112.83	3660.215
2050	617.659	40125.86	13443.75	5871.943	15042.43	3565.193
2051	623.968	41119.76	14204.88	6218.652	16033.27	3470.92
2052	630.315	42138.29	15009.1	6585.832	17089.37	3377.392
2053	636.699	43182.05	15858.85	6974.693	18215.04	3284.602
2054	643.12	44251.66	16756.71	7386.513	19414.86	3192.545
2055	649.579	45347.76	17705.41	7822.65	20693.7	3101.215
2056	656.075	46471.02	18707.81	8284.539	22056.79	3010.606
2057	662.61	47622.09	19766.97	8773.699	23509.66	2920.712
2058	669.183	48801.68	20886.09	9291.742	25058.23	2831.528
2059	675.795	50010.49	22068.57	9840.373	26708.8	2743.048
2060	682.446	51249.24	23318	10421.4	28468.1	2655.267

## 4.2 问题二分析及思路

问题二分析思路如图 4.1 所示。首先采用双指数函数拟合 2010 年至 2020 年地区人口变化率，再基于此利用最大似然估计，估计出未来 30 年人口的人口变化率。

在预测经济变化时，基于 2035 年中国人均实际 GDP 水平要比 2020 年翻一番，到 2050 年中国人均实际 GDP 水平要比 2020 年翻两番，构建线性回归模型，并通过最小二乘法对于回归模型进行求解。

在预测能源消费量变化时，假设能源消费量与经济、人口具有线性关系，并以此建立线性回归模型，并通过最小二乘法对该模型进行求解；在预测区域碳排放量时，基于 STIRPAT 扩展模型，综合考虑了各种因素（人口、GDP、能源消费量、不同部门、不同能源消费品种对碳排放、能源供应的品种）对碳排放量的影响，最后基于岭回归模型和 STIRPAT 模型得到了该区域碳排放量预测模型。

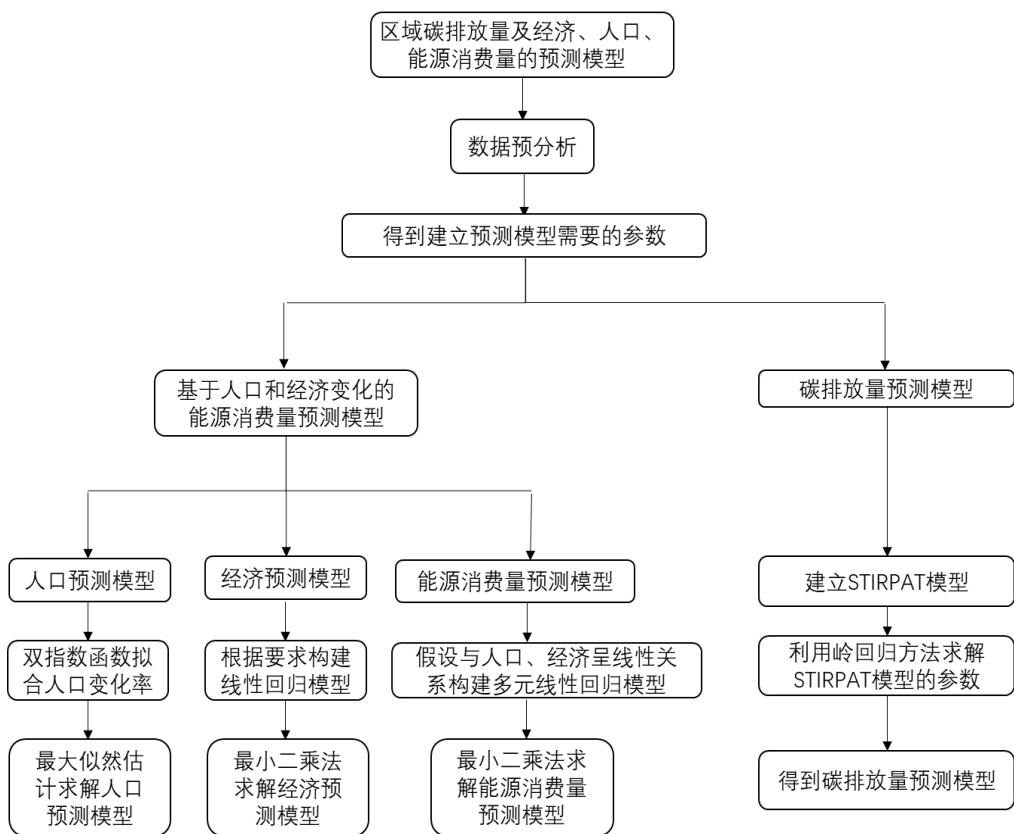


图 4.1 问题二分析思路

4.3 问题二求解

4.3.1 基于人口和经济变化的能源消费量预测模型

（一）人口预测变化

附表 1 中给出的某区域 2010 年至 2020 年常驻人口数据，该数据反映了 10 年内该区域的人口变化趋势，这对未来的人口变化情况有着重要的参考作用。通过绘制人口曲线，如图 4.2 所示：

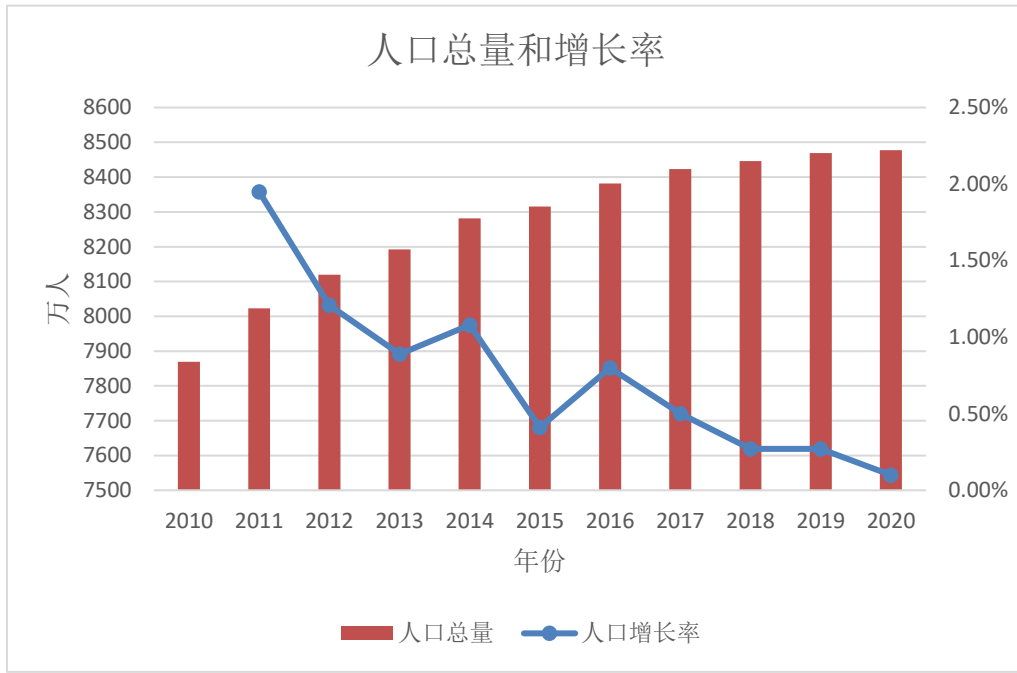


图 4.2 2010 年到 2020 年的人口总量及增长率

可以发现，人口的增长趋势放缓，由此本文通过预测人口的增长率以进一步预测人口变换。通过对人口增长率的拟合，双指数函数拟合可以很好地拟合人口增长率函数，所拟合的双指数函数模型为：

$$y = p_1 e^{p_2 x} + p_3 e^{p_4 x} \quad (4.6)$$

通过 Matlab 中 cftool 的函数拟合器，可以得到  $p_1 = 4.653 \times 10^{206}$ ， $p_2 = -0.2385$ ， $p_3 = -9.88 \times 10^{202}$ ， $p_4 = -0.2349$ 。由于需要预测后 30 年的人口数据，本文考虑了该模型会产生一定的波动，故本文修正了双指数函数模型：

$$y = p_1 e^{p_2 x} + p_3 e^{p_4 x} + p_5 \quad (4.7)$$

最后，本文将上述拟合的参数作为初始值，利用极大似然估计对修正后的双指数模型进行求解。极大似然估计是建立在极大似然原理的基础上的一个统计方法，是概率论在统计学中的应用。极大似然估计提供了一种给定观察数据来评估模型参数的方法，即：“模型已定，参数未知”。通过若干次试验，观察其结果，利用试验结果得到某个参数值能够使样本出现的概率为最大，则称为极大似然估计<sup>[6]</sup>。由于样本集中的样本都是独立同分布，可以只考虑一类样本集，来估计参数向量  $\theta$ 。记已知的样本集为：

$$D = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (4.8)$$

似然函数：联合概率密度函数  $p(D|\theta)$  称为相对于  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  的  $\theta$  的似然函数。

$$l(\theta) = p(D|\theta) = p(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i | \theta) \quad (4.9)$$

如果  $\hat{\theta}$  是参数空间中能使似然函数  $l(\theta)$  最大的  $\theta$  值，则  $\hat{\theta}$  应该是“最可能”的参数值，那么



$\hat{\theta}$ 就是 $\theta$ 的极大似然估计量。它是样本集的函数，记作：

$$\hat{\theta} = d(x_1, x_2, \dots, x_n) = d(D) \quad (4.10)$$

$\hat{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 称为极大似然函数的估计值。

ML 估计：求使得出现该组样本的概率最大的 $\theta$ 值。

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} l(\theta) = \arg \max_{\theta} \prod_{i=1}^n p(x_i | \theta) \quad (4.11)$$

实际中为了便于分析，定义了对数似然函数：

$$H(\theta) = \ln l(\theta) \quad (4.12)$$

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} H(\theta) \quad (4.13)$$

未知参数有多个（ $\theta$ 为向量）时，则 $\theta$ 可表示为具有  $s$  个分量的未知向量：

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s]^T \quad (4.14)$$

记梯度算子：

$$\nabla_{\theta} = [\partial / (\partial \theta_1), \partial / (\partial \theta_2), \dots, \partial / (\partial \theta_s)]^T \quad (4.15)$$

若似然函数满足连续可导的条件，则最大似然估计量就是如下方程的解：

$$\nabla_{\theta} H(\theta) = \nabla_{\theta} \ln l(\theta) = \sum_{i=1}^n \nabla_{\theta} \ln p(x_i | \theta) = 0 \quad (4.16)$$

在对提出的指数函数模型使用上述最大似然估计方法进行模型参数求解后，得到的参数值  $\dot{p}_1 = 4.653 \times 10^{206}$ ， $\dot{p}_2 = -0.2385$ ， $\dot{p}_3 = -9.88 \times 10^{202}$ ， $\dot{p}_4 = -0.2349$ ， $\dot{p}_5 = -0.0002$  故最后得出的人口变化预测模型为

$$y = \dot{p}_1 e^{\dot{p}_2 x} + \dot{p}_3 e^{\dot{p}_4 x} + p_4 \quad (4.17)$$

使用以上人口变化预测模型对 2021-2060 年的人口进行预测后，得到结果如表 4.6，并绘制出如图所示的人口预测图如图 4.3。

表 4.6 人口预测结果

年份	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
人口	8488.248	8496.54	8502.706	8507.196	8510.366	8512.497	8513.81	8514.479	8514.642	8514.406
年份	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
人口	8513.858	8513.063	8512.074	8510.933	8509.672	8508.317	8506.888	8505.401	8503.869	8502.301
年份	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
人口	8500.705	8499.087	8497.451	8495.803	8494.143	8492.476	8490.802	8489.123	8487.441	8485.755
年份	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060
人口	8484.067	8482.378	8480.687	8478.996	8477.303	8475.611	8473.918	8472.225	8470.532	8468.839

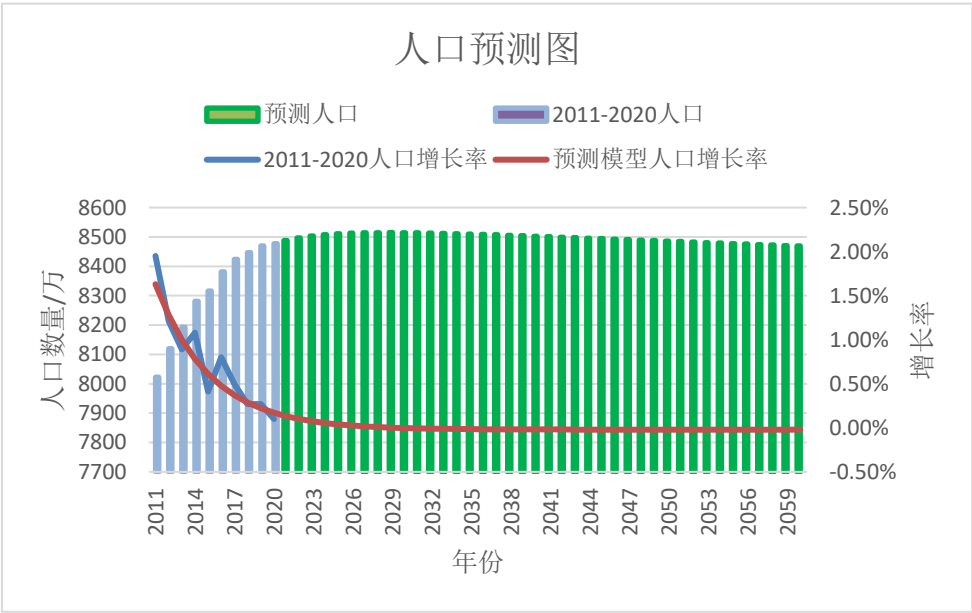


图 4.3 2021-2060 年的人口预测图

从图中可以看出 2011-2020 年我国的人口数量由较快的增长逐渐趋向于缓速的增长，增长率呈现出显著的下降趋势。进入 2021 年后，我国人口增长率变化趋于平缓，人口增长率从趋于负增长到实现负增长经历了一个较为漫长的过程，人口数量在经过短暂的升高后便进入到缓慢下降趋势中。

（二）经济变化预测

基于 2035 年中国人均实际 GDP 水平要比 2020 年翻一番，到 2050 年中国人均实际 GDP 水平要比 2020 年翻两番政策支持，本文首先通过计算达到人均 GDP 翻番的复合人均 GDP 增长率，为了使得年增长率更加复合实际，本文在复合人均 GDP 增长率的基础上增

加了服从标准正态分布的一个随机扰动,从而得到未来 30 年的人均 GDP 增长率 $r$ ,最后建立基于线性回归模型:

$$\min \|at + b - r_t\|_2 \quad (4.18)$$

其中  $a$  和  $b$  为待求解的优化变量,  $t$  为年份变量。对于待求解的参数,采用最小二乘方法来求解。

最小二乘法是一种常用的数据拟合方法。它通过找到使得观测值与拟合值之间差异的平方和最小化的参数估计,来进行数据的最佳拟合。在应用过程中,通过逐步调整参数,使得拟合值尽可能接近观测值,从而找到最优解。最小二乘法广泛应用于统计学、经济学、工程学等领域中的数据分析和回归分析问题<sup>[7][8]</sup>。由此,可利用最小二乘法对增长率曲线和回归函数进行拟合,确定函数系数的取值。变量  $a$  和  $b$  的估计问题可转换成如下的最小二乘优化问题:

$$\min_{a,b} \sum_{t=1}^N (r_t - (at + b))^2 \quad (4.19)$$

其中,自变量  $t$  表示时刻,  $1 \leq t \leq N$ , 因变量  $r_t$  表示  $t$  时刻的增长率。

令  $\theta = [b, a]^T, t = [1, t]$ , 则上述中的优化问题可转换为:

$$\min_{\theta} \sum_{t=1}^N (r_t - t^T \theta)^2 \quad (4.20)$$

对其中参数求导并令其为 0, 即可得到参数的最优解:

$$\theta = \frac{\sum_{t=1}^N r_t t}{\sum_{t=1}^N t^T t} = [b, a]^T \quad (4.21)$$

将公式 4.21 得到的参数代入,得到的经济变化预测模型,即可得到该区域的 GDP 预测值,本文预测了 2021 到 2060 年的该区域的 GDP, 预测结果如表 4.7 及图 4.4 所示。

表 4.7 GDP 预测结果

年份	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>GD P</b>	92896. 67	97308. 06	101926 .6	106761 .9	111823 .9	117123 .3	122671	128478 .4	134557 .7	140921 .4
年份	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
<b>GD P</b>	14758 2.7	154555 .2	161853 .5	169492 .4	177487 .8	185856	194614 .3	203780 .6	213373 .7	223413 .2
年份	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
<b>GD P</b>	23391 9.7	244914 .6	256420 .4	268460 .5	281059 .5	294242 .9	308037 .6	322471 .5	337574	353375 .6
年份	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060
<b>GD P</b>	36990 8.3	387205 .6	405302 .3	424235	444041 .8	464762 .5	486439	509114 .7	532835 .1	557647 .7

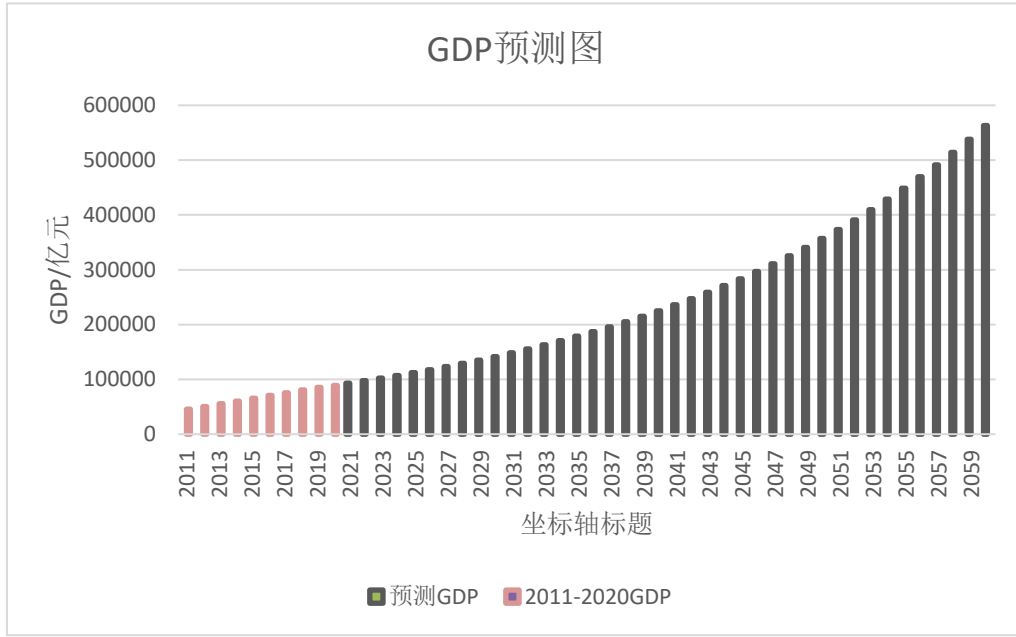


图 4.4 2021-2060 年的 GDP 预测图

从图 4.4 可以看出 2011-2020 年的 GDP 增长率呈现出显著的下趋势，但 GDP 仍处于正增长状态。预测模型给出的是 2021-2060 年间的 GDP 变化趋势，在这一时期，我国 GDP 的增长率总体上处于温和的下趋势，GDP 同样处在正增长状态，GDP 总量在有条不紊的上升，增长率越来越稳健。

### （三）能源消费量预测

本文假设能源消费量与人口、经济具有线性关系，故建立线性模型：

$$EC_t = ay_t + bGDP_t + c \quad (4.22)$$

其中， $t$  表示时刻， $1 \leq t \leq N$ ，自变量  $y_t$  表示  $t$  时刻的人口， $GDP_t$  表示时刻  $t$  的 GDP 总量，因变量  $EC_t$  表示  $t$  时刻的能源消费量， $a$  和  $b$  表示参数变量， $c$  表示随机误差。

使用最小二乘法对模型中的参数  $a$  和  $b$  进行求解，变量  $a$  和  $b$  的估计问题可转换成如下的最小二乘优化问题：

$$\min_{a,b} \sum_{t=1}^N (EC_t - ay_t - bGDP_t)^2 \quad (4.23)$$

与上述参数求解过程类似，令  $\theta'' = [a, b]^T$ ,  $t'' = [y_t, GDP_t]$ ，依据最小二乘法的求解思路，可得出未知参数的求解结果：

$$\theta'' = \frac{\sum_{t=1}^N EC_t t''}{\sum_{t=1}^N t''^T t''} = [b, a]^T \quad (4.24)$$

得到参数解为  $a = 10.1590$ ,  $b = 0.0246$ ,  $c = -56614$ 。

从而能源预测模型为：

$$EC_t = 10.159y_t + 0.0246GDP_t - 55614 \quad (4.25)$$

由得到的能源预测模型，即可得到该区域的能源消费量预测值，本文预测了 2021 到 2060 年的该区域的能源消费量，预测结果如表 4.8 和图 4.5 所示。

表 4.8 能源消费量预测结果

年份	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
能源消费总量	92902.56	97320.73	101947	106791	111863	117173.6	122733.9	128555.4	134650.4	141031.6
年份	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
能源消费总量	147712.2	154706.3	162028.3	169693.4	177717.7	186117.7	194910.8	204115.4	213750.4	223835.7
年份	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
能源消费总量	234392.2	245441.8	257007.1	269112	281781.5	295041.6	308919.5	323443.9	338644.3	354552.1
年份	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060
能源消费总量	371199.8	388621.4	406852.6	425930.7	445894.4	466784.7	488643.9	511516.6	535449.3	560490.7

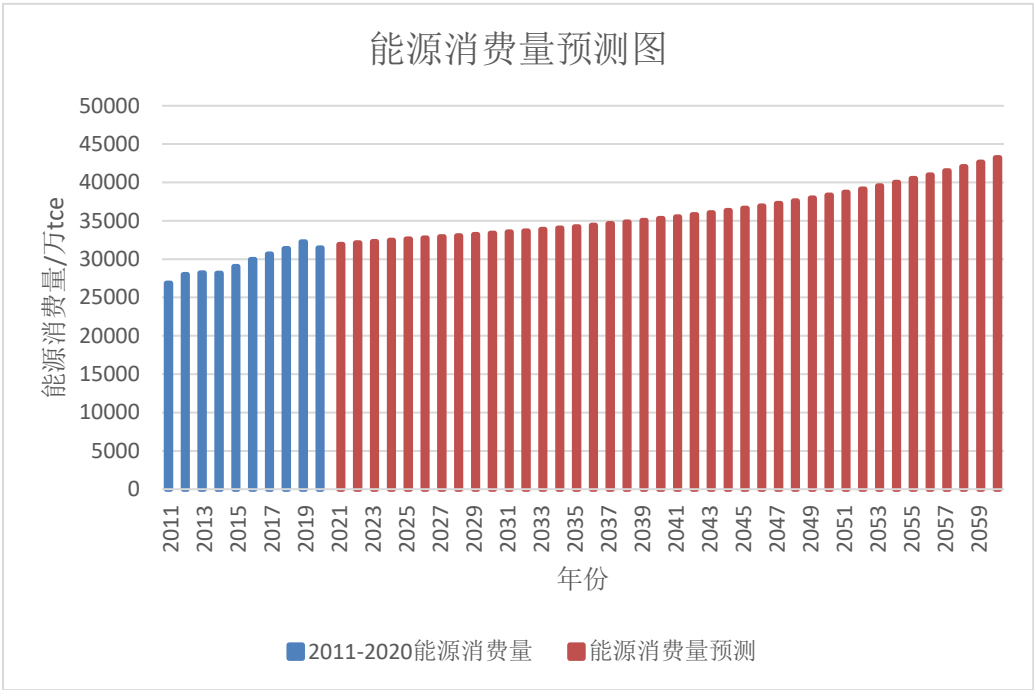


图 4.5 2021-2060 年的能源消费量预测图

从图中可以看出 2011-2019 年间我国能源消费量增长较为迅猛，在模型预测的 2021-2060 年期间我国的能源消费量增长趋势得到缓和，但总体上仍然处于增长状态，能源消费量的增长率迅猛上升的势头得到控制。

### 4.3.2 区域碳排放量预测模型

由于区域碳排放量与人口、GDP、能源消费量、不同能源消费部门、不同能源消费品种对碳排放等因素相关，若利用多元线性回归建立如此多变量模型将会得到不理想的结果。本文引入可拓展的随机性的环境影响评估的 STIRPAT 非线性评估模型，对多变量进行环境影响评估。

STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology)是可拓展的随机性的环境影响评估模型，STIRPAT 模型主要是在 IPAT 等式的基础上去进行发展而得到的一种非线性的模型，伴随着其自身扩展性的提升，可以引入多个独立变量进行环境影响评估，并对每个独立变量对环境压力的影响进行测试。该模型的应用范围非常广泛，可以用于研究气候变化、土地利用、水资源管理、能源消耗等方面的问题<sup>[9][10]</sup>。其模型等式为：

$$K = aP^b A^c T^d g \quad (4.26)$$

其中  $K$  是碳排放总量， $P$  代表常驻人口， $A$  代表 GDP 总量， $T$  代表能源消费总量， $a$  是模型的总系数， $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别代表人口总量、经济发展、能源消费的弹性系数， $g$  是整个模型的误差。STIRPAT 模型具有很好实用性和适应性，在进行碳排放研究时可以根据现实情况引入合适的自变量，检验各个自变量对环境压力的影响。

对上述 STIRPAT 模型的两边取对数，则该模型变为：

$$\ln K = \ln a + b(\ln P) + c(\ln A) + d(\ln T) + \ln g \quad (4.27)$$

STIRPAT 模型不仅将  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $g$  等多个系数引进来作为参数，也能够对各个因变量进行分解，因此 STIRPAT 模型可以分析各个影响因素对环境的影响，如其中  $b$ 、 $c$ 、 $d$  等系数反映的是人口、经济、能源情况等因素与碳排放的相关性正反与大小。

相关研究表明，在经济社会发展的过程中，影响碳排放的因素不仅包括模型基础的人口数量、经济状况等，同时，碳排放还有两个很重要的影响因素分别是能源消费结构和产业结构，不合理的能源消费结构和产业结构会给碳排放量的控制带来消极影响。因此，可以将原始的 STIRPAT 模型拓展为：

$$\begin{aligned} \ln K = & \ln a + b(\ln P) + c(\ln I) + d(\ln A) + e(\ln P_{nfe}) + f(\ln P_{nfeG}) \\ & + h(\ln E_1) + i(\ln E_2) + j(\ln E_3) + k(\ln E_4) + l(\ln E_5) + m(\ln E_6) \\ & + n(\ln P_{cs1}) + o(\ln P_{cs2}) + q(\ln P_{cs3}) + r(\ln P_{cs4}) + s(\ln P_{cs5}) + \ln g \end{aligned} \quad (4.28)$$

其中  $\ln K$  为因变量， $\ln P$ ， $\ln A$ ...， $\ln P_{cs5}$  为自变量。 $b$ 、 $c$ 、...、 $s$  为弹性系数，表示当  $\ln P$ ， $\ln A$ ...， $\ln P_{cs5}$  每变化 1% 时，分别引起  $I$  的  $b\%$ 、 $c\%$ 、...、 $s\%$  变化。

为了能很好地保证最佳拟合误差、使得参数尽可能地简单且模型的泛化能力强，本文通过引入基于二范数的岭回归模型，完成对模型的求解，岭回归的原理如下：

给定数据集  $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ ，其中  $x \in R^d$ ， $y \in R$ ，考虑最简单的线性回归模型，以平方误差作为损失函数，则优化目标为：

$$\min \sum_{i=1}^m (y_i - w^T x_i)^2 \quad (4.29)$$

当样本特征很多，而样本数相对较少时，上式很容易陷入过拟合。为了缓解过拟合问题，可对上式引入正则化项，若使用 L2 范数正则化，则有：

$$\min \sum_{i=1}^m (y_i - w^T x_i)^2 + \lambda \|w\|_2^2 \quad (4.30)$$

其中正则化参数  $\lambda > 0$ , 上式称为“岭回归”(ridge regression), 通过引入 L2 范数正则化, 确能显著降低过拟合的风险。

当线性回归过拟合时, 权重系数  $w_j$  就会非常的大。岭回归 (Ridge Regression) 可以理解为在线性回归的损失函数的基础上, 加入一个 L2 正则项, 来限制权重  $w$  不要过大。通过确定  $\lambda$  的值可以使得模型在偏差和方差之间达到平衡, 随着  $\lambda$  的增大, 模型的方差减小, 偏差增大。

岭回归一般写成如下式子形式:

$$Loss = L_0 + \frac{\lambda}{2n} \sum w^2 \quad (4.31)$$

其中  $\lambda$  为正则项系数,  $n$  为训练集大小, 系数  $1/2$  是为了求导方便,  $w$  为参数。

对岭回归表达式进行求偏导, 令其为 0, 即可求解未知参数<sup>[11][12]</sup>。

$$\nabla_w Loss(w) = xx^T w - xy + \lambda w = 0 \quad (4.32)$$

$$w = (xx^T + \lambda I)^{-1} xy \quad (4.33)$$

根据方差扩大因子法, 可以确定  $\lambda = 0.104$ , 通过岭回归方法可以求解出各项的系数:

表 4.9 岭回归方法得到的模型系数

$\lambda=0.2$	常数	$P$	$I$	$A$	$p_{nfec}$	$p_{nfeG}$	$E1$	$E2$
非标准化系数 B	4.509	0.262	0.003	0.022	0.001	0.018	0.029	0.1
$E3$	$E4$	$E5$	$E6$	$p_{cs1}$	$p_{cs2}$	$p_{cs3}$	$p_{cs4}$	$p_{cs5}$
0.024	0.066	0.03	0.251	0.007	-0.08	0.02	0.02	0.013

由此, 可以得到该区域的碳排放量预测模型:

$$\begin{aligned} \ln K = & 4.509 + 0.262(\ln P) + 0.003(\ln A) + 0.022(\ln T) \\ & + 0.001(\ln P_{nfec}) + 0.018(\ln P_{nfeG}) + 0.029(\ln E_1) + 0.1(\ln E_2) \\ & + 0.024(\ln E_3) + 0.066(\ln E_4) + 0.03(\ln E_5) + 0.251(\ln E_6) \\ & + 0.007(\ln P_{cs1}) - 0.08(\ln P_{cs2}) + 0.02(\ln P_{cs3}) + 0.02(\ln P_{cs4}) \\ & + 0.013(\ln P_{cs5}) \end{aligned} \quad (4.34)$$

为了验证得到的模型的准确性, 将 2010 到 2020 年的已知数据带入, 得到的预测值与这十一年碳排放量真实值进行比较, 对比结果如图 4.6 所示。从图中可以看出, 提出的碳排放量预测模型能够很好的拟合真实的碳排放量曲线, 说明提出的预测模型能够很好地对该区域的碳排放量进行预测。



图 4.6 2021-2060 年的碳排放量



## 5. 问题三模型建立与求解

### 5.1 问题三分析及思路

问题三的分析思路如图 5.1 所示，区域双碳目标的设立和路径规划的制定在应对气候变化和促进可持续发展方面具有深远的学术和政策意义。碳达峰目标和碳中和目标为一个地区或国家的碳减排策略确立了明确的长期愿景和短期目标，为政府、企业和社会提供了清晰的导向。首先，通过在不同情景下设定不同的碳达峰和碳中和目标，能够有效构建可持续发展的战略愿景，有助于为政策和行动提供明确的指导。接着，根据情景目标的设定，我们可以调整与碳排放相关的关键指标（如人口、GDP、非化石能源消费比例、各消费部门能源消费量、各消费部门二次能源消费比例等），以更准确地反映碳减排潜力和挑战。随后，通过对各种情景下的碳排放进行预测，我们能够定量评估实现这些目标所需的努力和资源。最终，通过与碳达峰和碳中和目标的比较，我们可以确定达标进展，同时也能够识别需要不断改进和调整的领域，以完成对双碳目标达成的路径规划。

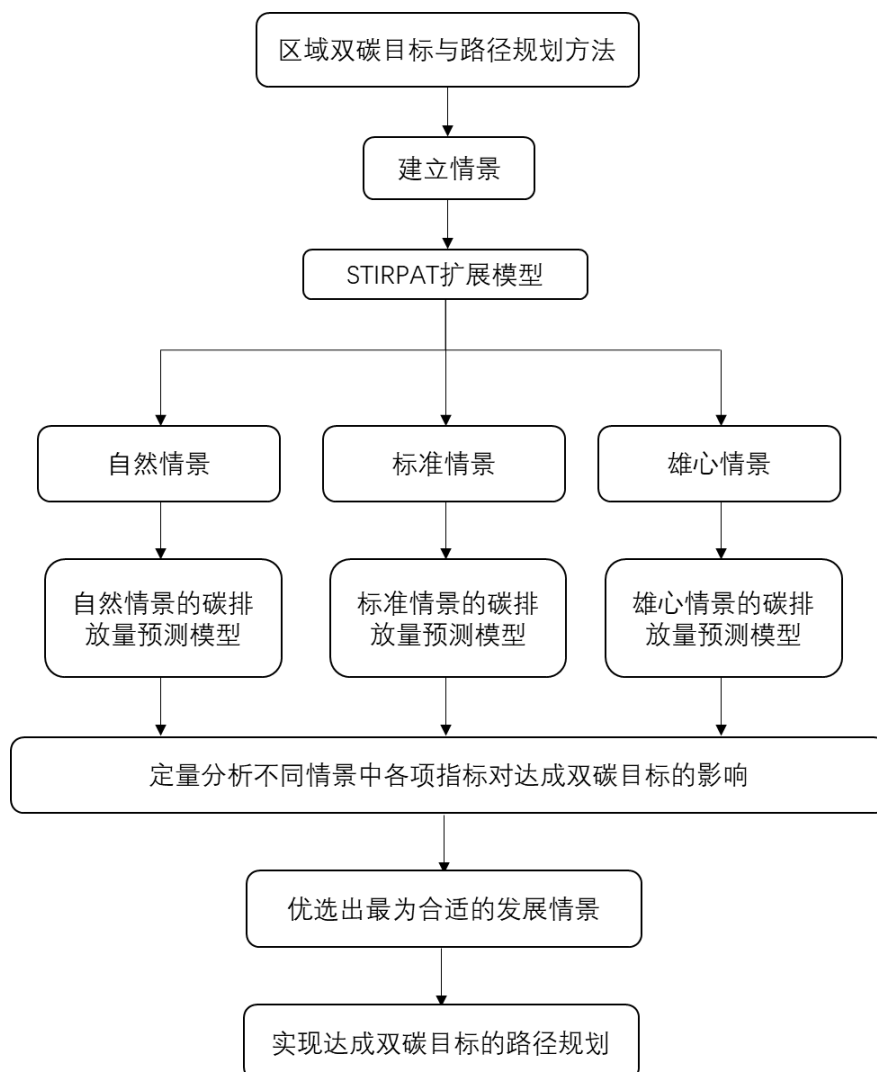


图 5.1 问题三分析思路

### 5.2 情景设计

上文通过引入 STIRPAT 拓展模型及基于二范数的岭回归模型，构建了某区域的碳排放预测模型。本章将借助情景分析法，确定影响碳排放的核心要素，并且根据核心要素的未来趋势变化的多样性进行制定相关的情景，随后进行参数设置并组合，尽可能详细地设定多种发展情景，再基于上文模型对不同情景下 2021-2060 年碳排放量进行仿真预测，对各个情景诸葛分析、对比，最后优选出较为合适的发展情景，力求寻找适合该区域低碳经济发展的最佳路径<sup>[13][14]</sup>。

本文以 2020 年为基期，预测年份截止至 2060 年。由于预测时间跨度大，本文将依据我国的五年规划期、争取 2030 年实现碳达峰及 2060 年实现碳中和的两个时间点，将预测时间共分为 6 个阶段：第一阶段为 2021 年至 2025 年，第二阶段为 2026 年至 2030 年，第三阶段为 2031 年至 2035 年，第四阶段为 2035 年至 2040 年，第五阶段为 2041 年至 2050 年，第六阶段为 2051 年至 2060 年。本文拟对人口规模、经济增长、非化石能源消费比重、非化石能源发电比重、二次能源消费比重（电力）、能源利用率进行详细的参数设置。

(1)人口规模：通过分析数据，该区域 2010 年至 2020 年的平均人口增长率为 0.75%。

《国务院人口发展规划（2016-2030 年）》文件中提到，在“十四五”以后受育龄妇女人数减少以及人口老龄化不断的加快等多因素的影响，人口增长势头将放缓。相比于十三五规划中“全面二孩”政策实施后，生育水平的小幅回升，十四五期间人口自然增长率极有可能会出现负值。通过本文章节 4.3 对人口规模的预测，预计在无政策调节的情况下，将于 2030 年达到人口峰值，则第一个阶段和第二个阶段人口年增长率将逐渐降至 0，从第三个阶段开始呈现负增长。由此，设定自然情景发展模式下，第一阶段的平均人口年均增长率为 0.05%，剩下五个阶段的平均增长率分别为 0.02%、-0.01%、-0.05%、-0.1%、-0.15%。

在基准情景下，政府出台相应调控政策，第一阶段的平均人口年均增长率为 0.2%，剩下五个阶段的平均增长率分别为 0.1%、0.05%、-0.01%、-0.05%、-0.1%。

在雄心情景下，政府出台各类婚育政策，刺激我国人口增长，由此假设第一阶段的平均人口年均增长率为 0.3%，剩下五个阶段的平均增长率分别为 0.2%、0.1%、0.02%、-0.02%、-0.05%。综上所述，多情景下的人口规模变化曲线如图 5.2 所示。

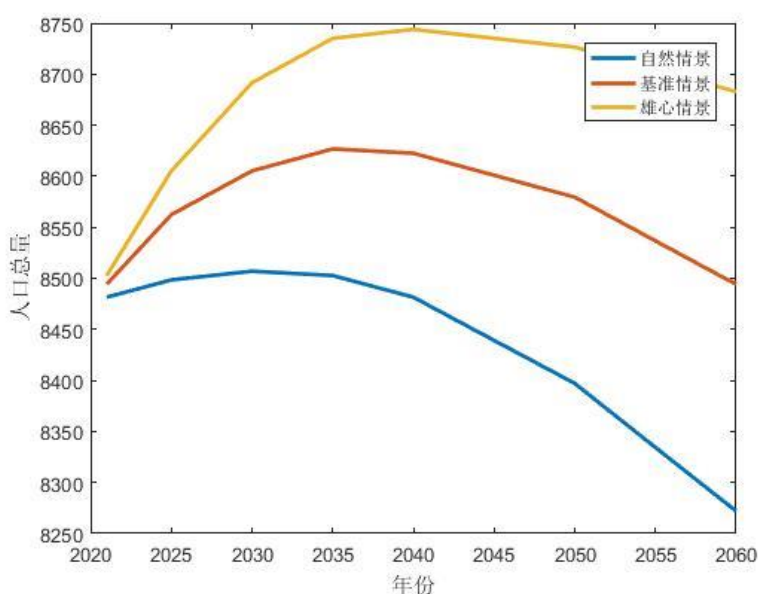


图 5.2 多情景下的人口规模变化曲线

(2) 经济增长：为了实现中华民族伟大复兴，规划在 2035 年基本实现现代化、在

2050 年实现中国式现代化的经济社会目标，这使得我国 2035 年 GDP 比 2020 年翻一番。此外 2060 年 GDP 比 2020 年翻两番。若该区域能与我国目标一致，并如期达成，该区域需要在 2021 年至 2025、2026 年至 2030 年及 2031 年至 2035 年三个阶段至少每年达到 4.73% 的 GDP 增长速率，2036 年至 2040 年、2041 年至 2050 年及 2051 至 2060 年三个阶段至少每年达到 2.81% 的 GDP 增长速率。由此，本文以实现 2035 年及 2060 年 GDP 翻番为目标，设定基准情形，即 2021 年至 2035 年，每年达到 4.75% 的 GDP 增长率；2036 年至 2060 年，每年达到 2.85% 的 GDP 增速率。

通过观察 2010 年至 2020 年 GDP 增长率发现，GDP 增长率逐年下降，在 2020 年时低至 3.66%，若 GDP 增长率无政策干预且跟随原趋势变化时，将进一步下降。由此，本文设置在自然情景下，2021 年至 2025 年 GDP 增长率为 4%，2026 年至 2030 年两个阶段 GDP 增长率为 2%，2031 年至 2035 年 GDP 增长率为 1%，2036 年至 2050 年 GDP 增长率为 0.5%，2051 年至 2060 年 GDP 增长率为 0.25%。

在雄心情景下，假设政府出台超预期经济刺激政策，2021 年至 2025 年 GDP 增长率为 8%，2026 年至 2030 年 GDP 增长率为 7%、2031 年至 2035 年 GDP 增长率为 6%，2036 年至 2050 年 GDP 增长率为 5%，2051 年至 2060 年 GDP 增长率为 3%。综上所述，多情景下的 GDP 变化曲线如图 5.3 所示。

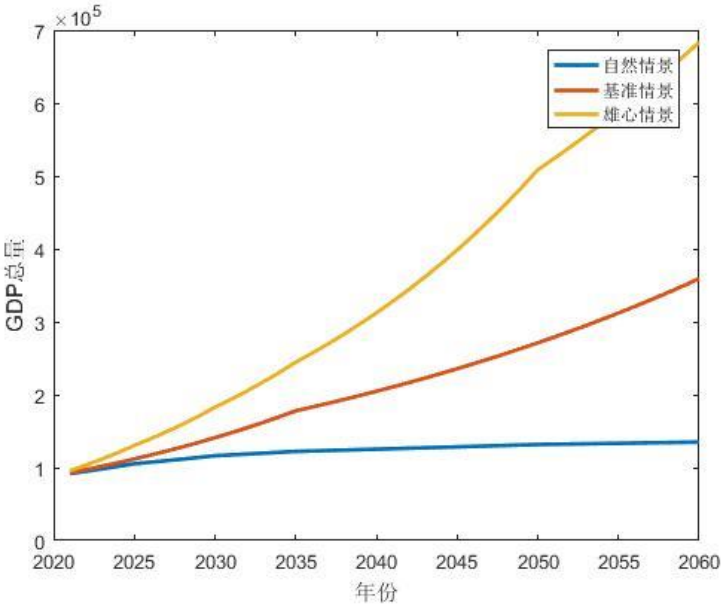


图 5.3 多情景下的 GDP 变化曲线

(3) 非化石能源消费比重：2021 年 9 月国务院发布的《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》中指出 2025 年非化石能源消费比重达到 20% 左右，到 2030 年非化石能源消费比重达到 25% 左右，到 2060 年非化石能源消费比重达到 80%。通过观察数据，2020 年非化石能源消费比重仅为 0.087%，若要 2025 年达成目标，则需要 2021 年至 2025 年非化石能源消费比重增长率需要每年达到 18.1%，2026 年至 2030 年非化石能源消费比重增长率需要每年达到 4.6%，2031 至 2060 年非化石能源消费比重增长率需要每年达到 3.95%。由此，本文设置在基准情景下，2021 年至 2025 年非化石能源消费比重增长率需要每年达到 18.5%，2026 年至 2030 年非化石能源消费比重增长率需要每年达到 4.8%，2031 至 2060 年非化石能源消费比重增长率需要每年达到 4%。

在自然情景下，设定 2021 年至 2025 年非化石能源消费比重每年增长率为 8%，2026

年至 2030 年非化石能源消费比重每年增长率为 3%，2031 至 2060 年非化石能源消费比重每年增长率为 2%。

在雄心情景下，设定 2021 年至 2025 年非化石能源消费比重每年增长率为 25%，2026 年至 2030 年非化石能源消费比重每年增长率为 10%，2031 至 2050 年非化石能源消费比重每年增长率为 4%，2051 年至 2060 年非化石能源消费比重每年增长率为 0.5%。综上所述，多情景下的非化石能源消费比重变化曲线如图 5.4 所示。

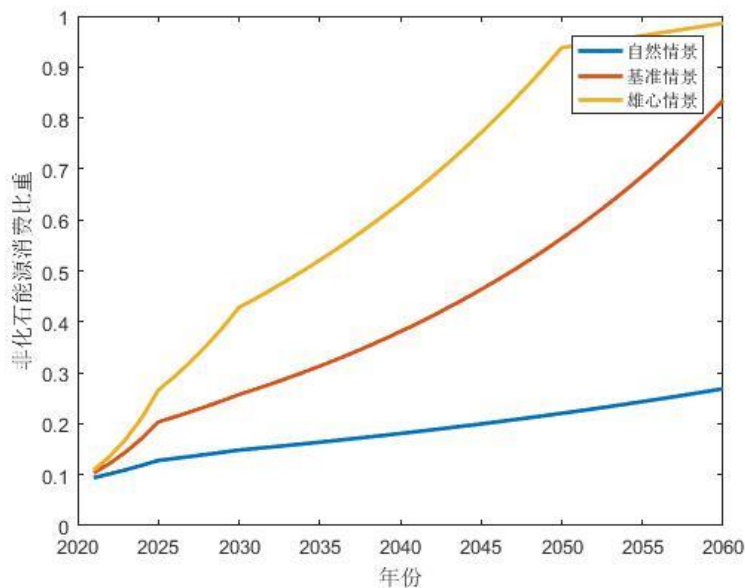


图 5.4 多情景下的非化石能源消费比重变化曲线

(4) 非化石能源发电比重：为了在 2060 年实现全电气化社会，需要非化石能源发电比重达到 90%，通过观察数据发现，在 2020 年非化石能源发电比重仅为 0.031%，因此在 2021 年至 2060 年非化石能源发电比重增长率需要达到每年 8.79% 的增长率，本文设定在基准情景下，在 2021 年至 2025 年非化石能源发电比重年增长率为 20%，2026 至 2030 年非化石能源发电比重年增长率为 15%，在 2031 年至 2035 年非化石能源发电比重年增长率为 15%，2036 至 2040 年非化石能源发电比重年增长率为 10%，2041 至 2050 年非化石能源发电比重年增长率为 5%，2051 年至 2060 年非化石能源发电比重年增长率为 1%。

在自然情景下，本文设定 2021 年至 2025 年非化石能源发电比重年增长率为 15%，2026 至 2030 年非化石能源发电比重年增长率为 10%，在 2031 年至 2035 年非化石能源发电比重年增长率为 5%，2036 至 2040 年非化石能源发电比重年增长率为 5%，2041 至 2050 年非化石能源发电比重年增长率为 1%，2051 年至 2060 年非化石能源发电比重年增长率为 1%。

在雄心情景下，本文设定 2021 年至 2025 年非化石能源发电比重年增长率为 25%，2026 至 2030 年非化石能源发电比重年增长率为 20%，在 2031 年至 2035 年非化石能源发电比重年增长率为 20%，2036 至 2040 年非化石能源发电比重年增长率为 5%，2041 至 2050 年非化石能源发电比重年增长率为 2%，2051 年至 2060 年非化石能源发电比重年增长率为 0.1%。综上所述，多情景下的非化石能源发电比重变化曲线如图 5.5 所示。

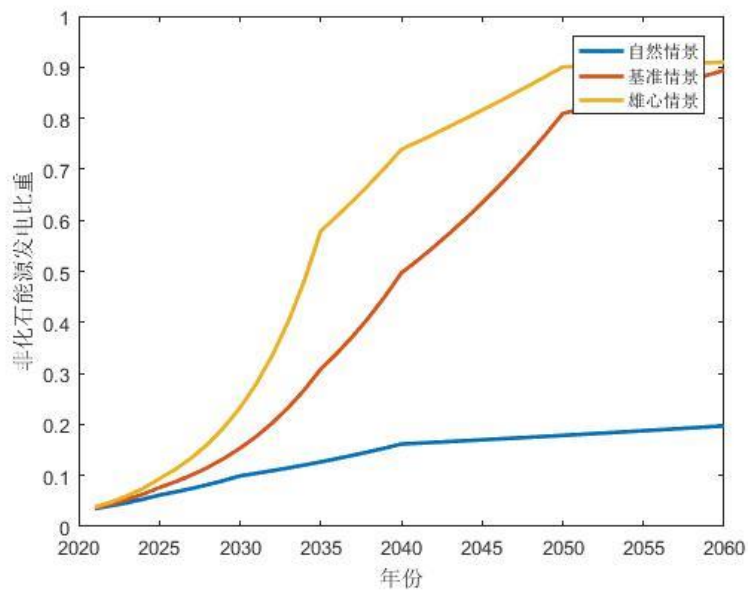


图 5.5 多情景下的非化石能源发电比重变化曲线

(5) 能源利用率：根据《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》，到 2025 年单位 GDP 能耗比 2020 年下降 13.5%，2060 年能源利用效率达到领先水平。因此，本文设定在基准情景下在 2021 年至 2060 年单位 GDP 能耗比年降低 4%。

在自然情景下，本文设定在基准情景下在 2021 年至 2060 年单位 GDP 能耗比年降低 3%。

在雄心情景下，本文设定在基准情景下在 2021 年至 2050 年单位 GDP 能耗比年降低 5%，2051 年至 2060 年单位 GDP 能耗比年降低 2%。综上所述，多情景下的单位 GDP 能耗比变化曲线如图 5.6 所示。

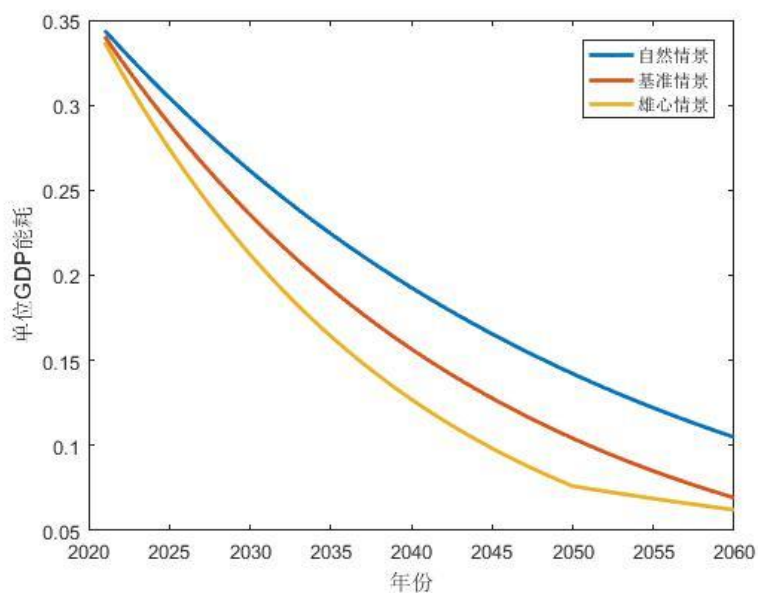


图 5.6 多情景下的单位 GDP 能耗比变化曲线

(6) 二次能源消费比重（电力）：为了在 2060 年实现全电气化社会，需要电力消费



比重达到 90%，因此本文设定在基准情景下，2021 年至 2060 年农林消费部门电力消费比重年增长率为 15.2%，2021 年至 2060 年工业消费部门电力消费比重年增长率为 4.3%，2021 年至 2060 年交通消费部门电力消费比重年增长率为 14.6%，2021 年至 2060 年建筑消费部门电力消费比重年增长率为 8.72%，2021 年至 2060 年居民生活电力消费比重年增长率为 8.77%。

在自然情景下，2021 年至 2060 年农林消费部门电力消费比重年增长率为 10%，2021 年至 2060 年工业消费部门电力消费比重年增长率为 3%，2021 年至 2060 年交通消费部门电力消费比重年增长率为 10%，2021 年至 2060 年建筑消费部门电力消费比重年增长率为 5%，2021 年至 2060 年居民生活电力消费比重年增长率为 5%。

在雄心情景下，2021 年至 2040 年农林消费部门电力消费比重年增长率为 25%，2041 年至 2050 年农林消费部门电力消费比重年增长率为 13%，2051 年至 2060 年农林消费部门电力消费比重年增长率为 0.1%；2021 年至 2035 年工业消费部门电力消费比重年增长率为 10%，2036 至 2040 年工业消费部门电力消费比重年增长率为 5%，2041 年至 2060 年工业消费部门电力消费比重年增长率为 0.1%；2021 年至 2040 年交通消费部门电力消费比重年增长率为 25%，2041 年至 2050 年交通消费部门电力消费比重年增长率为 11%，2051 年至 2060 年交通消费部门电力消费比重年增长率为 0.1%；2021 年至 2035 年建筑消费部门电力消费比重年增长率为 20%，2036 年至 2040 年建筑消费部门电力消费比重年增长率为 10%，2041 至 2050 年建筑消费部门电力消费比重年增长率为 2%，2051 至 2060 年建筑消费部门电力消费比重年增长率为 0.1%；2021 年至 2035 年居民生活电力消费比重年增长率为 20%；2036 年至 2040 年居民生活电力消费比重年增长率为 10%，2041 至 2050 年居民生活电力消费比重年增长率为 2%，2051 至 2060 年居民生活电力消费比重年增长率为 0.1%。综上所述，多情景下的不同部门店里消费比重变化曲线如图 5.7-5.11 所示。

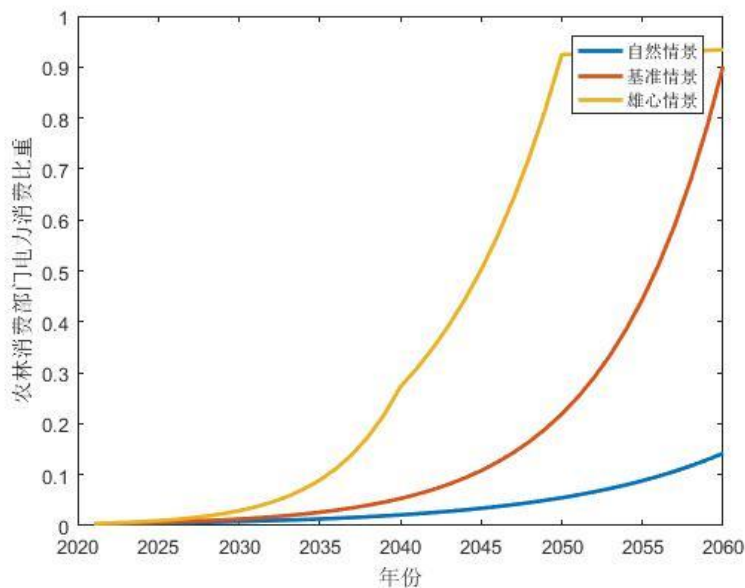


图 5.7 农林消费部门电力消费比重变化曲线

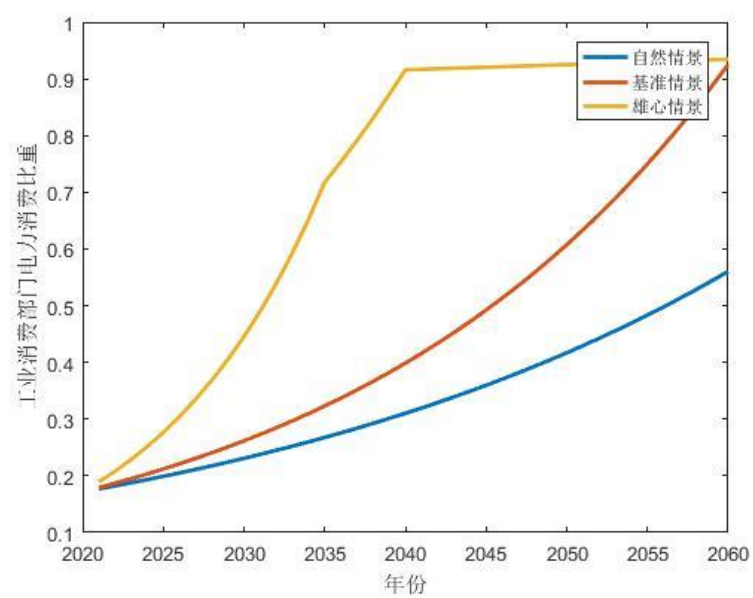


图 5.8 工业消费部门电力消费比重变化曲线

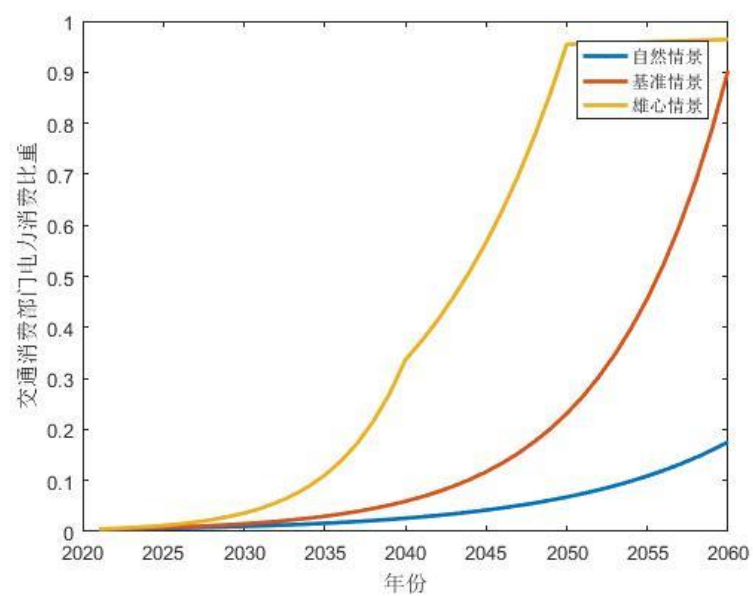


图 5.9 交通消费部门电力消费比重变化曲线

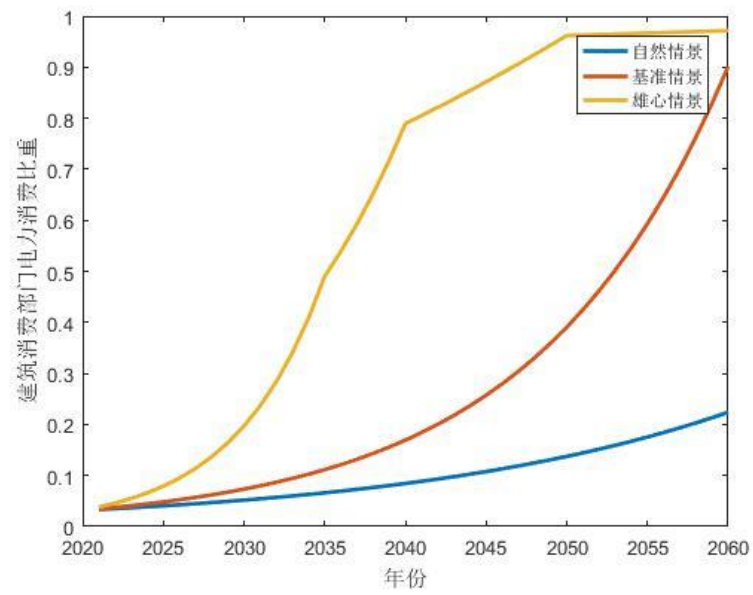


图 5.10 建筑消费部门电力消费比重变化曲线

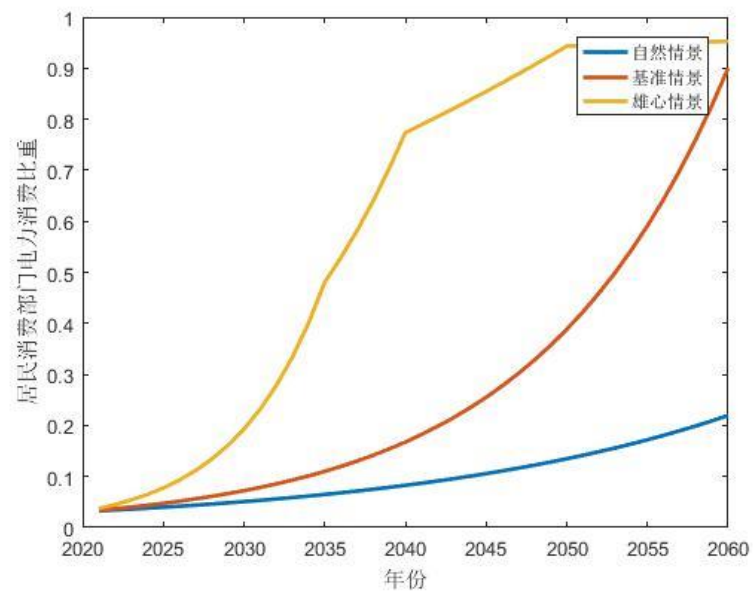


图 5.11 建筑消费部门电力消费比重变化曲线

### 5.2.1 自然情景

基于上述设计，在自然情景下，各影响因素的增长率如下表 5.1 所示



表 5.1 自然情景下各影响因素的年增长率

阶段（年）	2021- 2025	2026- 2030	2031- 2035	2036- 2040	2041- 2050	2051- 2060
人口年均增长率	0.05%	0.02%	-0.01%	-0.05%	-0.1%	-0.15%
GDP 年均增长率	4%	2%	1%	0.5%	0.5%	0.25%
非化石能源消费比重年均 增长率	8%	3%	2%	2%	2%	2%
非化石能源发电比重年均 增长率	15%	10%	5%	5%	1%	1%
单位 GDP 能耗比年均增长 率	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%
农林消费部门电力消费比 重年均增长率	10%	10%	10%	10%	10%	10%
工业消费部门电力消费比 重年均增长率	3%	3%	3%	3%	3%	3%
交通消费部门电力消费比 重年均增长率	10%	10%	10%	10%	10%	10%
建筑消费部门电力消费比 重年均增长率	5%	5%	5%	5%	5%	5%
居民生活消费部门电力消 费比重年均增长率	5%	5%	5%	5%	5%	5%

### 5.2.2 基准情景

基于上述设计，在基准情景下，各影响因素的增长率如下表 5.2 所示

表 5.2 自然情景下各影响因素的年增长率

阶段（年）	2021- 2025	2026- 2030	2031- 2035	2036- 2040	2041- 2050	2051- 2060
人口年均增长率	0.2%	0.1%	0.05%	-0.01%	-0.05%	-0.1%
GDP 年均增长率	4.75%	4.75%	4.75%	2.85%	2.85%	2.85%
非化石能源消费比重年均 增长率	18.5%	4.8%	4%	4%	4%	4%
非化石能源发电比重年均 增长率	20%	15%	15%	10%	5%	1%
单位 GDP 能耗比年均增长 率	-4%	-4%	-4%	-4%	-4%	-4%
农林消费部门电力消费比 重年均增长率	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%
工业消费部门电力消费比 重年均增长率	4.3%	4.3%	4.3%	4.3%	4.3%	4.3%
交通消费部门电力消费比 重年均增长率	14.6%	14.6%	14.6%	14.6%	14.6%	14.6%
建筑消费部门电力消费比	8.72%	8.72%	8.72%	8.72%	8.72%	8.72%

重年均增长率						
居民生活消费部门电力消费比重年均增长率	8.77%	8.77%	8.77%	8.77%	8.77%	8.77%

### 5.2.3 雄心情景

基于上述设计，在雄心情景下，各影响因素的增长率如下表 5.3 所示

表 5.3 雄心情景下各影响因素的年增长率

阶段（年）	2021- 2025	2026- 2030	2031- 2035	2036- 2040	2041- 2050	2051- 2060
人口年均增长率	0.2%	0.1%	-0.01%	-0.05%	-0.1%	-0.15%
GDP 年均增长率	4%	2%	1%	0.5%	0.5%	0.25%
非化石能源消费比重年均增长率	8%	3%	2%	2%	2%	2%
非化石能源发电比重年均增长率	15%	10%	5%	5%	1%	1%
单位 GDP 能耗比年均增长率	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%
农林消费部门电力消费比重年均增长率	25%	25%	25%	25%	13%	0.1%
工业消费部门电力消费比重年均增长率	10%	10%	10%	5%	0.1%	0.1%
交通消费部门电力消费比重年均增长率	25%	25%	25%	25%	11%	0.1%
建筑消费部门电力消费比重年均增长率	20%	20%	20%	10%	2%	0.1%
居民生活消费部门电力消费比重年均增长率	20%	20%	20%	10%	2%	0.1%

### 5.3 多情景下碳排放核算方法及双碳目标与路径规划

通过将章节 5.2 中各因素在不同情景下的预测值带入章节 4.2 的碳排放预测模型中，可以得出 2021 年至 2060 年的碳排放预测曲线，结果如图 5.11 所示。

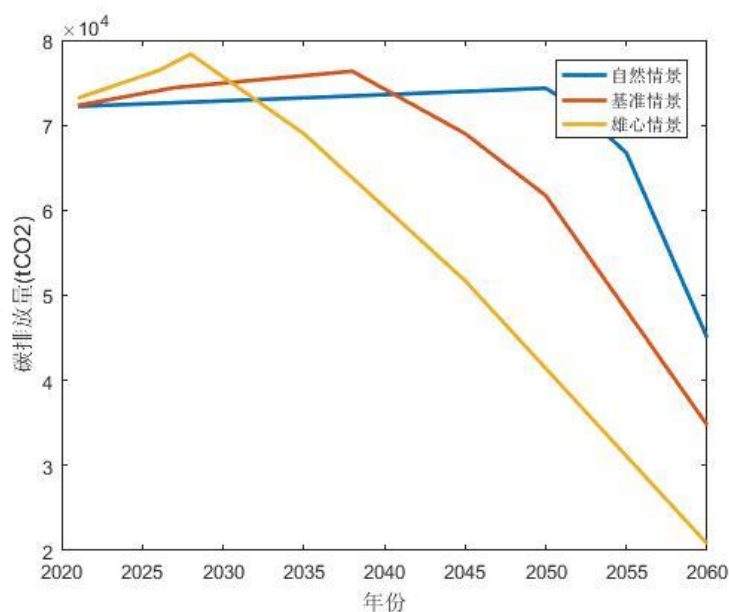


图 5.11 2021 年至 2060 年的碳排放预测曲线

根据预测结果可知，自然情景下能源消耗碳排放峰值出现时间为 2050 年，峰值量约为 75253.283 万 tCO<sub>2</sub>；基准情景下的能源消耗碳排放峰值出现时间为 2038 年，峰值量约为 77484.396 万 tCO<sub>2</sub>；雄心情景下，能源消耗碳排放峰值出现时间为 2028 年，峰值量约为 794832.779 万 tCO<sub>2</sub>，其在 2060 年的碳排放量为 2020 年的 28.6%，若能按照雄心情景发展，该区域能在 2030 年前提前实现碳达峰，在 2060 年前提前实现碳中和。

基于上文自然情景、基准情景和雄心情景下的碳排放量预测结果，可以选择雄心情景作为区域实现双碳目标的路径。表 5-4 为雄心情景下各时间节点 GDP、人口、能源消费量、单位 GDP 能耗、非化石能源消费比重的目标值。

表 5.4 雄心情景下各时间节点的部分指标

年份	GDP (亿元)	人口总量 (万人)	能源消费量 (万 tce)	单位 GDP 能耗 (tce/万元)	非化石能源消 费比重 (%)
2025	130304.74	8605.2	32598.67	0.2743	26.58
2030	182759.13	8691.6	33358.16	0.2123	42.80
2035	244572.95	8735.1	34213.66	0.1642	52.08
2050	508449.59	8726.4	38326.23	0.0761	93.79
2060	683313.74	8682.9	43226.77	0.0622	98.59

由结果可知，在自然情景无法实现双碳目标，说明该区域目前的发展状况无法达到国家双碳目标，必须出台相关政策对能源结构和产业结构进行调整，提高能源利用效率及非化石能源的消费比重；在基准情景下也无法完成双碳目标，虽有部分政策调控，使得在基准情景下能加快碳达峰的到来，但是仍不能达到 2035 年前达到国家碳达峰的战略要求，因此，该地区还需要出台更加严格的政策，做好能源结构及产业机构的转型，提升能源利用率。在雄心情景下，双碳目标能够提前地实现，为环境保护、减缓气候变化、资源保护、可持续发展等领域等做出贡献。

## 6. 总结与展望

本文详细地分析了区域双碳目标与路径规划的问题，建立了完善的指标体系，并由这些指标为基础，通过数据预处理清洗数据并确定预测参数，使用了多个数学模型建立了包括该区域的人口、经济、碳排放量等预测模型。此外还设计了多种情景对该区域的双碳目标进行路径规划，完善了所提出的预测模型。

本文所建立的相关指标及指标体系，能够清晰地描述该区域的碳排放量现状，且指标能够成为后续建立的预测模型的基础。分析了指标对碳排放量产生的影响，建立了指标间的关联模型。此外，数据预处理不仅处理了数据中的缺失值，为建立预测模型提供了部分参数，并确保预测模型的可行和有效。本文还使用了包括灰色预测、多元线性回归、STIRPAT 等多个数学模型来建立不同指标的预测模型，还使用了岭回归等算法对模型参数进行求解。对特定的指标数据使用合适的模型和算法，提高了建立的预测模型的精度和可行性。最后，本文设计了基准、自然和雄心三个情景，在不同情景下设定不同的碳达峰和碳中和目标，调整与碳排放相关的关键指标，完成了对双碳目标达成的路径规划，对按期达成碳达峰和碳中和目标能够起着指导作用。

但本文仍存在许多不足，建立的预测模型只能尽可能的模拟和预测现实中的数据，许多设立的模型假设在现实可能会受到环境、政策等不确定的影响，这会导致预测模型预测的结果与现实偏离。此外，由于参考的数据有限，本文建立的多个预测模型没有经过足够的校正，在实际使用前仍需要借助多种且大量的显示数据对模型参数进行校正。最后本文提出了三种情景，它们对应的基本假设可能并不符合实际情况，这也让本文提出的预测模型在实际使用中与实际数据产生偏差。

本文提出的预测模型对多项指标的预测结果具有很好的能力，但在实际使用中还需要考虑实际的数据和不同领域的需求。今后还要使用更多的实际数据对模型进行改良和完善，在碳排放状况分析、气候政策评估等实际应用中起到积极作用，为达成双碳目标贡献力量。

## 参考文献

- [1] 胡汉辉,申杰.数字经济、绿色创新与“双碳”目标——“减排”和“增效”视角[J].南京财经大学学报,2023(04):79-88.
- [2] 谢莹莹.江苏省碳排放峰值预测与控制研究[D].中国矿业大学;中国矿业大学(江苏),2019.
- [3] 王晓燕,李美洲.浅谈等级相关系数与斯皮尔曼等级相关系数[J].广东轻工职业技术学院学报,2006(04):26-27.
- [4] 玄兆辉,张雪峰.科技创新支撑“双碳”目标的效果分析[J].科技智囊,2023(08):48-56.
- [5] 姜翠翠,罗万春.浅谈数学建模中的灰色预测 GM(1,1)模型的构建与应用[J].高等数学研究,2023,26(04):31-33.
- [6] 田玥.基于统计回归模型的极大似然估计[J].通讯世界,2019,26(03):243-244.
- [7] 吴小平.最小二乘法在数学建模中的应用[J].江西教育,2021(21):29-30.
- [8] 高秋英,王丽丽,王荣忠.最小二乘法曲线拟合及优化算法研究[J].工业控制计算机,2021,34(11):100-101.
- [9] 渠慎宁,郭朝先.基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究[J].中国人口·资源与环境,2010,20(12):10-15.
- [10] 陈述,吕文芳,王建平.基于 LMDI 和 STIRPAT 模型的长江流域水资源利用效率动因分析[J].中国农村水利水电,2023(08):13-17+24.
- [11] 单葆国,赵佳,贾德香等.基于 STIRPAT-岭回归的电能替代潜力分析方法[J].供用电,2018,35(01):68-73.
- [12] 舒服华.我国社会消费品零售额影响因素分析——基于岭回归[J].太原师范学院学报(社会科学版),2019,18(06):44-50.
- [13] 谢煜,秦伟.江苏省碳达峰预测与情景分析——基于 STIRPAT 模型[J].南京林业大学学报(人文社会科学版),2023,23(03):54-62.
- [14] 李闻卓,郭健翔,王心竹等.基于扩展 STIRPAT 模型与情景分析法的青岛市能源消费碳排放预测及减碳措施研究[J].青岛理工大学学报,2023,44(03):74-82.

## 附录

```
#问题一计算斯皮尔曼相关系数并绘制出矩阵热力图
import pandas as pd
import numpy as np
import seaborn as sns
# 导入 matplotlib 库
import matplotlib.pyplot as plt
df= pd.read_excel('相关性分析数据.xlsx')
# 设置中文显示支持，使用 SimHei 字体，并解决负号显示问题
plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False
# 计算斯皮尔曼相关性系数矩阵
spearman_corr = df.corr(method='spearman')
plt.figure(figsize=(16, 12))
sns.heatmap(spearman_corr, annot=True, fmt=".2f", linewidths=0.5)
plt.savefig('./斯皮尔曼相关性矩阵热力图.jpg')
```

```
%问题一计算贡献率
CT = 72633.324252;
CS = 66074.81;
C0 = 56360.051842;
UT = 2.310367;
US = 2.275804;
U0 = 2.394295;
IT = 0.354498;
IS = 0.44291;
I0 = 0.568804;
YT = 10.46131;
YS = 7.88348;
Y0 = 5.258874;
PT = 8477.26;
PS = 8315.11;
P0 = 7869.34;
A = (CT - C0)/(log(CT) - log(C0));
C1 = A * log(UT/U0);
C2 = A * log(IT/I0);
C3 = A * log(YT/Y0);
C4 = A * log(PT/P0);
detaC1 = CT - C0;
detaC = [C1,C2,C3,C4];
A1 = (CS - C0)/(log(CS) - log(C0));
A2 = (CT - CS)/(log(CT) - log(CS));
```

```

U1 = A1 * log(US/U0);
I1 = A1 * log(IS/I0);
Y1 = A1 * log(YS/Y0);
P1 = A1 * log(PS/P0);
DETA1=[U1,I1,Y1,P1];
U2 = A2 * log(UT/US);
I2 = A2 * log(IT/IS);
Y2 = A2 * log(YT/YS);
P2 = A2 * log(PT/PS);
DETA2=[U2,I2,Y2,P2];

```

%问题二人口预测

```

clear all
close all
clc
y = [0.0195251444212602    0.0120678201019820    0.00894479058007516    0.0108209519996484
      0.00410815484435025    0.00798065208999024    0.00501463347121694    0.00269365465661548
      0.00271128165480526    0.000964684517462924];
people_num = [7869.34 8022.99 8119.81 8192.44 8281.09 8315.11 8381.47 8423.50 8446.19
              8469.09 8477.26 , 8505.4];
y = (people_num(2:end)-people_num(1:end-1))./people_num(1:end-1);
% x = exp;phi_ML
x = [2011:2021];
% y = exp(a);
options = optimset('Algorithm','levenberg-marquardt','display','off','TolFun',1e-30 );
[phi_ML] = lsqnonlin(@(p)p(1)*exp(p(2)*x)+p(3)+ p(4)*exp(p(5)*x)-y , [4.653e+206,-0.2385,-0.0004, -
9.88e+202, -0.2349],[[],[],options);
% phi_ML = [-9.257e+205,-0.2385, -0.0005, 4.378e+213, -0.2465];
aaa = phi_ML(1)*exp(phi_ML(2)*x)+phi_ML(3)+phi_ML(4)*exp(phi_ML(5)*x);
plot(aaa)
hold on
plot(y)
ccc = phi_ML(1)*exp(phi_ML(2)*[2011:2050])+phi_ML(3)+phi_ML(4)*exp(phi_ML(5)*[2011:2050]);
% x = [2011:2500];
plot(ccc)
bbb = phi_ML(1)*exp(phi_ML(2)*[1:2050])+phi_ML(3)+phi_ML(4)*exp(phi_ML(5)*[1:2050]);
year_base = 2021;
people_prediction =8505.4;
for year = 2022:2050
    people_prediction_rate(year-year_base) =
phi_ML(1)*exp(phi_ML(2)*year)+phi_ML(3)+phi_ML(4)*exp(phi_ML(5)*year);
    if year-year_base == 1
        people_prediction(year-year_base) = (people_prediction_rate(year-year_base)+1) *

```

```

people_prediction(year-year_base);
else
    people_prediction(year-year_base) = (people_prediction_rate(year-year_base)+1) *
people_prediction(year-year_base-1);
end
end
figure
plot([people_num,people_prediction])

%问题二 GDP 预测
clear all;
close all;
clc;
GDP_data = [41383.87 45952.65 50660.20 55580.11 60359.43 65552.00 70665.71 75752.20 80827.71
85556.13 88683.21];
people_data = [7869.34 8022.99 8119.81 8192.44 8281.09 8315.11 8381.47 8423.50 8446.19
8469.09 8477.26];
GDP_rate = (GDP_data(2:end)- GDP_data(1:end-1))./ GDP_data(1:end-1) ;
people_rate = (people_data(2:end)- people_data(1:end-1))./ people_data(1:end-1) ;
GDP_avr_peo = GDP_data ./ people_data;
GDP_avr_peo_rate = (GDP_avr_peo(2:end)- GDP_avr_peo(1:end-1))./ GDP_avr_peo(1:end-1) ;

num_people_predict=[8488.24836832705,8496.54012866259,8502.70561620447,8507.19552753233,8510.36
564691264,8512.49660442901,8513.80960884916,8514.47894127902,8514.64185558315,8514.40641092371
,8513.85766036180,8513.06253563413,8512.07369974905,8510.93258361994,8509.67177838291,8508.3169
1938373,8506.88816939487,8505.40138603483,8503.86904045201,8502.30094015994,8500.70479770673,8
499.08667801566,8497.45135025550,8495.80256459825,8494.14326988691,8492.47578482225,8490.80193
258944,8489.12314672948,8487.44055439527,8485.75504182165];
tagetrenjunGDP_2035 = 2*GDP_avr_peo(end);
tagetrenjunGDP_2050 = 4*GDP_avr_peo(end);
num_peoplepredict_2035 = num_people_predict(15);
num_peoplepredict_2050 = num_people_predict(30);
tagetGDP_2035 = tagetrenjunGDP_2035*num_peoplepredict_2035;
tagetGDP_2050 = tagetrenjunGDP_2050*num_peoplepredict_2050;
average_rate_2020_2035 = (tagetGDP_2035/GDP_data(end))^(1/15)-1;
average_rate_2035_2050 = (tagetGDP_2050/tagetGDP_2035)^(1/15)-1;
rate_avg = [repmat(average_rate_2020_2035,1,15),repmat(average_rate_2035_2050,1,25)] ;
rate_random = repmat(rate_avg,200,1).*(1+(sqrt(0.005)*randn(200,length(rate_avg))));
t = repmat(2021:2060,200,1);
cvx_begin
variables a
variables b
minimize norm(a*t+b-rate_random,2)

```



```

cvx_end
pre_rateGDP = a*[2021:2060]+b;
GDP_lastiter = GDP_data(end);
for i=1:length(2021:2060)
GDP_predicttemp = pre_rateGDP(i)*GDP_lastiter+GDP_lastiter;
GDP_predict(i) = GDP_predicttemp;
GDP_lastiter = GDP_predicttemp;
end
% save GDP_predict.mat GDP_predict
figure(1)
bar([2010:2060],[GDP_data,GDP_predict]);
hold on;
bar([2010:2020],GDP_data);
% hold on;
legend('2020-2060 年预测 GDP 总量','2010-2020 年 GDP 总量');
xlabel('年份');
ylabel('GDP(亿元)');

```

%问题二能源消费量预测

```

clear all;
close all;
clc;

```

```

people_prediction_2060=[8488.24836832705,8496.54012866259,8502.70561620447,8507.19552753233,851
0.36564691264,8512.49660442901,8513.80960884916,8514.47894127902,8514.64185558315,8514.4064109
2371,8513.85766036180,8513.06253563413,8512.07369974905,8510.93258361994,8509.67177838291,8508.
31691938373,8506.88816939487,8505.40138603483,8503.86904045201,8502.30094015994,8500.704797706
73,8499.08667801566,8497.45135025550,8495.80256459825,8494.14326988691,8492.47578482225,8490.80
193258944,8489.12314672948,8487.44055439527,8485.75504182165,8484.06730580830,8482.37789420281
,8480.68723773382,8478.99567504205,8477.30347236237,8475.61083899988,8473.91793949854,8472.2249
0320917,8470.53183181256,8468.83880523450];
GDP_prediction_2060=[92902.5620244183,97320.7301069395,101946.989772280,106791.044875648,11186
3.047174805,117173.616786753,122733.863568605,128555.409463907,134650.411857526,141031.5879841
14,147712.240437135,154706.283827529,162028.272643237,169693.430363075,177717.679880789,186117.
675297597,194910.835144065,204115.377094863,213750.354242714,223835.693000782,234392.232705773
,245441.766997192,257007.087051508,269112.026753438,281781.509890144,295041.599457915,308919.54
9174801,323443.857296773,338644.322839232,354552.104310151,371199.781065769,388621.417404587,4
06852.629520485,425930.655441024,445894.428082508,466784.651559093,488643.880889233,511516.605
248936,535449.334927882,560490.692151139];
GDP_data = [41383.87 45952.65 50660.20 55580.11 60359.43 65552.00 70665.71 75752.20 80827.71
85556.13 88683.21];
people_num = [7869.34 8022.99 8119.81 8192.44 8281.09 8315.11 8381.47 8423.50 8446.19
8469.09 8477.26];

```

```

Consumetotal = [23539.31443    26860.02581  27999.21811  28203.10427  28170.50576  29033.60807
                29947.97662  30669.88646  31373.12665  32227.50539  31437.99755];

```

```

% 标准化数据

```

```

GDPtotal_normization = ((GDP_data - min(GDP_data))) / (max(GDP_data) - min(GDP_data));

```

```

GDP_gausskernel = exp(GDPtotal_normization);

```

```

% people_num = GDPdata(1,:);

```

```

numpeople_normization = (people_num-min(people_num))/(max(people_num)-min(people_num));

```

```

numpeople_gausskernel = exp(numpeople_normization);

```

```

% Consume_energy = xlsread('能源消耗量数据.xlsx');

```

```

% Consumetotal = Consume_energy(1,:);

```

```

%问题三绘图(其中一个)

```

```

A4=[72217.5, 73211.68,74345.76,72001.72,66721.81,45000.35];

```

```

A6 = interp1([2021,2035,2050,2052,2055,2060],A4,[2021:2060]);

```

```

plot([2021:2060],A6,'Linewidth',2);

```

```

hold on

```

```

A1=[72321.5, 74417.68,76345.76,69012.72,61721.81,34741.35];

```

```

A3 = interp1([2021,2027,2038,2045,2050,2060],A1,[2021:2060]);

```

```

plot([2021:2060],A3,'Linewidth',2);

```

```

A=[73178.5, 76417.68,78345.76,69012.72,51721.81,20781.55];

```

```

A2 = interp1([2021,2026,2028,2035,2045,2060],A,[2021:2060]);

```

```

plot([2021:2060],A2,'Linewidth',2);

```

```

legend('自然情景','基准情景','雄心情景');

```

```

ylabel('碳排放量(tCO2)')

```

```

xlabel('年份')

```