

区域双碳目标与路径规划研究

赵晨阳, 邱碧薇

上海理工大学材料与化学学院, 上海

收稿日期: 2024年3月30日; 录用日期: 2024年5月2日; 发布日期: 2024年5月8日

摘要

中国政府承诺在2030年前实现碳排放峰值, 2060年前实现碳中和, 并提出了双碳行动顶层设计。关键工程包括提高能源效率、产业升级、能源脱碳和能源消费电气化。采用数学模型分析这些工程对碳排放的影响, 并建立了碳排放与经济、人口、能源消费之间的关系模型。根据Kaya模型, 制定了达成碳中和目标的路径, 并探讨了实现这些目标所面临的挑战。

关键词

线性回归, 主成分分析, 碳排放

Regional Dual Carbon Targets and Pathways Planning Study

Chenyang Zhao, Biwei Qiu

School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 30th, 2024; accepted: May. 2nd, 2024; published: May. 8th, 2024

Abstract

The Chinese Government has committed itself to achieving peak carbon emissions by 2030 and carbon neutrality by 2060, and has proposed a top-level design for dual-carbon action. Key works include energy efficiency improvement, industrial upgrading, energy decarbonization and electrification of energy consumption. Mathematical models were used to analyze the impact of these works on carbon emissions, and the relationship between carbon emissions and economy, population and energy consumption was modeled. Based on the Kaya model, pathways to reach carbon neutrality targets are formulated, and challenges to achieving these targets are explored.

Keywords

Linear Regression, Principal Component Analysis, Carbon Emissions

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变化的问题日益严峻, 中国作为主要的发展中国家, 已承诺减少碳排放并推进可持续发展。在 2020 年联合国大会上宣布, 中国计划在 2030 年前达到碳排放顶峰, 并致力于在 2060 年前实现碳中和。

为实现这一承诺, 中国政府出台了《关于做好碳达峰碳中和工作的意见》, 这一文件详细阐述了达成双碳目标的战略规划及实施细节, 确立了平衡碳减排与经济社会发展的原则。政府提出了一系列关键工程, 包括提高能效、产业结构升级、能源结构去碳化以及推进能源消费的电气化, 以促进经济社会的可持续和低碳发展。

为评估这些关键工程对碳排放的潜在影响, 开展数学模型分析至关重要[1]。这些模型不仅有助于监测中国实现 2060 年碳中和的进程, 而且对于实现其他经济社会发展目标也具有重要价值。此外, 它们还能为全球气候行动提供有力的示范效应[2] [3] [4]。

近期, 很多先进的模型和方法的发展更精确地预测和监测碳排放量, 以及评估不同减排策略的有效性。研究人员正在努力提高模型的计算效率和准确性, 同时探索如何结合经济社会数据来优化减排措施。这些进展对于指导政策制定和实施具有重要意义。

为响应不同的变化挑战, 对以下三个方面进行研究:

首先, 构建一个区域碳排放与经济、人口和能源消费量之间关系的模型, 发展相应的指标体系, 并分析这些指标的当前发展状况。此外, 需要识别和量化影响区域碳排放的各种因素及其贡献。其次, 建立人口、经济增长和能源消费量之间的关联模型, 以及碳排放量与不同部门和能源类型之间的关系模型。这将支持对未来碳排放的预测。最后, 确定在不同情景下的双碳目标(即碳达峰和碳中和)及路径规划方法。这包括无人干预的自然情景、按计划达到碳达峰和碳中和的基准情景, 以及率先实现这些目标的雄心情景。这些研究将为制定实现区域碳中和目标的策略提供科学依据, 并有助于指导实践。

2. 模型基础

2.1. 模型假设

情景 1: 2035 年的 GDP 比基期(2020 年)翻一番; 2060 年比基期翻两番;

情景 2: 2060 年生态碳汇的碳消纳量为基期碳排放量的 10%;

情景 3: 2060 年工程碳汇或碳交易的碳消纳量为基期碳排放量 10%。

(注: 在构建模型和进行预测时, 假设是一种常见的方法, 它有助于简化现实世界的复杂性, 使问题变得可控化。然而, 这些假设需要基于合理的依据, 并在现实中具有一定的可能性[5] [6] [7] [8]。在 2.1 部分提出的假设是对未来经济增长和碳吸收能力的预测。这些预测可能基于历史数据、现有政策和未来发展的趋势分析。

如果这些假设不成立, 模型的预测结果可能会受到影响。但是, 模型本身仍然具有其内在的价值, 因为它提供了一个分析框架, 可以用于考察不同变量之间的相互作用。即便原始假设不成立, 模型也可以通过调整假设或重新校准参数来适应新的情况。此外, 模型可以用来测试不同的“如果”情景, 以探讨不同假设下的结果差异, 从而帮助决策者理解不确定性并制定应对策略[9]。

总之, 即使原始假设不成立, 构建的模型仍然有其意义, 因为它可以作为一个动态工具, 不仅帮助我们理解可能的未来情景, 而且还能够适应新的数据和信息, 为政策制定提供支持。)

2.2. 符号说明

本文用到的变量及其含义如表 1 所示。

Table 1. Variables and their meanings

表 1. 变量及其含义

变量名	符号说明
P	人口
F	经济
E	能源
C	碳排放
W_1	第一主成分贡献率
W_2	第一主成分贡献率
$C_{\text{碳排}}$	二氧化碳排放量
$F_{i\text{人均GDP}}$	人均 GDP
$E_{\text{单位GDP能耗}}$	单位 GDP 能耗
$C_{\text{单位CO}_2\text{排}}$	单位二氧化碳排放量
$E_{\text{非化石能源消耗}}$	非化石能源消耗

注: 其余符号在正文中均有标注。

3. 区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量的相互关系

3.1. 思路及操作步骤

本节将构建指标评价模型, 首先选择主要指标, 即一级评价指标, 包括碳排放指标、经济指标、人口指标、能源消费量指标。在人口方面, 选择常住人口总量作为二级指标。在经济方面, 选择 GDP 总量、第一产业、第二产业总量、第三产业总量作为二级指标。在能源消费量方面, 选择第一产业的农林消费部门、第二产业的能源供应部门、第二产业的工业消费部门、第三产业的交通消费部门、第三产业的建筑消费部门、居民生活消费作为二级指标。在碳排放量方面, 选择排放总量以及各部分碳排放作为二级指标。

为了更加直观展示构建的指标评价体系, 对体系进行可视化处理, 如表 2 所示。

人口增长率:

$$P_2 = \frac{P_{t+1} - P_t}{P_t} \times 100\% \quad (3-1)$$

Table 2. Indicator evaluation system

表 2. 指标评价体系

一级指标	二级指标	符号
人口 P	常住人口	P_1
	常住人口增长率	P_2
经济 F	第一产业的农林消费部门增加值	F_{1t}
	第二产业的能源供应部门增加值	F_{2t}
	第二产业的交通消费部门增加值	F_{3t}
	第三产业的建筑消费部门增加值	F_{4t}
	GDP 总值	F_{5t}
	GDP 增长率	F_{6t}
能源 E	第一产业的农林消费部门	E_{1t}
	第二产业的能源供应部门	E_{2t}
	第二产业的工业消费部门	E_{3t}
	第三产业的交通消费部门	E_{4t}
	第三产业的建筑消费部门	E_{5t}
	生活的居民生活消费	E_{6t}
碳排放 C	第一产业的农林消费部门	C_{1t}
	第二产业的工业消费部门	C_{2t}
	第三产业的交通消费部门	C_{3t}
	第三产业的建筑消费部门	C_{4t}
	居民生活消费能源	C_{5t}
	能源供应部门	C_{6t}

注：碳排放量由各品种能源消耗量与对应碳排放因子的乘积之和； t 为年份。

经济增长率：

$$F_{6t} = \frac{F_{t+1} - F_t}{F_t} \times 100\% \quad (3-2)$$

能源总值：

$$E = E_{1t} + E_{2t} + E_{3t} + E_{4t} + E_{5t} + E_{6t} \quad (3-3)$$

碳排放量总值

$$C_{\text{总}} = C_{1t} + C_{2t} + C_{3t} + C_{4t} + C_{5t} + C_{6t} \quad (3-4)$$

3.2. 建模方法

3.2.1. 数据预处理

通过在 MATLAB 中分析数据后发现碳排放量的年份间隔不连续，表明存在大量缺失。为解决这问

题, 采用平均值插值方法进行缺失值查找。此方法速度快, 适用于大数据量, 可减少计算时间和信息损失。后续计算也沿用此方法。

3.2.2. 线性回归

本节将采用性回归, 二次回归(一种泛化性模型)和多元线性回归模型, 使预测值和真实值的距离越近越好。

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 x \quad (3-5)$$

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 x^2 \quad (3-6)$$

$$f(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 x_2^2 \quad (3-7)$$

3.2.3. 相关性分析

采用皮尔逊相关系数来分析各个指标的相关性。采用皮尔逊相关系数的计算公式如下:

$$E(X) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad E(Y) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (3-8)$$

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - E(X))(Y_i - E(Y))}{n} \quad (3-9)$$

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - E(X))(Y_i - E(Y))}{n \sigma_X \sigma_Y} \quad (3-10)$$

3.2.4. 主成分分析

假设有 n 个样本, p 个指标, 则可构成大小为 $n \times p$ 的样本矩阵 x :

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n1} & \cdots & x_{3p} \end{bmatrix} = (x_1, x_2, \cdots, x_p) \quad (3-11)$$

首先对其进行标准化处理:

按列计算均值 $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 和标准差 $S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}}$, 计算的标准化数据 $X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j}$, 原始样本

矩阵经过标准化变为:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{np} \end{bmatrix} = (X_1, X_2, \cdots, X_p) \quad (3-12)$$

计算标准化样本的协方差矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{np} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$$\text{其中 } r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{ki} - \bar{X}_i)(X_{kj} - \bar{X}_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n X_{ki} X_{kj}$$

(注意: 上面 12 两步可直接合并为一步: 直接计算 x 矩阵的样本相关系数矩阵)

$$R = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (3-14)$$

计算 R 的特征值和特征向量

特征值: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0$ (R 是半正定矩阵, 且 $tr(R) = \sum_{k=1}^p \lambda_k = p$)

$$\text{特征向量: } a_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{p1} \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{p2} \end{bmatrix}, \cdots, a_p = \begin{bmatrix} a_{1p} \\ a_{2p} \\ \vdots \\ a_{pp} \end{bmatrix}$$

(Matlab 中计算特征值和特征向量的函数: `eig(R)`)

计算主成分贡献率以及累计贡献率:

$$\text{贡献率} = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i=1,2,\cdots,p) \quad \text{累计贡献率} = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i=1,2,\cdots,p)$$

写出主成分

一般取累计贡献率超过 80% 的特征值所对应的第一、第二、 \cdots 、第 m ($m \leq p$) 个主成分第 i 个主成分:

$$F_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \cdots + a_{pi}X_p \quad (i=1,2,\cdots,m)。$$

3.3. 结果与分析

通过分析数据, 绘制直线图表示常住人口、区域经济、能源消费量和碳排放量在 2010~2020 年间的变化情况, 如下图 1 所示。

2010 年至 2020 年, 该区域的常住人口持续增长, 但增速逐渐减缓。经济增长高于人口增长速率, 人口带动了消费, 提高了生活质量。能源消费量波动较大, 2010 年至 2012 年迅速增长, 然后在 2014 年开始下降。碳排放量波动最大, 2010 年至 2012 年持续增长, 2014 年急剧下降, 可能与能耗强度目标有关。自 2014 年以后, 碳排放量稳步上升, 但到 2019 年开始下降, 与能源消费量类似。

图 2 为各部门的总碳排放量对于了解其贡献至关重要。居民生活消费能源、农林消费部门和交通消费部门总体呈上升趋势, 而建筑消费部门、工业消费部门和能源供应部门波动较大。人口和 GDP 增长率逐渐下降, 与能源消费和碳排放量的变化趋势相关。2014 年人口增长率下降, 碳排放量也下降, 与能源消耗保持稳定, 可能与“能耗强度”目标相关。

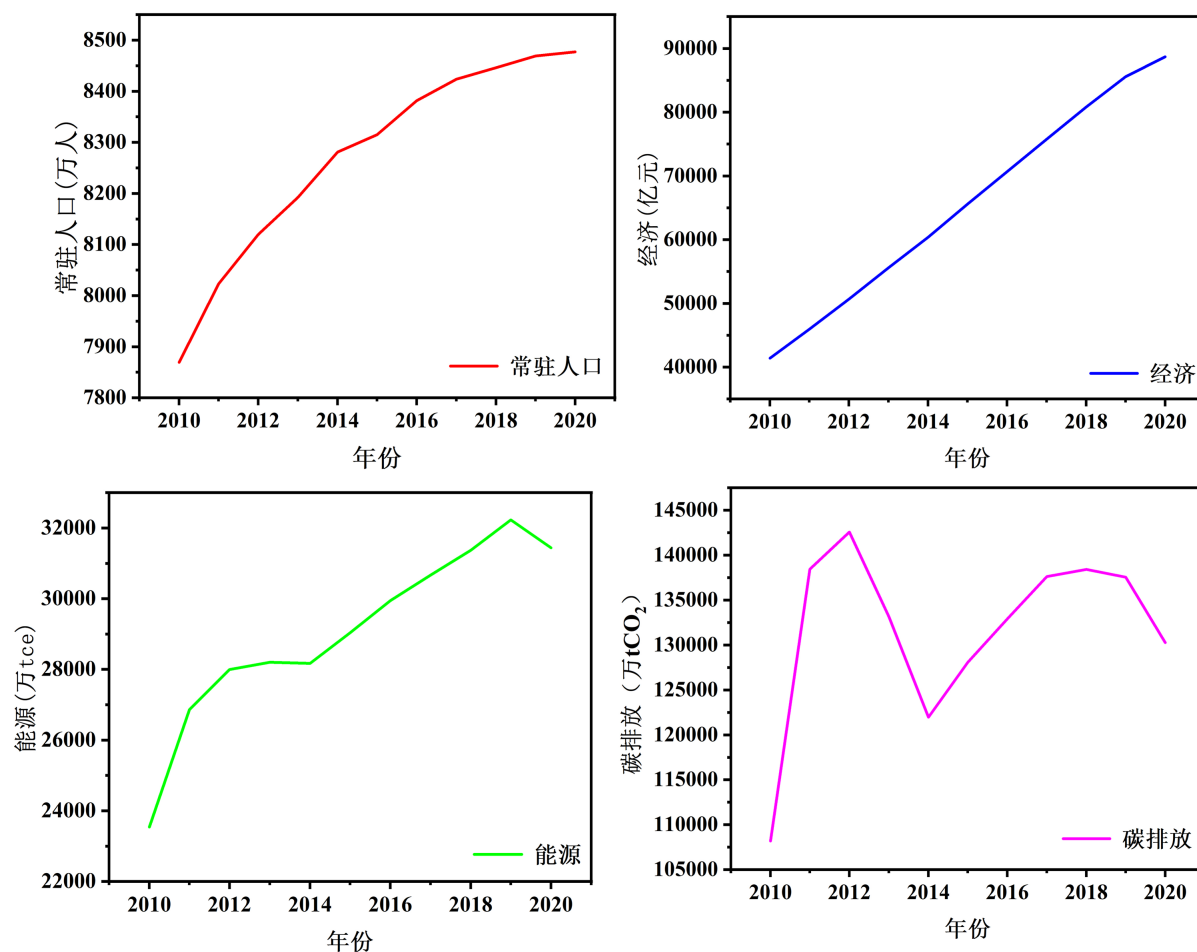


Figure 1. Population, regional economy, energy consumption and carbon emissions

图 1. 人口、区域经济、能源消费量和碳排放量

图 3 为 SPSS 分析结果显示, 人口与能源消费量关系密切, 经济与能源消费量和人口关系密切, 但与碳排放量关系较小。对碳排放的影响顺序为: 能源消耗 > 人口 > 经济。能源消费量与区域经济、人口和碳排放量都相关性高。

表 3 为利用 Excel 绘制了某区域在十二五(2011~2015 年)和十三五(2016~2020 年)期间的碳排放量数据, 分析了各阶段的排碳量增长率和增长率的稳定性, 结果如表 4 所示。采用特定公式计算了排碳量的增长率和增长率的稳定性。

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=2010}^{2015} \frac{x_{i+1} - x_i}{x_i}$$

$$s = \frac{1}{5} \sum_{i=2010}^{2015} \frac{x_{i+1} - x_i}{x_i} - \bar{x}$$

表格显示了某区域在十二五和十三五期间的碳排放量。总体而言, 十二五期间的排放量高于十三五期间, 变化趋势更为显著。各部门中, 第一产业的农林消费部门、第二产业的工业消费部门、第三产业的交通和建筑消费部门、居民生活消费能源以及能源供应部门, 在十二五期间的排放量均高于十三五期间, 其中能源供应部门甚至出现负增长。由于指标过多, 难以确定主次影响因素, 因此采用主成分分析模型以少量指标反映大量指标。

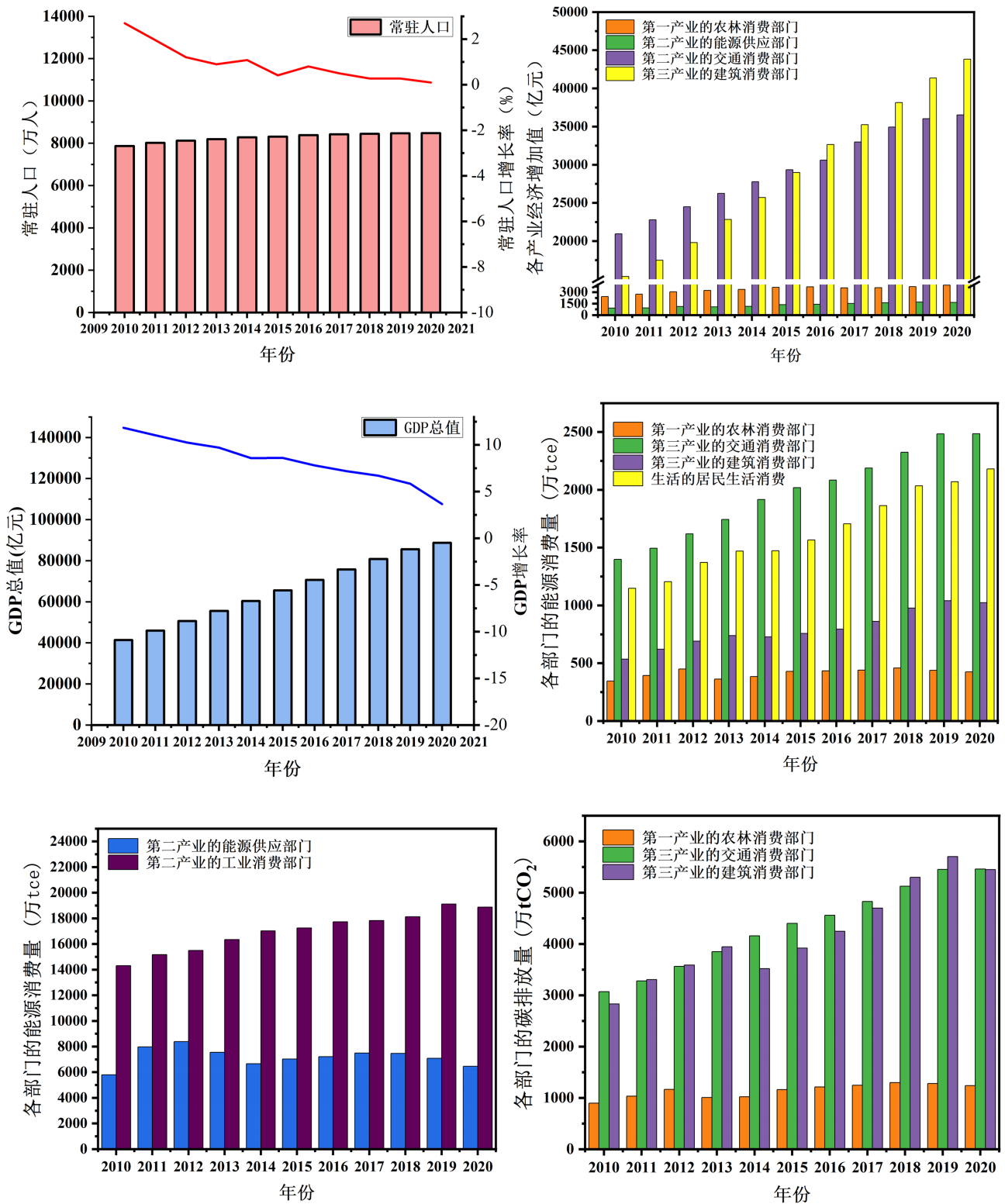


Figure 2. Analysis of the current status of the secondary indicators
图 2. 各二级指标的现状分析

Table 3. Correlation analysis of Tier 1 indicators
表 3. 一级指标相关性分析

	人口	经济	碳排放	能源消耗
人口	1 (0.000 ^{***})	0.959 (0.000 ^{***})	0.453 (0.162)	0.968 (0.000 ^{***})
经济	0.959 (0.000 ^{***})	1 (0.000 ^{***})	0.358 (0.279)	0.941 (0.000 ^{***})
碳排放	0.453 (0.162)	0.358 (0.279)	1 (0.000 ^{***})	0.627 (0.039 ^{**})
能源消耗	0.968 (0.000 ^{***})	0.941 (0.000 ^{***})	0.627 (0.039 ^{**})	1 (0.000 ^{***})

注: ^{***}、^{**}、^{*}分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平。

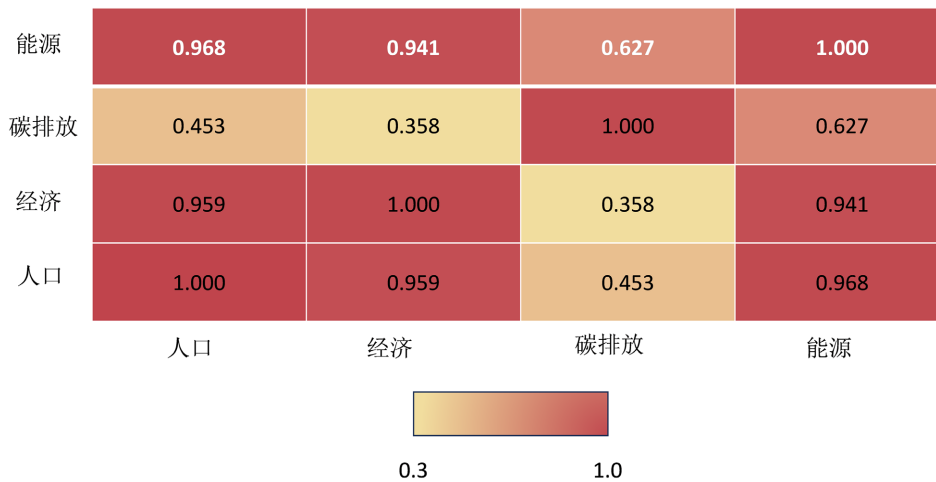


Figure 3. Analysis of the current status of indicators at each level
图 3. 各一级指标的现状分析

Table 4. Carbon emissions in the 12th and 13th five-year plans
表 4. 十二五和十三五的碳排放量

项目	十二五		十三五	
	增长率	增长率的稳定性	增长率	增长率的稳定性
C_{1t}	0.09379124	0.01493002	0.01322791	0.00110825
C_{2t}	0.09176398	0.00689784	0.00736582	0.00055131
C_{3t}	0.08524491	0.00012511	0.04435805	0.00070321
C_{4t}	0.121496	0.01102958	0.07004214	0.00448416
C_{5t}	0.05367507	0.01116643	0.02699878	0.00084898
C_{6t}	0.21438586	0.04940571	-0.0131283	0.00340905
C	0.14794886	0.02108802	0.00394366	0.00137252

对于区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量的相互关系, 研究目标是构建一个指标体系, 用以反映和分析区域碳排放量与经济、人口和能源消费量之间的相互关系。此体系还需能描述不同部门的碳排放状况。图 4 为以中国“十二五”(2011~2015 年)及“十三五”(2016~2020 年)期间的数据为基础, 分析所选指标对碳排放的影响, 并利用 Kaya 恒等式建立碳排放量与上述因素的关联模型。此外, 将探究实

现碳达峰和碳中和所需面对的主要挑战。最终提出能够精确预测和解释区域碳排放变化的动态模型, 为政策制定提供定量依据。

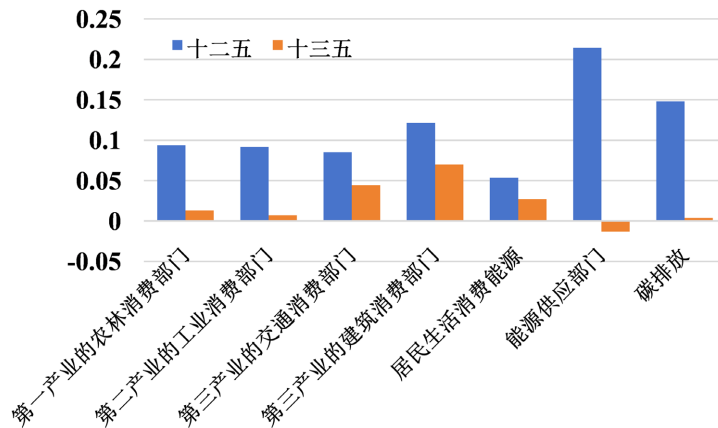


Figure 4. Analysis of carbon emissions in the 12th and 13th five-year plans
图 4. 十二五和十三五的碳排放量分析

4. 人口、经济和能源消费量的相互关系

4.1. 思路及操作步骤

本节将构建出人口、经济和能源消费量相关的预测模型。然后将碳排放量与人口、GDP 和能源消费量进行关联, 并且要能反映出各部门以及能源消费品种与碳排放量的关系。

4.2. 建模方法

根据要求, 本文采用图 5 进行分析, 先拟合常住人口和 GDP 总值, 然后, 采用多元线性回归拟合能源消费已经常住人口和 GDP。最后建立各部门和各能源消费品种的关系。

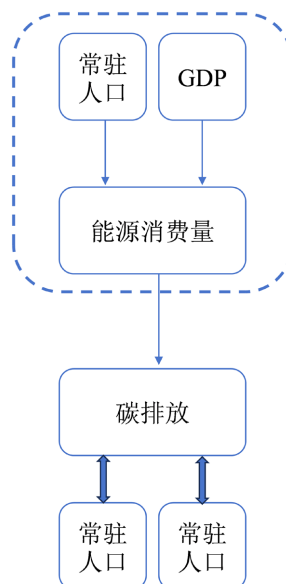


Figure 5. Modeling flowchart
图 5. 建模流程图

采用线性回归、多元线性拟合和灰度预测模型。其中线性回归、多元线性拟合在上文中已经解释;

1) 模型的建立

灰色预测模型(GM(1,1))是使用原始的离散数据列, 通过一次累加生成削弱随机性的较有规律的新的离散数据列, 然后通过建立微分方程模型, 得到在离散点处的解经过累减生成的原始数据的近似估计值, 从而预测原始数据的后续发展。

设 $x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ 是最初的原始数据列, 我们对其进行一次累计得到新的生成数据列为

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (4-1)$$

其中, $x^{(1)}(m) = \sum_{i=1}^m x^{(0)}(i), m=1, 2, \dots, n$

令 $z^{(1)}$ 为数列 $x^{(1)}$ 的紧邻均值生成数列, 即 $z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$,

其中

$$z^{(1)}(m) = \delta x^{(1)}(m) + (1-\delta)x^{(1)}(m-1), m=2, 3, \dots, n \text{ 且 } \delta = 0.5 \quad (4-2)$$

我们称方程 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 为 GM(1, 1)模型的基本形式。其中, b 表示灰作用量, $-a$ 表示发展系数, GM(1, 1)的第一个“1”表示方程是一阶的, 后面的“1”表示只有一个变量。

下面我们引入矩阵形式:

$$u = (a, b)^T, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

于是, GM(1, 1)模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 可表示为:

$$Y = Bu$$

我们可利用最小二乘法得到参数 a, b 的估计值为:

$$\hat{u} = \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (4-4)$$

另外, 如果将 $x^{(0)}(m)$ 的时刻 $m=2, 3, \dots, n$ 视为连续变量 t , 那么 $x^{(1)}$ 视为时间 t 的函数, 我们可记为 $\hat{x}^{(1)}(t)$, 将 $x^{(0)}(k)$ 对应于导数 $\frac{d\hat{x}^{(1)}(t)}{dt}$, $z^{(1)}(k)$ 对应于 $x^{(1)}(t)$, 则可建立相对于灰方程 GM(1, 1)的白微分方程: $\frac{d\hat{x}^{(1)}(t)}{dt} + \hat{x}^{(1)}(t) = b$, 我们称之为 GM(1, 1)的白化方程。

2) 模型求解

如果我们取初始值 $\hat{x}^{(1)}(t)|_{t=1} = x^{(0)}(1)$, 我们可以求出其对应的解为:

$$\hat{x}^{(1)}(t) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a}, m=1, 2, \dots, n-1 \quad (4-5)$$

进一步我们可以得到 GM(1,1)模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的解为:

$$\hat{x}^{(1)}(m+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-am} + \frac{b}{a}, m = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4-6)$$

从上式可得原始数据列 $x^{(0)}$ 的模拟值为:

$$\hat{x}^{(0)}(m+1) = \hat{x}^{(1)}(m+1) - \hat{x}^{(1)}(m) = (1 - e^a) \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-am} \quad m = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4-7)$$

如果要对原始数据进行预测, 只需要在上式取 $m > n$ 即可。

3) 模型验证

用 GM(1, 1) 对数据进行预测时, 可对预测的效果作下面三种方法的检验:

a) 残差验证: 残差的定义如下:

绝对残差: $\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), k = 2, 3, \dots, n$

相对残差: $\varepsilon(k) = \frac{|x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)|}{\hat{x}^{(0)}(k)} \times 100\%, k = 2, 3, \dots, n$

通常认为, 当 $\rho(k) < 10\%$ 时, 达到较高的要求。

b) 级比偏差检验

首先利用原始数据计算得到级比 $\sigma(k) = \frac{x(k)}{x(k-1)}, k = 2, 3, \dots, n$, 再计算相应的级比偏差

$$\rho(k) = 1 - \frac{1 - 0.5a}{1 + 0.5a} \frac{1}{\sigma(k)}$$

通常认为, 当 $\rho(k) < 10\%$ 时, 达到较高的要求。

4.3. 结果与分析

1: 灰度预测

灰度预测常常用来预测与时间相关的变量, 因此本文选择灰度预测进行预测常住人口和 GDP 总值的模型。如表 5、图 5 和图 6 所示。灰度预测的真实值和拟合值基本重合其误差均小于 1%。

Table 5. Gray scale prediction results

表 5. 灰度预测结果

年份	灰度预测	
	常住人口预测值	GDP 预测值
2021	8591.621	98459.117
2022	8643.532	105710.826
2023	8695.756	113496.637
2024	8748.296	121855.89
2025	8801.153	130830.818
2056	10608.137	1184348.432
2057	10672.232	1271578.042
2058	10736.713	1365232.284
2059	10801.585	1465784.348
2060	10866.848	1573742.27

2: 线性回归拟合预测

根据附件, 先将常住人口和 GDP 总值建立与时间相关的线性模型, 如式:

常住人口与时间的关系式:

$$P_{1t} = 7925.355 + 57.869 * t \quad R_2 = 0.917 \quad (4-8)$$

GDP 总值与时间的关系式:

$$F_t = 36303.185 + 4873.306 * t \quad R_2 = 0.999 \quad (4-9)$$

采用多元线性拟合建立能源消费量与常住人口和 GDP 总值的关系:

$$E = -56613.857 + 10.159 * P1t + 0.025 * Ft \quad R_2 = 0.94 \quad (4-10)$$

采用线性回归对常住人口和 GDP 进行预测如表 6 所示。

Table 6. Predictive results of linear regression

表 6. 线性回归的预测结果

年份	线性回归	
	常住人口预测值	GDP 预测值
2021	8619.783	94782.857
2022	8677.652	99656.163
2023	8735.521	104529.469
2024	8793.39	109402.775
2025	8851.259	114276.081
2056	10645.198	265348.567
2057	10703.067	270221.873
2058	10760.936	275095.179
2059	10818.805	279968.485
2060	10876.674	284841.791

对比灰度预测和线性回归的误差值, 发现线性回归的误差基本小于灰度预测。因此本文采用线性回归方法进行预测常住人口、GDP 值和能源消费量进行预测, 结果如表 7 所示。

Table 7. Analysis of error values for grayscale prediction and linear regression

表 7. 灰度预测和线性回归的误差值分析

年份	线性回归		灰度预测	
	常住人口相对误差(%)	GDP 相对误差(%)	常住人口相对误差(%)	GDP 相对误差(%)
2010	0.059	0.005	0	0
2011	0.070	0.002	0.827	5.271
2012	0.074	0.005	0.227	2.522
2013	0.075	0.004	0.061	0.329
2014	0.0780	0.005	0.534	0.81
2015	0.075	0	0.342	1.941

续表

2016	0.075	0.004	0.534	2.337
2017	0.073	0.006	0.432	2.185
2018	0.069	0.008	0.1	1.575
2019	0.064	0.006	0.232	0.166
2020	0.058	1.004	0.74	3.407

Table 8. Projected population, economy (GDP) and energy consumption for the period from the 14th five-year plan (2021~2025) to the 21st five-year plan (2056~2060)

表 8. 十四五(2021~2025 年)至二十一五(2056~2060 年)期间人口、经济(GDP)和能源消费量预测值

	线性回归		
	常住人口预测	GDP 预测	能源预测
2021	8619.783	94782.857	33324.08992
2022	8677.652	99656.163	34033.81374
2023	8735.521	104529.469	34743.53756
2024	8793.39	109402.775	35453.26139
2025	8851.259	114276.081	36162.98521
2056	10645.198	265348.567	58164.42366
2057	10703.067	270221.873	58874.14748
2058	10760.936	275095.179	59583.8713
2059	10818.805	279968.485	60293.59512
2060	10876.674	284841.791	61003.31894

如表 8, 针对人口、经济和能源消费量的相互关系, 研究旨在构建一个模型, 以预测人口、经济以及能源消费量之间的相互关系, 并进一步将碳排放量与人口、GDP 和能源消费量关联起来。此模型还需能够揭示不同部门及能源消费类型与碳排放量之间的联系。首先拟合常住人口和 GDP 总值, 随后使用多元线性回归方法拟合能源消费量、常住人口和 GDP 的数据。最后, 建立一个模型, 描述各部门和各类能源消费与碳排放量的关系。开发出一种可靠的预测模型, 该模型可预测不同人口和经济发展情景下的能源需求和碳排放量, 为制定能源政策和减排策略提供支持。

5. 三种情境下碳排放量的核算

5.1. 思路及操作步骤

本章节将构建在三种情景下的碳排放量模型: (1)自然情景表示无人干预, 即没有政策; (2)基准情景按照国家碳达峰和碳中和的时间节点模拟达到目标的路径; (3)雄心情景要求更早地达到碳达峰和碳中和目标, 反映更高的雄心和积极的政策干预。

5.2. 结果与分析

5.2.1. 自然情景

计算人均 GDP

在自然情境中, 根据假设 1 中, 2035 年的 GDP 总值要比 2020 年翻一番, 2060 年要翻两番。因此根

据 2035 的 GDP 总值计算出 2035 和 2060 年的 GDP 总值, 如图 6 所示。根据已知的 3 个点进行线性拟合, 得到 2020 年到 2060 的数据, 其函数关系如式:

$$E_{t_{\text{总GDP}}} = 29.56 * t_2 + 4818 * t + 32100$$

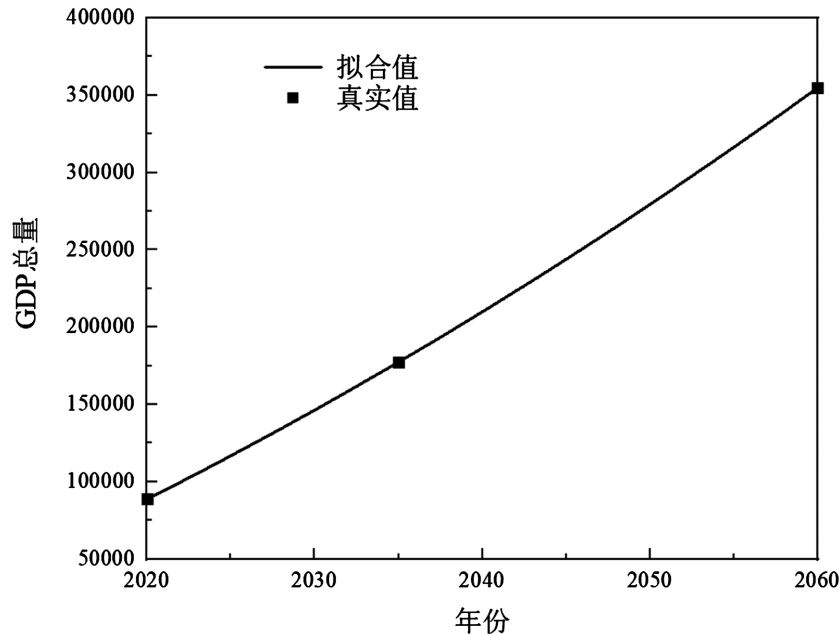


Figure 6. Linear Fit Results for Gross GDP
图 6. GDP 总值的线性拟合结果

如表 9, 已经建立出人口、GPD 和能源的关联模型, 如式。这里假定人口的增长率保持问题, 根据式所定, 预测出 2020 年至 2060 年的人口:

$$P_{t_{\text{人口}}} = 7925.355 + 57.869 * t \tag{5-1}$$

$$E_{\text{能源}} = -56613.857 + 10.159 * P_1 + 0.025 * F \tag{5-2}$$

Table 9. Results of energy projections
表 9. 能源的预测结果

年份	能源	年份	能源	年份	能源	年份	能源
2021	33308.83	2031	40643.51	2041	48125.98	2051	55756.25
2022	34035.65	2032	41385.1	2042	48882.35	2052	56527.41
2023	34763.94	2033	42128.18	2043	49640.21	2053	57300.04
2024	35493.72	2034	42872.73	2044	50399.54	2054	58074.15
2025	36224.97	2035	43618.76	2045	51160.35	2055	58849.74
2026	36957.7	2036	44366.27	2046	51922.64	2056	59626.81
2027	37691.9	2037	45115.25	2047	52686.4	2057	60405.36
2028	38427.59	2038	45865.72	2048	53451.65	2058	61185.38
2029	39164.75	2039	46617.66	2049	54218.37	2059	61966.88
2030	39903.39	2040	47371.08	2050	54986.57	2060	62749.86

如表 10, 为人均 GDP 的预测结果, 人均 GDP 可以表示为:

$$P_{t \text{ 人均GDP}} = \frac{F_{5t \text{ GDP}}}{P_{t \text{ 人口}}} \quad (5-3)$$

Table 10. Projections of GDP per capita
表 10. 人均 GDP 的预测结果

年份	人均 GDP 能耗	年份	人均 GDP 能耗	年份	人均 GDP 能耗	年份	人均 GDP 能耗
2021	11.107	2031	16.47465	2041	21.84092	2051	27.2058
2022	11.64383	2032	17.01134	2042	22.37747	2052	27.74221
2023	12.18064	2033	17.54802	2043	22.914	2053	28.27861
2024	12.71744	2034	18.08468	2044	23.45053	2054	28.81499
2025	13.25423	2035	18.62132	2045	23.98703	2055	29.35136
2026	13.791	2036	19.15796	2046	24.52353	2056	29.88772
2027	14.32776	2037	19.69458	2047	25.06001	2057	30.42406
2028	14.8645	2038	20.23118	2048	25.59648	2058	30.96039
2029	15.40123	2039	20.76777	2049	26.13293	2059	31.49671
2030	15.93795	2040	21.30435	2050	26.66937	2060	32.03301

估算单位 GDP 能耗

根据是 $F_{5t \text{ 总GPD}} = 29.56 * t_2 + 4818 * t + 32100$ 和 $E_{\text{能源}} = -56613.857 + 10.159 * P_1 + 0.025 * F$

求出单位 GDP 耗能

利用该公式, 进行计算单位 GDP 能耗。得到部分结果如表 11 所示:

Table 11. Partial results of energy consumption per unit of GDP
表 11. 单位 GDP 能耗部分结果

年份	单位 GDP 能耗	年份	单位 GDP 能耗	年份	单位 GDP 能耗	年份	单位 GDP 能耗
2021	0.3537	2031	0.266684	2041	0.222244	2051	0.194544
2022	0.341279	2032	0.26102	2042	0.218924	2052	0.192316
2023	0.329999	2033	0.255696	2043	0.215749	2053	0.190163
2024	0.319703	2034	0.250681	2044	0.212709	2054	0.188083
2025	0.310264	2035	0.245947	2045	0.209796	2055	0.18607
2026	0.301575	2036	0.241468	2046	0.207	2056	0.184122
2027	0.293547	2037	0.237225	2047	0.204315	2057	0.182235
2028	0.286104	2038	0.233197	2048	0.201733	2058	0.180405
2029	0.279182	2039	0.229368	2049	0.199247	2059	0.17863
2030	0.272724	2040	0.225722	2050	0.196853	2060	0.176908

利用 Kaya 模型计算碳排放量

对于单位能耗二氧化碳排放量, 利用给出数据集中的能源消费的碳排放因子进行判定即可。最终,

引入 Kaya 模型, 用来分析区域碳排放量和该区域人口、社会经济发展水平、能源利用效率以及碳排放因子的关系。模型主要表示为:

Table 12. Projected results of unit carbon emissions

表 12. 单位碳排放量的预测结果

年份	单位碳排	年份	单位碳排	年份	单位碳排	年份	单位碳排
2021	2.25148	2031	2.11688	2041	1.98228	2051	1.84768
2022	2.23802	2032	2.10342	2042	1.96882	2052	1.83422
2023	2.22456	2033	2.08996	2043	1.95536	2053	1.82076
2024	2.2111	2034	2.0765	2044	1.9419	2054	1.8073
2025	2.19764	2035	2.06304	2045	1.92844	2055	1.79384
2026	2.18418	2036	2.04958	2046	1.91498	2056	1.78038
2027	2.17072	2037	2.03612	2047	1.90152	2057	1.76692
2028	2.15726	2038	2.02266	2048	1.88806	2058	1.75346
2029	2.1438	2039	2.0092	2049	1.8746	2059	1.74
2030	2.13034	2040	1.99574	2050	1.86114	2060	1.72654

$$C_{t\text{碳排}} = P_{t\text{人口}} \cdot F_{t\text{人均GDP}} \cdot E_{t\text{单位GDP能耗}} \cdot C_{t\text{单位CO}_2\text{排}} \quad (5-4)$$

$$C_{t\text{碳排}} = P_{t\text{人口}} \cdot \frac{F_{t\text{GDP}}}{P_{t\text{人口}}} \cdot \frac{E_{t\text{总耗能}}}{F_{t\text{GDP}}} \cdot \frac{C_{t\text{碳排}}}{E_{t\text{总耗能}}} \quad (5-5)$$

利用表 12 得到的数据集进行计算在自然情境下的碳排放量。

Table 13. Carbon emissions under natural scenarios

表 13. 自然情景下碳排放量

年份	碳排放量	年份	碳排放量	年份	碳排放量	年份	碳排放量
2021	76242.31	2031	85551.13	2041	94076.08	2051	101272.5
2022	77174.16	2032	86452.65	2042	94860.54	2052	101909.1
2023	78111.54	2033	87344.73	2043	95631.23	2053	102529.8
2024	79051.64	2034	88226.73	2044	96387.89	2054	103134.5
2025	79992.13	2035	89098.07	2045	97130.28	2055	103723.1
2026	80931.03	2036	89958.22	2046	97858.16	2056	104295.3
2027	81866.69	2037	90806.71	2047	98571.3	2057	104851.2
2028	82797.68	2038	91643.12	2048	99269.5	2058	105390.4
2029	83722.77	2039	92467.06	2049	99952.57	2059	105912.9
2030	84640.9	2040	93278.15	2050	100620.3	2060	106418.6

如表 13, 对于利用 Kaya 模型计算碳排放量于沿用上文求解思路求解得到的各项部门碳排放量求和, 得到的结果近似相同。即, 判定区域碳排放与各部门碳排放量的总和服从一致性。

基准情景碳排放量核算, 基于自然情景的前提, 提前确定各个时间点的 GDP 含量。基于 Kaya 模型

进行求解运算。根据上文已经建立出个各产业各部门的不同能耗和人口和 GDP 的关联模型。

$$E = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} E_{ij} \tag{5-6}$$

式中： i 为能源类型， j 为部门。

$$E_{ij} = f_{ij}(F_5(t), P_1(t)) \tag{5-7}$$

$$E = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} f_{ij}(F_5(t), P_1(t)) \tag{5-8}$$

将上文的能源的拟合结果乘以对应的碳排因子，得到碳排的函数关系式：

$$C = E * C_{\text{因子}} \tag{5-9}$$

对碳排的函数关系式对时间 t 求导，利用 2035 年时 $\frac{dC}{dt} = 0$ ，2060 年时 $\frac{dC}{dt} \leq 0$ ， $\frac{E_{t\text{非化石}}}{E_t} \geq 80\%$ 将对应的年份带入，可求解出 P12060 时的范围，并对人口进行拟合：

$$P_{t\text{人口}} = 7593.56 + 60.579 * t \tag{5-10}$$

$$E_{\text{能源}} = -56613.857 + 10.159 * P1 + 0.025 * F \tag{5-11}$$

GPD 的拟合在上一小节完成，将人口和 GDP 拟合带入带能源消耗中，将 2025 年、2030 年、2035 年、2050 年和 2060 年分别带入人口、GDP 和能源消耗的拟合结果，计算出对应的目标值。如表 14：

Table 14. Projections of Population GDP and Energy Consumption on Time to Carbon Neutrality
表 14. 按时达到碳中和的人口 GDP 和能源消耗的预测结果

年份	人口	GDP 总值	能源消耗
2025	8562.824	116755.4	33294.76
2030	8865.719	146314	37110.83
2035	9168.614	177350.6	40963.86
2050	10077.3	279328.4	52744.63
2060	10683.09	354703.6	60783.23

5.2.2. 雄心情景碳排放量核算

在此情景下，要求提前达到碳达峰与碳中和，这里假设提前 T 天到达，因此 $\frac{dC(t-T)}{dt} = 0$ ， $\frac{dC(t-T)}{dt} \leq 0$ ， $\frac{E_{(t-T)\text{非化石}}}{E_{(t-T)}} \geq 80\%$ ，这里分别对应的是 2035- T 和 2060- T ，采用 MATLAB 求解，人口和 GDP 的范围，最终的结果如表 15：

Table 15. Predictions of Early Peak Carbon and Carbon Neutrality
表 15. 提前达到碳达峰与碳中和的预测结果

年份	2025	2030	2035	2050	2060
GDP	116755.4	146314	177350.6	279328.4	354703.6
人口	8578.824	8886.719	9194.614	10118.3	10734.09
能源消费量	33457.3	37324.17	41227.99	53161.15	61301.34
非化石能源消费	16.83%	28.66%	37.64%	78.43%	85.26%
单位 GDP 能耗(利用效率)	0.002866	0.002551	0.002325	0.001903	0.001728

根据表格的数据, 在 2060 种 GDP 的结果番 2 番, 而上文中经济和能源消费量直接相关, 在上文表明能源消费量和碳排放的相关性最大。为了降低碳的排放量, 2060 人口的增长率下降。因此为了区域双碳(碳达峰与碳中和)目标, 我们要维持人口缓慢增长。对与新能源的应用和推广这是首要目标, 在总的能源消费量增长的情况下, 提高非化石能源消费, 以降低碳的排放量。

针对三种情境下碳排放量的核算, 研究的目的是在三种不同的情景下核算碳排放量: 无人为干预的自然情景、按照预定时间达峰并中和的基准情景以及雄心勃勃的前瞻性情景。自然情景假设没有任何政策介入, 基准情景依照国家规定的时间节点(如 2030 年达峰, 2060 年中和)进行模拟, 而雄心情景则设定了更早的达峰与中和目标, 体现了更高的志向和更积极的政策干预。研究中还设定了几个关键假设: 到 2035 年 GDP 是 2020 年的两倍, 到 2060 年是四倍; 2060 年的生态碳汇能吸收基期(2020 年)碳排放量的 10%; 同年, 工程碳汇或碳交易也能吸收 10% 的碳排放量。这些假设对于模拟不同情景下的碳排放量和制定减排策略具有重要意义。提出一系列实现区域碳达峰和碳中和的路径选择, 对比不同情景下的减排效果, 为政策规划提供决策支持。

6. 总结

本文综合分析了中国实现碳达峰和碳中和目标的关键工程与挑战。政府已承诺至 2030 年实现碳排放峰值, 并力争至 2060 年实现碳中和, 发布了相应的双碳行动指导方针, 确立了减排与发展之间的平衡原则和措施。研究建立了区域碳排放与经济增长、人口变动、能源消费之间的模型, 通过一级和二级指标的建立与分析, 利用线性回归、多元线性回归及主成分分析等方法, 对指标间的关系进行了定量化分析, 并对未来趋势进行了预测。通过这些模型, 本文为无人为干预的自然情景、计划内碳达峰与碳中和的基准情景、以及雄心勃勃的提前实现目标情景下的双碳目标与路径规划提供了科学依据, 同时探讨了实现这些目标所面临的主要挑战, 为中国乃至全球的碳减排努力提供了有价值的参考。

参考文献

- [1] 王瑶. 基于多重共线性修正下的多元线性回归[D]: [硕士学位论文]. 伊宁: 伊犁师范大学, 2023. <https://doi.org/10.27808/d.cnki.gylsf.2023.000177>
- [2] 范天星, 刘亚曦. 多元线性回归模型对于空气质量的校准应用研究[J]. 科学技术创新, 2022(2): 57-60.
- [3] 卢嘉澍, 孙坤, 廉洁, 等. 基于灰度预测与马尔柯夫过程的股票价格预测模型[J]. 现代商业, 2017(17): 74-75. <https://doi.org/10.14097/j.cnki.5392/2017.17.035>
- [4] 王舒, 李浩, 钟科, 等. 基于改进灰度算法的分数预测模型应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020(11): 212-215.
- [5] 张晓莉, 王彦蕊, 王国庆, 等. 基于主成分分析与聚类分析的百合品质评价[J]. 农产品加工, 2023(14): 49-54. [https://doi.org/10.16693/j.cnki.1671-9646\(X\).2023.07.042](https://doi.org/10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2023.07.042)
- [6] 万忠宏, 陶春峰, 郭锐, 等. 基于主成分分析(PCA)的波形分量分解与重构软件研发与应用[C]//2021 年中国地球科学联合学术年会论文集(九). 北京: 北京伯通电子出版社, 2021: 4.
- [7] 郑军, 刘婷. 主要发达国家碳达峰碳中和的实践经验及对中国的启示[J]. 中国环境管理, 2023, 15(4): 18-25+43. <https://doi.org/10.16868/j.cnki.1674-6252.2023.04.018>
- [8] 何宇婷. 我国碳中和政策的效应研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南财经大学, 2023. <https://doi.org/10.27455/d.cnki.gycmc.2023.000506>
- [9] 满莉, 李雨霏, 王多栋, 等. 碳中和在海绵城市建设中的实践路径研究[C]//河海大学, 南阳市人民政府, 南阳师范学院, 南水北调集团中线公司. 2022(第十届)中国水生态大会论文集. 2022: 7.