

“双碳”目标下基于人口和经济变化的能源消费量预测模型

杨璐祯, 费晨*

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年3月16日; 录用日期: 2025年4月9日; 发布日期: 2025年4月17日

摘要

本文基于“双碳”背景下探究了区域规划者的目标与决策性问题, 规划者利用工程碳汇、碳交易政策来实现社会目标。本文首先利用相关性分析和专家问卷构建出了指标体系参数, 分析相关参数趋势变化; 其次运用多元线性回归、灰色预测模型来进行碳排放预测, 在不同规划阶段给不同模型赋予不同的权重参数。最后, 我们利用动态规划原理, 控制碳政策的实施让“双碳”政策得以达成, 通过控制政策力度参数变化得出了三种情景下的碳排放以及相关指标目标与路径。

关键词

相关性分析, 碳政策, 灰色预测, 动态规划, 多元线性回归

A Predictive Model of Energy Consumption Based on Population and Economic Changes under the “Dual Carbon” Goals

Luzhen Yang, Chen Fei*

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 16th, 2025; accepted: Apr. 9th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

This paper explores the objectives and decision-making issues of regional planners under the “dual carbon” framework, where planners leverage engineering carbon sinks and carbon trading policies

*通讯作者。

to achieve societal goals. Initially, correlation analysis and expert questionnaires are employed to construct an indicator system and its parameters, analyzing the trend changes of relevant parameters. Subsequently, multivariate linear regression and grey forecasting models are applied to predict carbon emissions, assigning different weight parameters to the models at various planning stages. Finally, using dynamic programming principles, the implementation of carbon policies is controlled to realize the “dual carbon” objectives. By adjusting the intensity parameters of the policies, the study derives carbon emissions and related indicator targets and pathways under three distinct scenarios.

Keywords

Correlation Analysis, Carbon Policy, Grey Prediction, Dynamic Programming, Multiple Linear Regression

Copyright © 2025 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

中国作为全球最大的发展中国家，提出了到 2035 年基本实现现代化、到 2050 年实现具有中国特色现代化的目标，以推动中华民族的伟大复兴。为此，若要在 2060 年达成碳中和愿景，必须有效协调经济发展与碳排放削减之间的内在张力。现有研究在探讨经济增长与碳排放关系方面已取得一定成果，为达到碳中和碳达峰的目标，文献[1]基于 VAR 模型对中国化石能源消费与经济增长之间的关系进行了研究，发现当期 GDP 对碳排放总量的当期波动有显著性影响，每增加 1% 的 GDP 便会增加 0.719% 的碳排放量。文献[2]通过对中国西部地区碳排放和经济增长关系进行研究，得出经济规模的高速增长是导致碳排放增加的主要因素，经济结构的调整变化对碳排放的减少有很大潜力的结论。文献[3]认为人口增长对温室气体排放产生影响存在两种方式：一是较多的人口会对能源产生越来越多的需求因此能源消费产生的温室气体排放也越来越多；二是快速的人口增长导致了森林破坏改变了土地利用方式等这些都导致了温室气体排放量的增加。文献[4]利用 1970 年至 2000 年加拿大 5 个地区的面板数据考察人口总量、人均 GDP、技术变革与 CO₂ 排放之间的关系研究表明：人口总量与 CO₂ 排放满足倒 U 型曲线关系。文献[5]提出我国无法迅速改变能源结构，煤炭将长期处于主导地位。而文献[6]提到以煤炭为主的能源消费结构会导致严重的环境污染，以发电为例，单位发电燃烧煤炭产生的 CO₂ 是石油的 1.3 倍。其次文献[7]-[11]是针对我国碳排放量进行预测。上述文献为碳排放的相关影响因素以及未来碳排放预测提供理论依据但在建立碳排放预测模型时仍存在不足。部分研究仅侧重于单一模型分析，忽略了多模型结合可能带来的预测精度提升。因此，本研究旨在弥补上述不足，基于“双碳”目标，建立综合考虑人口、经济和能源消费的碳排放预测模型。

2. 模型影响因素的选取和来源

通过阅读相关指标体系构建方法的论文，结合题目中对指标体系的不同要求以及它们之间存在的隐含关系，本文使用了德尔菲法的方法来对该指标体系进行构建。为确保指标体系的科学性和客观性，我们详细制定了专家选择标准、问卷设计细节以及专家意见处理方式。专家选择标准包括其在能源经济、环境政策和统计建模方面具备深厚研究背景和丰富实践经验；问卷设计采用五级量表法，对指标重要性

进行评分，并设置开放性意见栏；专家意见通过多轮问卷反馈进行分析和整合，直到指标体系稳定且具有一致性。具体的构建步骤如下：

1) 拟定初始基础指标：通过对《中国统计年鉴》以及现有论文的思考与整理，我们初步将某区域经济、人口、能源消费量、碳排放量进行拆解，同时我们基于已有数据对这些拆解后得到的指标进行筛选。

2) 专家访谈：在上一步的基础之上，我们咨询并总结了专家（一共寻访了相关领域的5位博士生导师与2位硕士生导师）对这些初始基础指标的看法，进一步对已有指标进行增加与删减。

3) 调查问卷的编写以及收发：基于专家的指导，我们定版了第一轮专家调查问卷。问卷设计包括封闭式和开放式问题相结合，其中封闭式问题采用五级量表法对指标重要性进行评分，开放式问题用于专家提出补充意见或修改建议。此外，问卷还明确了每个指标的定义和测量方法，以确保专家理解的一致性。最终，我们对问卷中这些指标进行赋分，并将收集回的指标得分情况取平均值作为它的最终值。

具体过程如下：1) 将问卷中的指标重要性程度根据特量表法分为五个等级：“非常同意”、“同意”、“不一定”、“不同意”、“非常不同意”，每个等级分布计分为：5、4、3、2、1，通过专家对不同指标的赋分可以看出每个专家对是否可以使用该指标作为描述的态度强弱程度。同时增加备注栏，若专家对指标存在疑惑可以进行补充说明。2) 回收并对指标得分情况进行分析，根据专家评分和开放性意见，对指标进行增删和修改。我们采用加权平均法结合专家建议，确保每次调整都基于科学依据和多方共识。调整后的指标再次下发给专家确认，并进行多轮反馈，直到不再出现剔除与修改情况，确保指标体系的稳定性和一致性。最终，将均值为3以上的指标保留进指标体系中。3) 计算说明：每一个指标将被7位专家进行打分，我们采用加总平均的办法求得该指标的平均值，平均值= $\sum(\text{分数} * \text{分值}) / \text{总人数}$

通过上述具体过程，得到共计7份问卷的反馈，具体计分情况如表1所示：

Table 1. Variable indicator scoresheet

表 1. 变量指标计分表

二级指标	5	4	3	2	1	均值
区域生产总值增长率(%)	2	2	3	0	0	3.857143
人均区域总收入(国际元/人)	3	3	1	0	0	4.285714
人均地区生产总值(国际元/人)	1	4	2	0	0	3.857143
地区生产总值(国际元)	2	4	1	0	0	4.142857
常驻人口(万人)	2	3	2	0	0	4
人口自然增长率(%)	2	3	2	0	0	4
城市化水平(%)	1	2	4	0	0	3.571429
流动人口(万人)	0	3	4	0	0	3.428571
能源消费总量(万 tce)	2	3	2	0	0	4
能源消费弹性系数	2	3	2	0	0	4
单位国内生产总值能耗(万 tce)	1	4	2	0	0	3.857143
碳排放量总量(万吨)	1	3	3	0	0	3.714286
其他污染物排放量(万吨)	1	2	4	0	0	3.571429
可再生能源利用率(%)	2	2	3	0	0	3.857143
单位 GDP 碳排放量(万吨二氧化碳/万元)	1	4	2	0	0	3.857143
单位能源碳排放量(万吨二氧化碳/吨标准煤)	1	2	4	0	0	3.571429

在筛选下，未达到3分均值的指标有：出生率(%)、死亡率(%)、城镇人口和乡村人口(万人)、单位工业增加值能耗(万tce)、人均碳排放量(万吨二氧化碳/人)。

通过专家的备注与指导，我们认为出生率与死亡率可以与人口自然增长率相结合，只保留人口自然增长率，同样的城镇人口和乡村人口也可以通过城市化水平来表示。单位工业增加值能耗属于单位国内生产总值能耗，二者具有相同的部分，因此将其删去。最后人均碳排放量是由碳排放总量/总人数得到的，因此也可以简单地使用碳排放总量来涵盖其数值。

在筛选过后，专家的意见逐步趋向一致，并不存在仍然需要被剔除的指标，因此保留目前仍然留存的平均值大于3的指标作为最终指标体系中的指标。通过两轮的剔除以及修订与完善，最终得到指标体系如下图1：

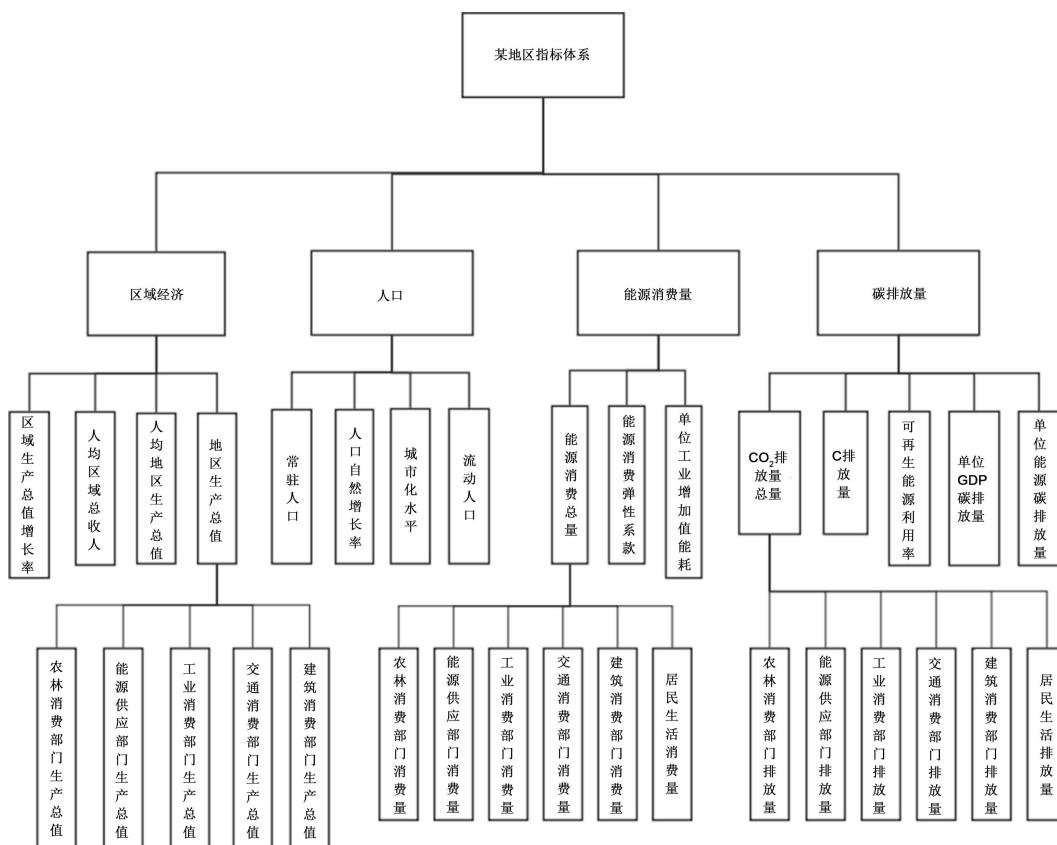


Figure 1. Schematic diagram of the indicator system

图1. 指标体系示意图

变量指标说明如下表2：

Table 2. Variable indicator explanation table

表2. 变量指标说明表

变量名	变量指标说明
P	人口
GNP	国民生产总值
TCE	能源消费量
E	碳排放量

3. 碳排放预测模型

3.1. 描述性统计结果

表 3 是对各变量数据的简单指标的描述, SPSS 分别对各指标的数据求了平均值和标准偏差, 并统计了每个组的数据个数。

Table 3. Descriptive statistics

表 3. 描述性统计

	平均值	标准偏差	个案数
E	101256.2109	7053.76307	11
GNP	65543.0200	16171.45244	11
P	8272.5718	200.45557	11
TCE	29042.0264	2497.69056	11

3.2. 多元线性回归预测模型

首先绘制 GNP、人口、能源消费量与碳排放量之间关系的散点图, 如下图 2:

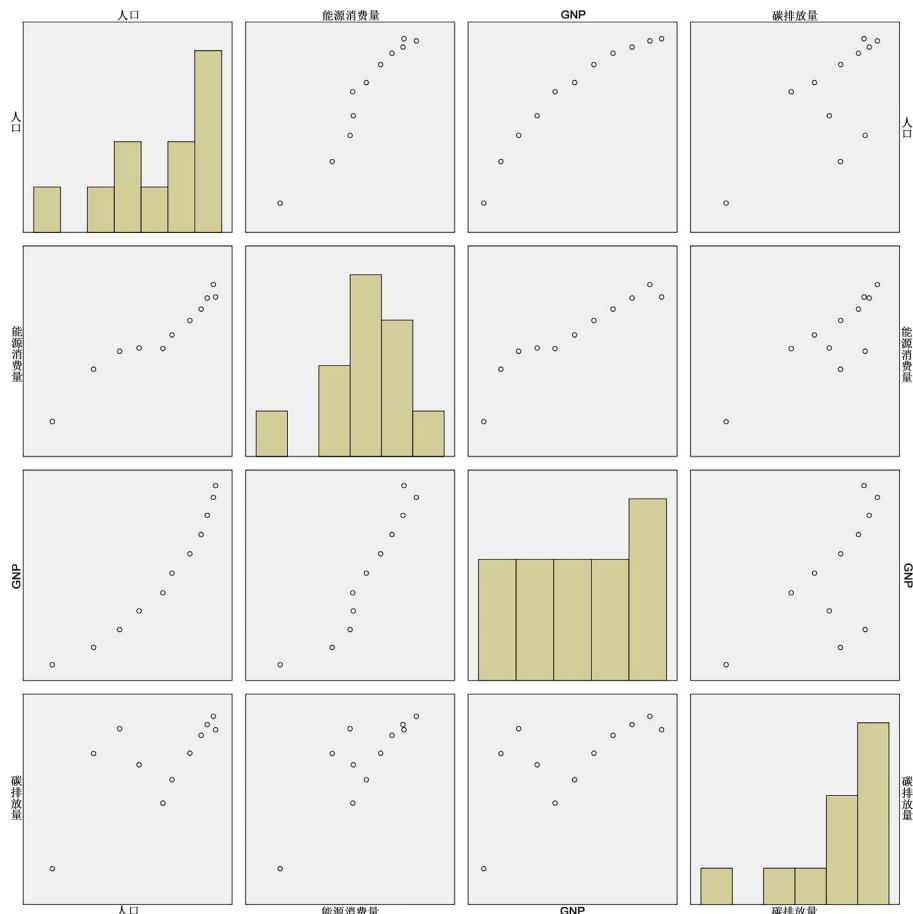


Figure 2. Scatter plot of the relationship between GNP, population, energy consumption and carbon emissions
图 2. GNP、人口、能源消费量与碳排放量之间关系的散点图

从图2中可以看出，各自变量与因变量之间存有一定线性关系。

表4是本次回归模型的模型摘要表：

1) 表4中R为多重相关系数，主要用于判断自变量和因变量的线性关系，同时也是回归模型的拟合程度指标，可做模型优度的参考指标；

2) R方和调整后R方是指回归分析中自变量变异对因变量的解释度，一般我们采用调整后R方来衡量。可以看出能源消费量等3项指标能解释碳排放量变化的93.6% (0.936)，这表明能源消费量(TEC)、GNP和人口(P)能较好地解释碳的排放，能源消费量(TEC)、GNP和人口(P)对碳排放量具有较高的影响强度。

Table 4. Descriptive statistics

表4. 描述性统计

模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的错误	德宾 - 沃森
1	0.978a	0.956	0.936	1777.91375	2.280

a. 预测变量：(常量), TEC, GNP, P; b. 因变量：E。

表5为模型显著性的检验，在该表中F值=50.135，为F检验结果；根据F值计算的P值<0.001，表明因变量和自变量之间存在线性相关。

Table 5. ANOVA table

表5. ANOVA 表

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
1	回归	475428893.246	3	158476297.749	50.135
	残差	22126841.066	7	3160977.295	
	总计	497555734.313	10		

a. 因变量：E; b. 预测变量：(常量), TEC, GNP, P。

由表6回归系数表可以假设出本文的回归模型：产量=B0(常量)+B1*GNP+B2*P+B3*TEC，其中人口和能源消费量的显著性检验结果小于0.05，因此回归模型为：

$$E = 307446.9 - 50.549P + 7.888 * TCE \quad (1)$$

Table 6. Regression coefficient table

表6. 回归系数表

模型	未标准化系数		Beta	t	显著性	共线性统计	
	B	标准错误				容差	VIF
1	(常量)	307446.966	90360.025	3.402	0.011		
	GNP	-0.261	0.124	-0.598	-0.098	0.074	0.078
	P	-50.549	13.563	-1.437	-3.727	0.007	0.043
	TEC	7.888	0.915	2.793	8.618	0.000	0.060

a. 因变量：E。

图 3 为残差直方图和 P-P 图。可以看出, 图 3 服从正态分布, 且均数接近于 0, 标准差接近于 1 (标准正态分布), 这意味着线性回归在正态性条件是达到的, 同时也表明满足正态性条件。

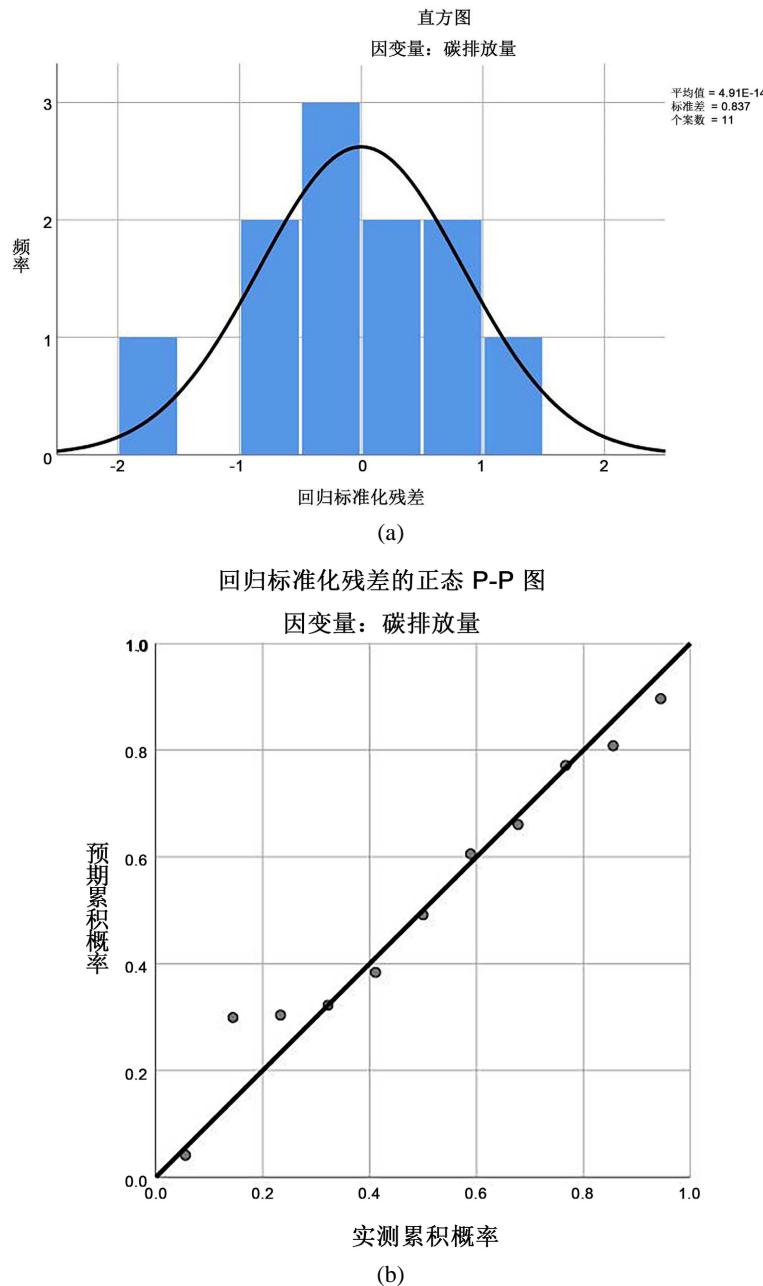


Figure 3. Residual histogram and normal P-P plot
图 3. 残差直方图和正态 P-P 图

本文通过时间序列分别预测得出人口与能源消费量的预测值后, 通过公式(1)求得碳排放量的预测情况。首先是对人口数量进行时间序列预测, 可以从图 4 中看出随着时间的增加人口数量正在逐年增加。

由表 7 可知模型的基本情况, 其中 R 方数值为 0.977 意味着该模型的拟合效果较好, 可以用于预测分析。

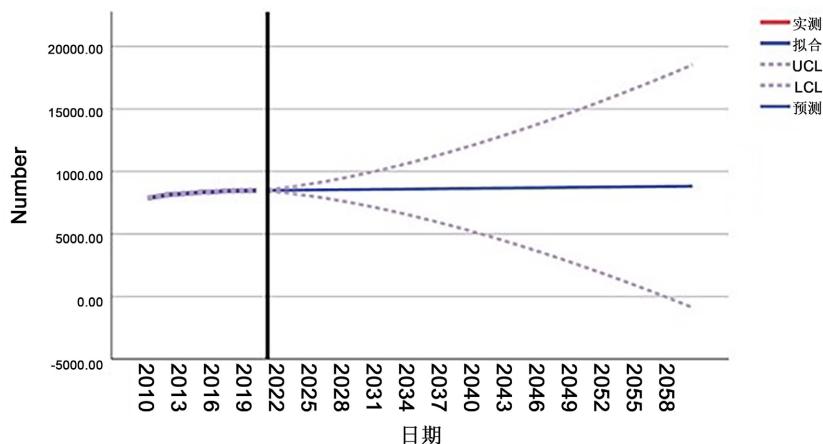


Figure 4. Time series population forecast chart
图 4. 时间序列人口预测图

Table 7. Overview of time series population forecasting models
表 7. 时间序列人口预测模型概况

模型	预测变量数	模型拟合度统计		杨 - 博克斯 Q (18)			离群值数
		平稳 R 方	R 方	统计	DF	显著性	
P 预测模型	0	0.186	0.977	25.076	16	0.069	0

表 8 为人口的预测情况，由于预测年份较多这里仅展示每五年的人口数量预测情况：

Table 8. Time series population forecast situation
表 8. 时间序列人口预测情况

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050
人口数量	8520.81	8564.36	8607.91	8651.46	8695	8738.55

其次是能源消费量的预测情况。由下图 5 中可以看出能源消费量随着时间而不短增加。

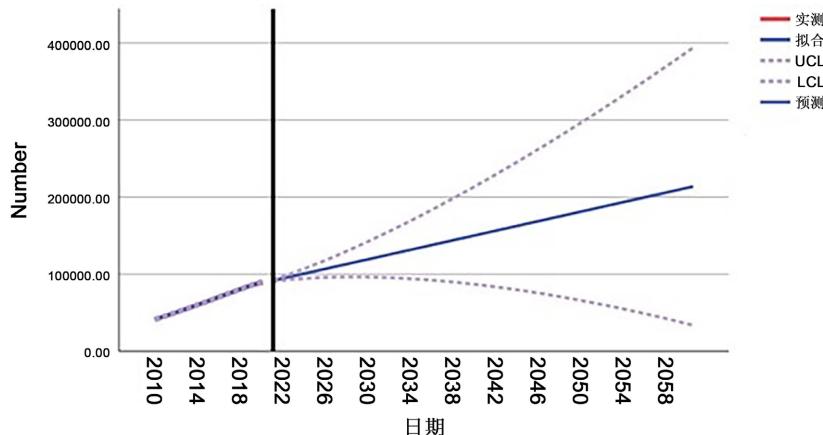


Figure 5. Time series energy consumption forecast chart
图 5. 时间序列能源消费量预测图

由表 9 可知模型的基本情况, 其中 R 方数值为 0.996 意味着该模型的拟合效果较好, 可以用于预测分析。

Table 9. Overview of time series energy consumption prediction models**表 9. 时间序列能源消费量预测模型概况**

模型	预测变量数	模型拟合度统计		杨 - 博克斯 Q (18)			离群值数
		平稳 R 方	R 方	统计	DF	显著性	
TEC 预测模型	0	0.163	0.996	23.769	17	0.053	0

表 10 为人口的预测情况, 由于预测年份较多这里仅展示每五年的能源消费量预测情况:

Table 10. Time series energy consumption forecast**表 10. 时间序列能源消费量预测情况**

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050
能源消费量	32556.9	33390.23	34223.56	35056.9	35890.13	36723.46

最后可以根据公式(1)得出碳排放量的预测情况, 具体数值如表 11 所示:

Table 11. Prediction of carbon emissions**表 11. 碳排放量预测情况**

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050
碳排放量	133537.3	137909.2	142281.1	146653.1	151024.7	155396.6

3.3. 灰色关联模型

首先采用灰色关联模型来进行区域碳排放量以及经济、人口、能源消费量各指标的关联关系分析。灰色关联分析对样本量的多少没有过多的要求, 这使得它在数据量较少的情况下仍然可以进行有效的分析。能够更加精确地分析本文十一年的年度数据。

如图 6 我们画出了区域碳排放总量, 区域生产总值, 区域常驻人口以及区域能源消费总量经过标准化后在 2010 年至 2020 年的趋势图。可以看到这四种指标随着时间都有着明显上升的趋势, 仅碳排放量与能源消费总量在 2012 年和 2014 年出现同比下降趋势。

表 12 说明了能源消费量与碳排放量的普遍关联性, 无论对于哪个产业而言。其中, 第三产业的关联性最高, 侧面说明了国家针对第三产业要加大减排力度, 落实碳税碳限额政策, 增大第三产业的税率, 减少其碳配额以达到减少其能源消费量的目的。

图 7 描绘了区域下分的不同产业及居民生活碳排放、生产总值、常驻人口以及能源消费量随时间关系图。除了第一第二产业碳排放量在 2012 年至 2014 年出现降幅, 其它指标随着时间都呈现同比上升趋势。第二产业的碳排放量最高, 居民消费碳排放量最低。

3.4. 灰色预测模型

与上述过程类似, 本文利用灰色预测模型对人口数量与能源消费量进行预测, 在得到预测值后, 通过多元线性回归所得到的公式(1)计算出碳排放量的预测量。首先对人口数量进行预测, 由级比检验结果

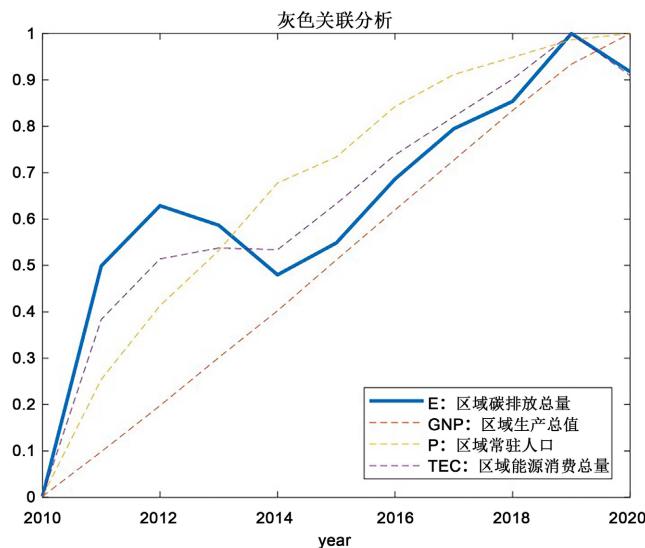
表 13 可知原序列的所有级比值都位于区间(0.846, 1.181)内，说明原序列适合构建灰色预测模型。**Figure 6.** Trend chart of various indicators by year

图 6. 各项指标关于年份趋势图

Table 12. Grey correlation degree between carbon emissions of various industries and residential consumption and economic, population, and energy consumption factors**表 12.** 各个产业及居民消费碳排放量与经济、人口、能耗之间的灰色关联度

	各产业生产总值	常驻人口	能源消费量
第一产业碳排放量	0.5861	0.6712	0.7439
第二产业碳排放量	0.6799	0.7589	0.8420
第三产业碳排放量	0.7967	0.5873	0.8809
居民消费碳排放量	0.8111	0.6801	0.8431

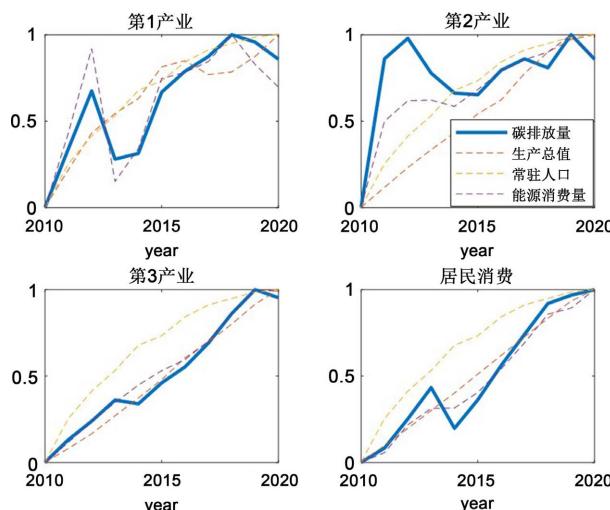
**Figure 7.** Trend chart of various indicators by year for different industries and residential consumption

图 7. 不同产业及居民消费的各项指标关于年份趋势图

Table 13. Table of population size ratio test results
表 13. 人口数量级比检验结果表

索引项	原始值	级比值
2010	7869.34	-
2012	8119.81	0.988
2014	8281.09	0.989
2016	8381.47	0.992
2018	8446.19	0.997
2020	8477.26	0.999

表 14 展示了发展系数、灰色作用量、后验差比值。从表中分析可以得到，后验差比值为 0.038，因此建立的灰色模型精度高。

Table 14. Construction of grey prediction model for population quantity
表 14. 人口数量灰色预测模型构建

发展系数	灰色作用量	后验差比
-0.006	8017.613	0.038

下表 15 展示了人口数量灰色预测的值，由表中可以看出，人口数量在未来正在加速增加。

Table 15. Grey prediction of population size
表 15. 人口数量灰色预测情况

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050
人口数量	8628	8895	8977	9212	9303	9574

其次使用灰色预测模型对 TEC 进行预测，由级比检验结果表 16 可知原序列的所有级比值都位于区间(0.889, 1.125)内，说明原序列适合构建灰色预测模型。

Table 16. TEC level comparison test result table
表 16. TEC 级比检验结果表

索引项	原始值	级比值
2010	41383.87	-
2012	50660.2	0.907
2014	60359.43	0.921
2016	70665.707	0.928
2018	80827.712	0.937
2020	88683.215	0.965

表 17 展示了发展系数、灰色作用量、后验差比值。从表中分析可以得到，后验差比值为 0.01，因此

建立的灰色模型精度高。

Table 17. Construction of TEC grey prediction model
表 17. TEC 灰色预测模型构建

发展系数	灰色作用量	后验差比
-0.071	43735.432	0.01

最后得出通过灰色预测模型的能源消费量如下表 18 所示：

Table 18. Grey prediction of energy emissions
表 18. 能源排放量灰色预测情况

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050
能源排放量 预测值	32556.9	33390.23	34223.56	35056.9	35890.13	36723.46

根据公式(1)，我们可以得到碳排放的灰色预测情况，如下表 19 所示，由表中可知碳排放量随着时间的增加不断减少。

Table 19. Grey prediction of carbon emissions
表 19. 碳排放量灰色预测情况

年份	2025	2030	2035	2040	2045	2050
碳排放量 预测值	125967.6925	133061.37	139030.747	143201.88	74639.89	81761.8

通过对表 11 和表 19 我们可以发现通过时间序列预测得到的碳排放量仍然呈逐年递增的情形，但灰色预测的结果却显示碳排放量的变化在不停的波动，并最终维持在一个固定的范围内，因此本文认为该预测模型更加贴近现实情况。

4. 区域双碳(碳达峰与碳中和)目标与路径规划

首先我们对区域碳排放量的过程进行建模[12]：

$$dE_t = E_t(g_t - \alpha_t)dt + \sigma_E E_t dW_t^E \quad (2)$$

上述的随机微分方程描述了区域碳排放量的大小随着时间的变化，其中 g_t 表示碳排放的自然增长率，在没有任何的政府碳减排(工程碳汇以及碳交易)政策 α_t 情况下。 dW_t 表示标准布朗运动项，碳排放量会受到外界扰动因素干扰，如天气变化、人口流动等因素。

接着，我们考虑自然碳汇对碳排放量的影响，区域碳排放量的动态关系可以用以下动态随机微分方程来描述：

$$dE_t = E_t(g_t - \alpha_t - \delta(E_t^s))dt + \sigma_E E_t dW_t^E \quad (3)$$

其中， $\delta(E_t^s)$ 表示自然碳汇的碳吸收速率， E_t^s 表示截止到 t 时刻自然碳汇已经吸收的碳。

本质上其是关于 E_t^s 的一个凸函数，并且随着吸收的碳量增加而减少。根据上述的随机微分方程，政府可以控制 α_t 的大小来实现问题中的三种情景： $\alpha_t = 0$ 表示无人为干预地自然情景； $\alpha_t = \alpha^*$ 表示政府的

最优碳政策使得 2035 年达到碳达峰, 2060 年实现碳中和。 $\alpha_t > \alpha^*$ 表示政府提前达到双碳目标的决心。接着, 我们用 AK 模型来描述区域 GDP:

$$Y_t = A_t K_t = X_t + C_t + I_t \quad (4)$$

A_t 表示区域经济在 t 时刻的生产力, K_t 表示经济在 t 时刻的资本存量, X_t, C_t, I_t 分别表示区域经济在 t 时刻的减排支出, 消费额以及投资额。其中, 减排支出是关于减排率 α_t 的二次函数:

$$X_t = \frac{1}{2} \alpha_t^2 K_t \quad (5)$$

而区域经济的资本存量用下式来表示:

$$dK_t = \left(\underbrace{I_t}_{\text{投资}} - \underbrace{\frac{1}{2} \Phi_1 \frac{I_t^2}{K_t}}_{\text{投资成本}} - \underbrace{\theta K_t}_{\text{折旧}} - \underbrace{\varphi \left(\frac{E_t}{K_t} \right) K_t}_{\text{碳排放造成的资本损失}} \right) dt + \sigma_K K_t dW_t^K \quad (6)$$

进而, 我们根据 Duffie and Epstein [13], 社会规划者要使得社会福利最大化:

$$J(K_t, E_t) = \sup_{\alpha_t} E_t \left[\int_t^\infty f(C_s, J(s, K_s, E_s)) ds \right] \quad (7)$$

为了方便处理, 我们将 $f(C_s, J(s, K_s, E_s))$ 简单构造成 CRRA 效用函数:

$$f(C_s, J_s) = \beta J \left[\frac{C^{1-\gamma}}{(1-\gamma)J} - 1 \right] \quad (8)$$

其中, β 表示时间不耐烦程度, γ 表示相对风险厌恶系数。进而我们可以推导出关于值函数 J 的 HJB 方程, 这里我们对值函数 $J(K_t, E_t)$ 进行降维处理得到 $J(\varepsilon_t)$ 的值函数, 用 $\varepsilon_t = \frac{E_t}{K_t}$ 来表示单位资本存量的碳排放:

$$0 = \max_{\alpha_t, i_t} \left\{ \beta J \left[\frac{\left(A_t - \frac{1}{2} \alpha_t^2 - i_t \right)^{1-\gamma}}{(1-\gamma)J} - 1 \right] + \frac{1}{2} J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t \sigma_E^2 + J_{\varepsilon_t} \left[(g_t - \alpha_t) \varepsilon_t - \varepsilon_t \left(i_t - \frac{1}{2} \Phi_1 i_t^2 - \theta - \varphi(\varepsilon_t) \right) \right] \right\} \quad (9)$$

上式中 $i_t = \frac{I_t}{K_t}$ 表示单位资本的投资量, 即投资率。从而通过一阶最优条件可以推出关于政府最优碳政策 α_t :

$$J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t + \beta \left[A_t - \frac{1}{2} \alpha_t^2 \right]^{-\gamma} (-\alpha_t) = 0 \quad (10)$$

类似地我们可以得到关于单位资本投资量 i_t 的表达式:

$$-\varepsilon_t J_{\varepsilon_t} + J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t \phi_i i_t - \beta \left(A_t - \frac{1}{2} \alpha_t^2 - i_t \right)^{-\gamma} = 0 \quad (11)$$

为了方便计算, 我们考虑 $\gamma=0$ 的情况, 进而将 α_t 和 i_t 的表达式代入上述 HJB 方程可以得到:

$$0 = \beta J \left[A_t - \frac{1}{2} \left(\frac{J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t}{\beta} \right)^2 - \frac{\beta}{J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t \Phi_1} - \frac{1}{\Phi_1} - 1 \right] + \frac{1}{2} J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t \sigma_E^2 \\ + J_{\varepsilon_t} \left[\left(g_t - \frac{J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t}{\beta} \right) \varepsilon_t - \varepsilon_t \left(\frac{\beta}{J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t \Phi_1} + \frac{1}{\Phi_1} - \frac{1}{2} \Phi_1 \left(\frac{\beta}{J_{\varepsilon_t} \varepsilon_t \Phi_1} - \frac{1}{\Phi_1} \right)^2 - \theta - \varphi(\varepsilon_t) \right) \right] \quad (12)$$

对上述二阶微分方程模拟可以得到 $J(\varepsilon_t)$ 的值，进而可以得出碳排放量 E_t 在 2020 年至 2035 年的最优碳排放路径以及 2035 年至 2060 年的最优路径；由于要实现碳达峰和碳中和，我们以 2035 年为划分进行两阶段模拟。GDP (Y) 以及能源消费量可直接模拟得到，再根据 Kaya 模型可以推算出人口的目标值。

其中 Kaya 模型如下所示：

$$\text{CO}_2 = P * \text{GDP} / P * E / \text{GDP} * \text{CO}_2 / E \quad (13)$$

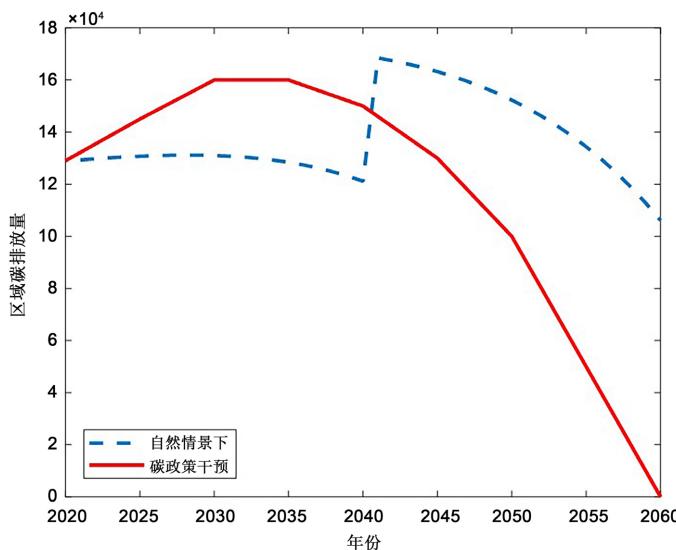


Figure 8. Trend chart of various indicators by year for different industries and residential consumption

图 8. 不同产业及居民消费的各项指标关于年份趋势图

如图 8 我们可以看到在政策干预下碳排放量 E_t 在 2035 年达到顶峰，在 2060 年为 0；而自然情境下的碳排放量始终维持在一个高的区间范围内。如图红线描述的就是最优的碳排放路径，而在政策强度加大时碳排量会进一步降低。

5. 结论

本文首先根据文献以及国家统计年鉴的指标设立，初步建立了指标体系，同时识别了指标体系中的主要指标：区域经济、人口、能源消费量、碳排放量，用灰色关联模型阐述各个主要指标的相互关联情况，进一步通过分析不同指标对碳排放量产生的影响及贡献，我们指出了部分指标：地区生产总值、能源消费总量、 CO_2 排放量总量等作为预测碳排放量的基础，并建立多元回归方程。其次，分别对人口数量和能源排放量进行时间序列与灰色预测，在得到预测值之后通过代入多元回归方程以得到碳排放预测情

况。最后，通过随机微分方程对区域碳排放量的目标与路径进行预测，我们认为在政策干扰下碳排放量将在 2035 年达到顶峰，在 2060 年清零。

参考文献

- [1] 武红, 谷树忠, 关兴良, 等. 中国化石能源消费碳排放与经济增长关系研究[J]. 自然资源学报, 2013(3): 381-390.
- [2] 杨蝶, 常烜钰. 西部地区碳排放与经济增长关系的脱钩及驱动因素[J]. 经济地理, 2012, 32(12): 34-39.
- [3] Birdsall, N. (1992) Another Look at Population and Global Warming: Population Health and Nutrition Policy Research Working Paper. World Bank WPS, 1020.
- [4] Lantz, V. and Feng, Q. (2006) Assessing Income, Population, and Technology Impacts on CO₂ Emissions in Canada: Where's the EKC? *Ecological Economics*, **57**, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.04.006>
- [5] Lin, B. and Liu, J. (2010) Estimating Coal Production Peak and Trends of Coal Imports in China. *Energy Policy*, **38**, 512-519. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.042>
- [6] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4): 27-36.
- [7] Auffhammer, M. and Carson, R.T. (2008) Forecasting the Path of China's CO₂ Emissions Using Province-Level Information. *Journal of Environmental Economics and Management*, **55**, 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2007.10.002>
- [8] Blanford, G.J., Richels, R.G. and Rutherford, T.F. (2009) Revised Emissions Growth Projections for China: Why Post-Kyoto Climate Policy Must Look East. In: Aldy, J.E. and Stavins, R.N., Eds., *Post-Kyoto International Climate Policy*, Cambridge University Press, 822-856. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511813207.027>
- [9] Jiang, K. and Hu, X. (2006) Energy Demand and Emissions in 2030 in China: Scenarios and Policy Options. *Environmental Economics and Policy Studies*, **7**, 233-250. <https://doi.org/10.1007/bf03354001>
- [10] Energy Research Institute (ERI) (2003) China's Sustainable Energy Future: Scenarios of Energy and Carbon Emissions. Lawrence Berkeley National Laboratory, 3.
- [11] Fridley Aden, N.T., Sinton, J.E., et al. (2006) China's Energy Future to 2020. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [12] Hambel, C., Kraft, H. and Schwartz, E. (2021) Optimal Carbon Abatement in a Stochastic Equilibrium Model with Climate Change. *European Economic Review*, **132**, Article ID: 103642. <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2020.103642>
- [13] Duffie, D. and Epstein, L.G. (1992) Stochastic Differential Utility. *Econometrica*, **60**, 353-394. <https://doi.org/10.2307/2951600>